ИнтерКарто. ИнтерГИС

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНОВ В УСЛОВИЯХ КРИЗИСА

Материалы Международной конференции

Улан-Удэ (Республика Бурятия, Россия)
12–14 сентября
Улан-Батор (Монголия)
16–18 сентября 2023

Том 29
Часть 1

http://intercarto.msu.ru

ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
МГУ имени М.В. Ломоносова
Москва, 2023

ISSN 2414-9179 (Print)
ISSN 2414-9209 (Online)
УДК 911.2:528

Организаторы конференции:
Международная картографическая ассоциация
Международная академия наук Евразии
МГУ имени М.В. Ломоносова
Отделение наук о Земле РАН
Исследовательский центр «Картфонд»
Байкальский институт природопользования СО РАН
Бурятский государственный университет
Монгольский национальный университет

И 732 **ИнтерКарто. ИнтерГИС.** Геоинформационная поддержка устойчивого развития регионов в условиях кризиса: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2023. Т. 29. Ч. 1. 694 с.

Сборник включает материалы, представленные на Международную конференцию «ИнтерКарто. ИнтерГИС 29». В статьях рассматриваются теоретические и методические аспекты геоинформационного и картографического обеспечения экологических, экономических и социальных вопросов устойчивого развития, геоинформатики, картографии, создания атласов, дистанционного зондирования Земли. Также рассматриваются аспекты картографического и геоинформационного обеспечения решения вопросов общественного здоровья, сельского хозяйства и землепользования, туризма, природного и культурного наследия, исторической географии и географического образования. Сделан акцент на вопросы геоинформационной поддержки устойчивого развития регионов в условиях кризиса. Сборник выпускается 1 раз в год, начиная с 1994 г.

Главный редактор: **В.С. Тикунов** (МГУ)
Ответственные редакторы: **М.В. Грибок** (МГУ), **О.И. Маркова** (МГУ)
Редакционная коллегия: **О.Е. Архипова** (Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону), **П.Я. Бакланов** (Тихоокеанский ин-т географии РАН, г. Владивосток), **А.Р. Батуев** (Ин-т географии СО РАН, г. Иркутск), **В.С. Белозеров** (СКФУ, г. Ставрополь), **С.Н. Бобылев** (МГУ), **Ц. Вэйхун** (Нац. исслед. центр инженерии и геоматики, Китай), **Т.П. Варшанина** (Адыгейский ГУ), **Г. Гиенко** (Ун-т Аляски, США), **М. Говоров** (Университетский Колледж Маласпина, Канада), **Н. Гойко** (Ун-т Черногории), **С. Горин** (Ун-т Св. Кирилла и Мефодия, Македония), **Н**. **Карациколас** (Ун-т Аристотеля, Греция), **Т. Кольчугина** (Корпорация технологий устойчивого развития, США), **А.В. Кошкарев** (Институт географии РАН), **Х. Кремерс** (МКА, Германия), **А. Курбан** (Синьцзянский ин-т экологии и географии, Китай), **Х. Линь** (Китайский ун-т Гонконга), **Д.В. Лисицкий** (СГУГиТ, г. Новосибирск), **И.К. Лурье** (МГУ), **Ф. Де Мейер** (Гентский ун-т, Бельгия), **М.В. Ныpцов** (МГУ), **Г. Нямдава** (Министерство окружающей среды, зеленого развития и туризма, Монголия), **Ф. Ормелинг** (Ун-т Утрехта, Нидерланды), **Е.А. Паниди** (СПбГУ), **А.Н. Панин** (МГУ), **А.В. Погорелов** (КубГУ, г. Краснодар), **С.В. Пьянков** (Пермский государственный ун-т), **И.Н. Ротанова** (Алтайский государственный ун-т, г. Барнаул), **И.Д. Стрелецкая** (МГУ), **Н. Улугтекин** (Стамбульский технический ун-т, Турция), **Н.Н. Филатов** (Институт водных проблем Севера РАН, г. Петрозаводск), **М.-И. Фрейтас** (Гос. ун-т Сан-Паулу, Бразилия), **Р. Хусса** (Марокко), **А.Н. Чумаченко** (Саратовский государственный ун-т), **Н.А**. **Щитова** (СКФУ, г. Ставрополь)

Образцы цитирования статей:
Иванов И.О., Петров И.О. Название статьи. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационная поддержка устойчивого развития регионов в условиях кризиса: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2023. Т. 29. Ч. 1. С. 110–120. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-110-120 (для цитирования на русском языке)

Ivanov A.B., Petrov A.B. Title of the article. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of regions in crisis conditions: Proceedings of the International conference. Moscow: Faculty of Geography of MSU, 2023. V. 29. Part 1. P. 110–120. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-110-120 (для цитирования на английском языке)

Адрес редакции:
Лаборатория комплексного картографирования географического факультета МГУ
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, комн. 2209, тел.: +7(495)939-23-54, *e-mail*: **intercarto@yandex.ru**
Интернет-сайт: **intercarto.msu.ru**

© Международная картографическая ассоциация, 2023
© Коллектив авторов, 2023

InterCarto. InterGIS

GI SUPPORT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF REGIONS IN CRISIS CONDITIONS

Proceedings of the International conference

Ulan-Ude (Republic of Buryatia, Russia)
September 12–14
Ulaanbaatar (Mongolia)
September 16–18, 2023

Volume 29
Part 1

http://intercarto.msu.ru

ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
МГУ имени М.В. Ломоносова
Moscow, 2023

ISSN 2414-9179 (Print)
ISSN 2414-9209 (Online)

Organized by:
International Cartographic Association (ICA)
International Eurasian Academy of Sciences
M.V. Lomonosov Moscow State University (MSU)
Department of Earth Sciences of the Russian Academy of Sciences (RAS)
"Kartfond" Research Center
Baikal Institute of Nature Management of SB RAS
Buryat State University
Mongolian National University

InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of regions in crisis conditions: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2023. V. 29. Part 1. 694 p.

The Proceedings include papers presented at the "InterCarto. InterGIS 29" International conference. The articles are reviewed theoretical and methodological aspects of geoinformation and cartographic support of ecological, economic and social aspects of sustainable development, geoinformatics, cartography, creation of the atlases, remote sensing of the Earth. Aspects of cartographic and geoinformation providing of issues of public health, agriculture and land use, tourism, natural and cultural heritage, historical geography and geographical education also are considered. Special attention is paid to the issues of geoinformation support for the sustainable development of regions in a crisis. The Proceedings have been published once per year since 1994.

Editor-in-Chief: **V. Tikunov** (MSU)
Executive Editors: **M. Gribok** (MSU), **O. Markova** (MSU)
Editorial Board: **O. Arkhipova** (Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences (RAS), Rostov-on-Don), **P. Baklanov** (Pacific Institute of Geography RAS, Vladivostok), **A. Batuev** (Institute of Geography SB RAS, Irkutsk), **V. Belozyorov** (North-Caucasus Federal University, Stavropol), **S. Bobylyov** (MSU), **A. Chumachenko** (Saratov State University), **N. Filatov** (Institute of Water Problems of the North of RAS, Petrozavodsk), **M.I. Freitas** (UNESP São Paulo State University, Brazil), **G. Gienko** (University of Alaska, USA), **N. Gojko** (University of Montenegro), **S. Gorin** (St. Cyril and St. Methodius University, Macedonia), **M. Govorov** (Malaspina University College, Canada), **R. Houssa** (Morocco), **N. Karanikolas** (Aristotle University of Thessaloniki, Greece), **T. Kolchugina** (Sustainable Development Technology Corporation, USA), **A. Koshkarev** (Institute of Geography of RAS, Moscow), **H. Kremers** (ICA, Germany), **A. Kurban** (Xinjiang Institute of Ecology and Geography, China), **H. Lin** (Chinese University of Hong Kong), **D. Lisitsky** (Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk), **I. Lourie** (MSU), **Ph. De Maeyer** (Ghent University, Belgium), **G. Nyamdavaa (**Ministry of Environment, Green Development and Tourism, Mongolia), **M. Nyrtsov** (MSU), **F. Ormeling** (Utrecht University, Netherlands), **E. Panidi** (St. Peterburg State University), **A. Panin** (MSU), **A. Pogorelov** (Kuban State University, Krasnodar), **S. Pyankov** (Perm State University), **I. Rotanova** (Altai State University, Barnaul), **N. Shchitova** (North Caucasus Federal University, Stavropol), **I. Streletskaya** (MSU), **N. Ulugtekin** (Istanbul Technical University, Turkey), **T. Varshanina** (Adygea State University), **C. Weihong** (National Engineering Research Center for Geomatics of China)

Citation example:
Ivanov A.B., Petrov A.B. Title of the article. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of regions in crisis conditions: Proceedings of the International conference. Moscow: Faculty of Geography of MSU, 2023. V. 29. Part 1. P. 110–120. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-110-120.

Editorial Office:
Integrated Mapping Laboratory, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University
119991, Russia, Moscow, Leninskie Gory, 1, of. 2209; tel.: +7(495)939-23-54; *e-mail:* **intercarto@yandex.ru**
Website: **intercarto.msu.ru**

©International Cartographic Association, 2023
© Authors, 2023

Геоинформационное и картографическое обеспечение экологических, экономических и социальных аспектов устойчивого развития территорий

GIS and cartographic support of ecological, economic and social aspects of sustainable development of territories

УДК: 912.4 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-5-19**

О.Ю. Черешня[1]

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ИНДИКАТОРЫ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ В РОССИИ И СТРАНАХ ЕВРОПЫ

АННОТАЦИЯ

Несмотря на значительное социально-экономическое влияние, количественная оценка цифровой экономики сталкивается с рядом препятствий. Пространственные аспекты цифровой экономики и связь между диджитализацией и благосостоянием требуют дополнительного изучения для полного понимания социально-экономического влияния на региональное и местное развитие. Целью данной работы является исследование географии цифровой экономики с использованием репрезентативного подхода к измерениям и его использование для анализа. В свете этого автор исследования ставит задачу подобрать социально-экономические индикаторы для оценки развития цифровой экономики в регионах России и странах Европы, используя перекрывающийся набор исходных показателей. Исследование определило критерии для подбора показателей, характеризующих географическое распределение цифровой экономической деятельности. Выбраны следующие показатели: цифровизация бизнеса в регионах, наличие высокоскоростного Интернета и мобильных сетей, уровень активности электронной коммерции, компьютерных навыков населения и число занятых в цифровом секторе экономики. Также выявлены проблемы с отсутствием некоторых важных показателей для оценки цифровой экономики на региональном уровне РФ. На основе собранной базы данных создана серия картограмм, позволяющих оценить пространственное развитие цифровой экономики в России и Европе. Результаты показывают значительные различия в развитии цифровой экономики в России и Европе, а также некоторые ограничения в методологии оценки, такие как доступность данных и различия в сборе статистических данных на региональном и страновом уровнях. Однако исследование подчеркивает

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail:* **chereshnia.o@geogr.msu.ru**

важность разработки новых подходов для оценки развития цифровой экономики на субнациональном и международном уровне.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровая экономика, цифровое неравенство, регионы России, страны Европы

Olga Yu. Chereshnia[1]

SPATIAL INDICATORS OF DIGITAL ECONOMY IN RUSSIA AND EUROPE

ABSTRACT

Despite its significant socioeconomic impact, quantitative evaluation of the digital economy faces several obstacles. Spatial aspects of the digital economy and the relationship between digitization and well-being require further study for a full understanding of the socioeconomic impact on regional and local development. In light of this, the authors of the study aim to select socioeconomic indicators for assessing the development of the digital economy in regions of Russia and European countries, using an overlapping set of initial indicators. The study identified criteria for selecting indicators that characterize the geographic distribution of digital economic activity. Selected indicators include concentration of digital business and startups in specific regions, availability of high-speed internet and mobile networks, level of e-commerce activity, population computer skills, and business digitalization. The study also identified issues with the lack of some important indicators for assessing the digital economy at the regional level in Russia. Based on the collected database, a series of maps were created to assess the spatial development of the digital economy in Russia and Europe. Results show significant differences in the development of the digital economy in Russia and Europe, as well as some limitations in the evaluation methodology, such as data availability and differences in the collection of statistical data at regional and national levels. However, the study emphasizes the importance of developing new approaches for assessing the development of the digital economy at the subnational and international levels.

KEYWORDS: digital economy, digital inequality, regions of Russia, countries of Europe

ВВЕДЕНИЕ

Цифровая экономика относится к экономической деятельности, которая является результатом миллиардов повседневных онлайн операций между людьми, предприятиями, устройствами, данными и процессами. Сюда входят электронная коммерция, онлайн-рынки, платформы социальных сетей, экономика совместного использования, а также различные отрасли и предприятия, возникшие в результате широкого использования Интернета и мобильных технологий. Сам термин «цифровая экономика» впервые был предложен в 1995 г. информатиком Николасом Негропонте [*Negroponte*, 1995]. Изначально речь шла только о коммерческой деятельности в Интернете, но в последние годы степень цифровизации экономической деятельности постоянно увеличивается. При этом в науке до сих пор не сложилось единого понятия цифровой экономики. Вот несколько примеров определений этого понятия: агентство «Делойт» — «форма экономической активности, которая возникает благодаря миллиарду примеров сетевого взаимодействия людей,

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **chereshnia.o@geogr.msu.ru**

предприятий, устройств, данных и процессов»[1]; Европейская комиссия — «экономика, зависимая от цифровых технологий»[2]. В принятой Стратегии развития цифровой экономики в РФ под ней принято понимать хозяйственную деятельность, ключевым фактором производства в которой являются данные в цифровой форме, что способствует формированию информационного пространства с учетом потребностей граждан и общества в получении качественных и достоверных сведений, развитию информационной инфраструктуры.

Мы будем опираться на определение Мирового банка: «Цифровая экономика — это система экономических, социальных и культурных отношений, основанных на использовании цифровых информационно-коммуникационных технологий»[3].

При количественной оценке цифровой экономики возникает несколько препятствий:

- Проблема разнообразных и не совпадающих друг с другом определения цифровой экономики. Само по себе это не делает измерение цифровой экономики невозможным, однако затрудняет сравнительный анализ.
- Проблема качества данных: в настоящий момент, особенно в развивающихся странах, существует фундаментальная проблема с собираемыми данными — они либо отсутствуют, либо недостоверны, либо невозможно отделить цифровой сектор от традиционного. Это только усугубляется дальнейшим развитием инноваций — сбор данных всегда остается позади технического прогресса.
- Проблема падения стоимости: закон Мура и подобные ему явления означают постоянное падение стоимости вычислительных мощностей, памяти и т. п. Нечто подобное происходит и с информационными услугами. Имеет значение и возникновение бесплатной продукции (такой как «Википедия»), которая, тем не менее, создает добавленную стоимость[4]. Чтобы учитывать это, необходимы соответствующие корректировки при подсчете ВВП [*Moulton*, 2000];
- Проблема виртуальности: многие типы цифровой экономической деятельности не сразу создают готовый продукт. Некоторые услуги такого типа могут иметь промежуточный характер на уровне «b to b» («бизнес — бизнесу»), и здесь могут возникать трудности с подсчетом добавленной стоимости; кроме того, цифровые услуги бывает непросто отследить, особенно если имеет место трансграничная электронная торговля или цифровой феномен «потребитель как производитель» («consumer-as-producer»)[5,6].
- Концептуальные проблемы использования показателя валового внутреннего продукта.

---

1 Deloitte 2019. What is Digital Economy? Электронный ресурс: https://www2.deloitte. com/mt/en/pages/technolo gy/articles/mt-what-is-digital-economy.html (дата обращения 13.02.2023)

2 European Commission 2014. Expert Group on Taxation of the Digital Economy. Электронный ресурс: https://taxation-customs.ec.europa.eu/expert-group-taxation-digital-economy_en (дата обращения 13.02.2023)

3 World Bank. 2016. Digital Dividends. Электронный ресурс: https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/han dle/10986/23347/210671RuSum.pdf (дата обращения 13.02.2023)

4 House of Commons. 2016. The Digital Economy. London: House of Commons Business, Innovation and Skills Committee. Электронный ресурс: https://www.publications. parliament.uk/pa/cm201617/cmselect/cmbis/87/87.pdf (дата обращения 13.02.2023)

5 World Economic Forum. 2015. Expanding Participation and Boosting Growth: The Infrastructure Needs of the Digital Economy. Geneva: World Economic Forum. Электронный ресурс: www3.weforum.org/docs/WEFUSA_Di gitalInfrastructure_Report2015.pdf (дата обращения 13.02.2023)

6 OECD. 2016. State-Owned Enterprises as Global Competitors: A Challenge or an Opportunity? Paris: OECD Publishing. Электронный ресурс: www.oecd.org/corporate/state-owned-enterprises-as-global-competitors9789264 262096-en.htm (дата обращения 13.02.2023)

Некоторые исследователи заявляют, что данные препятствия делают измерение цифровой экономики с применением методов традиционного экономического анализа «не только непонятным, но и непознаваемым»[1]. В настоящий момент из-за неразрешенных трудностей размер цифровой экономики значительно недооценен и существующие оценки сильно разнятся.

Кроме общеэкономических исследований цифровой экономики, существует необходимость географических исследований этого явления, т. к., несомненно, цифровой экономике присущ пространственный аспект. Однако, когда речь заходит о географической проблеме этой трансформации, наблюдается недостаток исследований, особенно на уровне регионов России. При этом значение географии не уменьшилось. Напротив, «поскольку пространственные барьеры уменьшаются, мы становимся намного более чувствительными к тому, что содержат мировые пространства» [*Harvey*, 1999, p. 106–107]. Роль географических факторов очевидна: ИТ-компании тяготеют к промышленным и исследовательским экосистемам крупных городов, где сосредоточены поставщики услуг и легко набирать инженеров и ученых. Из-за недостатка географических исследований по-прежнему сложно в полной мере оценить социально-экономическое влияние ИКТ (информационно-коммуникационных технологий) на региональное и местное развитие и предсказать возможные эффекты. Связь между цифровой трансформацией экономики и благосостоянием еще предстоит измерить (а также относительные показатели развития инновационных центров, эволюцию цифровой экономики в странах с использованием репрезентативной выборки).

Исследования с международными сопоставлениями начались десятилетия назад, одновременно с усилиями по измерению цифрового неравенства [*Corrocher*, *Ordanini*, 2002; *Selwyn*, 2004] внутри стран и между ними. Вебер и соавторы [*Weber* et al., 2011] отметили, что инновации из Европы с трудом распространяются в США и в азиатских странах. Также [*Dutta* et al., 2015] измерили и сравнили факторы, связанные с ИКТ, и рассчитали «готовность сети» к цифровой трансформации, а также результаты экономической деятельности, такие как количество патентов, связанных с ИКТ, в странах. Авторы [*Desruelle*, *Stançík*, 2014] сравнили «добавленную стоимость» и «расходы на бизнес в сфере НИОКР (BERD)», а также приоритетные патенты в области ИКТ между ЕС, США, Японией, Китаем, Кореей и Тайванем и определили ведущую позицию США в отрасли. ОЭСР рассмотрела эту проблему и сопутствующие вопросы политики. Организация публикует широкий спектр отчетов, в т. ч. «Digital Economy Papers», а также «Digital Economy Outlooks». ОЭСР[2] также выпустила свой набор показателей для сравнения стран в своем докладе «Measuring the digital economy». Эти показатели в основном касаются инфраструктуры и инвестиций в информационные и коммуникационные технологии. Тем не менее, ОЭСР определила несколько областей, в которых необходимо провести дальнейшие исследования, отметила, что следует улучшить измерение инвестиций в ИКТ и их связь с макроэкономическими показателями.

---

1 Sheehy, A. 2016. GDP Cannot Explain the Digital Economy. Forbes, June 6. Электронный ресурс: https://www.f orbes.com/sites/andrewsheehy/2016/06/06/gdp-cannot-explain-the-digital-economy (дата обращения 13.02.2023)

2 OECD. 2014. Measuring the Digital Economy: A New Perspective. Paris: OECD Publishing. Электронный ресурс: www.oecd.org/sti/measuring-the-digital-economy-9789264221796-en.htm (дата обращения: 13.02.2023)

Для международных сравнений Европейской комиссией в 2016 г. разработан Индекс цифровой экономики и общества I-DESI[1]. Индекс позволяет сравнивать развитие цифровой экономики в России и в странах Европейского союза, а также в Исландии, Японии, США и других странах. Индекс I-DESI рассчитан для 28 стран — членов ЕЭС и для 15 стран, не входящих в ЕЭС по 18 ключевым индикаторам, значимым и статистически обеспеченным в большинстве стран мира.

«Институт McKinsey»[2] ранжирует отрасли в соответствии с индексом диджитализации на основе доли расходов на ИТ в операционных расходах, веса ИТ в активах фирм и доли компьютеризированных задач. Финансы, средства массовой информации и передовое производство считаются высокоцифровыми. Умеренно оцифрованные сектора экономики — розничная торговля, транспорт и гостиничный бизнес, хотя они и включают в себя цифровых лидеров, таких как «Amazon», «Uber» и «Airbnb» [*Jensen*, 2007].

В России ощущается недостаток исследований в сфере географии цифровой экономики. Работы в этой области ведутся в «Высшей школе экономики» ИСИЭЗ НИУ ВШЭ, они публикуют статистические сборники в партнерстве с Минкомсвязью России и Росстатом. В изданиях представлены основные показатели развития цифровой экономики в России, позиции страны в международных рейтингах, а также описаны некоторые технологические тренды, определяющие тенденции развития информационного общества. Это бюллетени «Вклад цифровизации в рост российской экономики», «Информационная индустрия в России», «Кадры для цифровой экономики» и др.

Несмотря на исследования, упомянутые в параграфах выше, географические аспекты цифровой экономики, связь между диджитализацией и благосостоянием еще предстоит измерить. Из-за недостатка географических исследований по-прежнему сложно в полной мере оценить социально-экономическое влияние ИКТ на региональное и местное развитие и предсказать возможные эффекты.

Одним из явных пробелов в существующих исследованиях является недостаток методик, позволяющих провести анализ как на международном, так и на региональном уровне. В работе А. Сидорова и П. Шенченко [*Sidorov*, *Senchenko*, 2020] предлагается методика оценки с помощью индекса уровня цифровизации, включающем в себя оценку цифровой экономики, цифрового правительства и цифровых граждан по 13 показателям. Согласно их расчетам, Россия наряду с Болгарией находится в группе с уровнем ниже среднего. При этом отдельные регионы, например — Санкт-Петербург, показывают лучший результат, чем ряд европейских стран, таких как Франция и Великобритания, а Москва занимает еще более высокое место, опережая также Германию.

Следует отметить, что ни один из существующих методов оценки уровня цифровизации субнациональных образований не является универсально применимым в силу ряда обстоятельств. Среди них: различия в сборе статистических данных на региональном и страновом уровнях, дефицит региональных данных по цифровизации и цифровой экономике, низкий уровень адаптации международных подходов к существующей системе информационного обеспечения. Эти ограничения серьезно

---

1 European Commission. 2018. Digital Economy and Society Index (DESI) Электронный ресурс: https://eufordigital.eu/wp-content/uploads/2019/10/Digital-Economy-and-Society-Index-DESI-2018.pdf. (дата обращения 13.02.2023).

2 McKinsey Global Institute (MGI). 2015. Digital America: A Tale of the Haves and Have Mores. Электронный ресурс: https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/high%20tech/our%20insights/digital%20america%20a%20tale%20of%20the%20haves%20and%20have%20mores/mgi%20digital%20america_executive%20summary_december%202015.pdf (дата обращения 13.02.2023).

сказываются на качестве всех существующих региональных методик оценки. При этом такие сопоставления особенно актуальны для России, где регионы по своему масштабу, населению и разнообразию социально-экономических условий различаются не меньше, чем отдельные страны.

Исходя из вышеперечисленного, в данном исследовании автор поставил себе задачу подобрать социально-экономические индикаторы для оценки развития цифровой экономики в регионах России и странах Европы на перекрывающемся наборе исходных показателей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На первом этапе исследования были определены критерии подбора показателей. Пространственные показатели цифровой экономики должны характеризовать географическое распределение цифровой экономической деятельности, например:

- концентрацию цифрового бизнеса и стартапов в определенных регионах;
- наличие высокоскоростного Интернета и мобильных сетей;
- наличие научно-исследовательских центров и технологических хабов;
- распределение рабочих мест, связанных с ИКТ по разным регионам;
- степень цифровизации экономики в разных сферах;
- уровень активности электронной коммерции;
- количество активных Интернет-пользователей;
- степень владения цифровыми навыками и компетенциями у населения в разных областях;
- уровень государственной поддержки развития цифровой экономики и развития цифрового правительства в разных регионах.

После определения основных направлений был начат анализ и сопоставление источников доступных данных для анализа. Как и предполагалось, данных на региональном уровне было значительно меньше, чем на межстрановом, поэтому именно региональные данные выступили лимитирующим фактором для включения тех или иных показателей в оценку. Вторым лимитирующим фактором было отсутствие некоторых безусловно важных показателей для оценки, которые были на региональном уровне РФ, но отсутствовали в международной статистике ЕС. Например, показатель «доля электронного документооборота между органами государственной власти, в общем объеме межведомственного документооборота» в странах ЕС не собирается, и отсутствуют более-менее схожие аналоги. Третьим лимитирующим фактором выступило то, что некоторые показатели были похожи, но их методика показывала, что сопоставлять эти данные друг с другом некорректно, например: «доля организаций, использовавших средства защиты информации, передаваемой по глобальным сетям, в общем числе обследованных организаций» и показатель «businesses with formal policy to manage ICT risks». В итоге мы получили список показателей, который позволяет в достаточной мере оценить и сопоставить уровни развития цифровой экономики. Источниками данных для регионов России выступили сборники Индикаторы цифровой экономики, 2020[1], Информационное

[1] *Абдрахманова Г.И., Вишневский К.О., Гохберг Л.М.* и др. Индикаторы цифровой экономики, 2020: статистический сборник. Национальный исследовательский университет И60 «Высшая школа экономики». М.: НИУ ВШЭ, 2020. 360 с.

общество в Российской Федерации, 2020[1]; источники данных для стран Европы — Eurostat[2], OECD.Stat[3].

В итоге работы была подготовлена база данных с показателями (табл. 1), которые можно использовать для сопоставления регионов РФ и стран.

Табл. 1. Показатели базы данных для проведения оценки
Table 1. Indicators that have been selected to build the assessment

Фактор	Показатель для регионов России	Показатель для стран Европы
Уровень развития цифрового правительства	Доля населения, использовавшего сеть Интернет для получения государственных и муниципальных услуг, в общей численности населения	Internet use: interaction with public authorities, Percentage of individuals
Инфраструктура	Абоненты широкополосного доступа к Интернету в расчете на 100 чел. населения, ед. (фиксированного)	Percentage of individuals using an Internet (total fixed broadband Internet subscribers)
	Абоненты широкополосного доступа к Интернету в расчете на 100 чел. населения, ед. (мобильного)	Percentage of individuals using a mobile Internet
Уровень активности электронной коммерции	Доля населения, использовавшего сеть Интернет для заказа товаров и (или) услуг, в общей численности населения	Individuals who have purchased online — last 12 m (%)
	Население, использующее сеть Интернет для заказа популярных товаров и услуг, в субъектах Российской Федерации: (Росстат дает в % от общей численности населения, использующего сеть Интернет для заказа товаров и услуг; необходимо перевести в % от населения): одежда, обувь, спорттовары	Individuals who have purchased online clothing, footwear, sporting goods — last 12 m (%)
	Финансовые услуги (банковские услуги, денежные переводы, услуги страхования, операции с акциями и иными ценными бумагами и др.)	Individuals who have purchased online financial products — last 12 m (%)
	Предметы домашнего обихода (мебель, посуда, столовые приборы, постельное белье, предметы интерьера, игрушки и др.)	Individuals who have purchased online food, groceries…, cosmetics — last 12 m (%)
Цифровое неравенство	Навыки работы населения на персональном компьютере в субъектах Российской Федерации (в % от общей численности населения, использующего персональный компьютер): работа с текстовым редактором	Individuals who have created presentations or documents integrating text, pictures, tables or charts. % of individuals — необходимо перевести в % от общей численности населения, использующего персональный компьютер
	Передача файлов между компьютером и периферийными устройствами (цифровой камерой, плеером, мобильным телефоном)	Individuals who have copied or moved a file or folder, % of individuals

[1] Федеральная служба государственной статистики; Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». Информационное общество в Российской Федерации, 2020: статистический сборник. М.: НИУ ВШЭ, 2020.

[2] Eurostat. Eurostat metadata. EU. 2019. Электронный ресурс: https://ec.europa.eu/eurostat/data/database (accessed on 5 May 2019) (дата обращения 13.02.2023).

[3] OECD.Stat 2021. Электронный ресурс: https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=ICT_HH2# (дата обращения 13.02.2023).

Фактор	Показатель для регионов России	Показатель для стран Европы
	Работа с электронными таблицами	Individuals who used spreadsheet software, % of individuals
Цифровизация бизнеса	Удельный вес организаций, использующих цифровые технологии, в общем числе организаций (%): широкополосный Интернет	Businesses with a broadband connection — includes both fixed and mobile (%): enterprises with broadband access
	Облачные сервисы	% of enterprises purchasing cloud computing services used over the Internet
	Технологии автоматической идентификации объектов (RFID)	Enterprises using radio frequency identification (RFID) instrument
	ERP-системы	Businesses using ERP (Enterprise Resource Planning) software (%)
	Электронные продажи	Enterprises having received orders online (at least 1 %) — % of enterprises
	Организации, имеющие веб-сайт (% от общего числа организаций)	Enterprises with a website, % of enterprises
Концентрация цифрового бизнеса	Доля занятых в ИКТ в общей численности занятого населения	% of the ICT personnel in total employment

Далее на основе собранной базы данных была создана серия картограмм, позволяющих оценить пространственное развитие цифровой экономики в России и Европе. Для факторов, включающих много показателей, были рассчитаны агрегированные показатели по формуле (1) [*Тикунов*, 1997]:

$$\hat{X}_{ij} = \frac{\left| x_{ij} - \overset{o}{x}_j \right|}{\left| \max/\min x_j - \overset{o}{x}_j \right|}, \quad \begin{matrix} i=1, 2, 3, \ldots, n; \\ j=1, 2, 3, \ldots, m \end{matrix} \qquad (1),$$

где $\overset{0}{x}$ — наихудшие значение (по каждому показателю) из всех встречающихся;

$_{max/min}x$ — наиболее отличающиеся от $\overset{0}{x}$значения показателей;

n — количество исследуемых территориальных единиц;

m — число показателей, использованных для расчетов.

Целью данной нормировки является перевод показателя в отклонение от заданного наилучшего или наихудшего значения. Полученные в результате нормировки ограничены отрезком [0, 1]. Полученные нормированные показатели были агрегированы как простое среднее.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основываясь на собранной базе данных, была создана серия картограмм для оценки пространственного развития цифровой экономики в России и Европе. Для наглядности сопоставления была использована единая шкала для Европы и России. По большинству показателей Россия находится на среднем уровне или ниже среднего. Давайте рассмотрим каждый показатель подробно.

Доля населения, использующего Интернет для получения государственных услуг (рис. 1), является показателем, который одновременно свидетельствует об интересе

государства к цифровой трансформации и готовности людей к таким услугам. С точки зрения доли населения, использующего Интернет для доступа к государственным услугам, Россия находится на среднем уровне для европейских стран — 56,5 %, между Испанией (58 %) и Литвой (55 %). В то же время регионы России значительно различаются. Ямало-Ненецкий автономный округ находится наравне с ведущими странами — 88,9 %, как Исландия (89 %, второе место в Европе) и Финляндия (87 %, третье место). Московская область, Республика Башкортостан, Москва и Саратовская область отстают от Швеции (86 %, пятое место в Европе), но опережают Нидерланды (81 %, шестое место). Аутсайдерами являются Румыния (12 %), Магаданская область (15 %), Босния и Герцеговина (18 %) и Еврейская автономная область (20,2 %).

Уровень развития широкополосного доступа в России (рис. 2) в среднем ниже, чем в странах Западной Европы — 0,53 балла, что сопоставимо с уровнем Хорватии (0,54). Логично, что Москва (0,78) находится высоко, на одном уровне со Швецией (0,78) и Исландией (0,76). Показатели инфраструктуры часто выше в городах. Новосибирская область (0,70) и Санкт-Петербург (0,69) находятся на высоком уровне, наравне с Германией (0,71), Латвией (0,69) и Бельгией (0,69). Наименьший уровень развития инфраструктуры широкополосного доступа наблюдается в национальных республиках, особенно на Северном Кавказе, в Республиках Ингушетия (0,16), Дагестан (0,20) и Тува (0,22). Это в значительной степени связано с труднодоступностью многих населенных пунктов, общим уровнем инфраструктуры и уровнем доходов населения. Отдельно стоит отметить Республику Крым и Севастополь, где, согласно официальным данным, показатели очень низкие. Однако они не отражают реальной картины, т. к. в 2019 г. из-за санкций многие услуги, особенно мобильную связь — жители получали обходными путями; например — мобильные операторы, зарегистрированные на материке, организовали «бесплатный роуминг».

Рис. 1. Доля населения, использующего Интернет для доступа к государственным услугам
Fig. 1. The share of the population using the Internet to access government services

Показатель активности электронной коммерции (рис. 3) отражает как уровень развития этих услуг, так и готовность населения потреблять их в такой форме: для этого должны быть доступ, навыки и финансовая возможность. Европейские страны значительно различаются между собой по уровню активности потребления товаров и услуг онлайн, и Россия находится на уровне между Португалией (0,27) и Грецией (0,24).

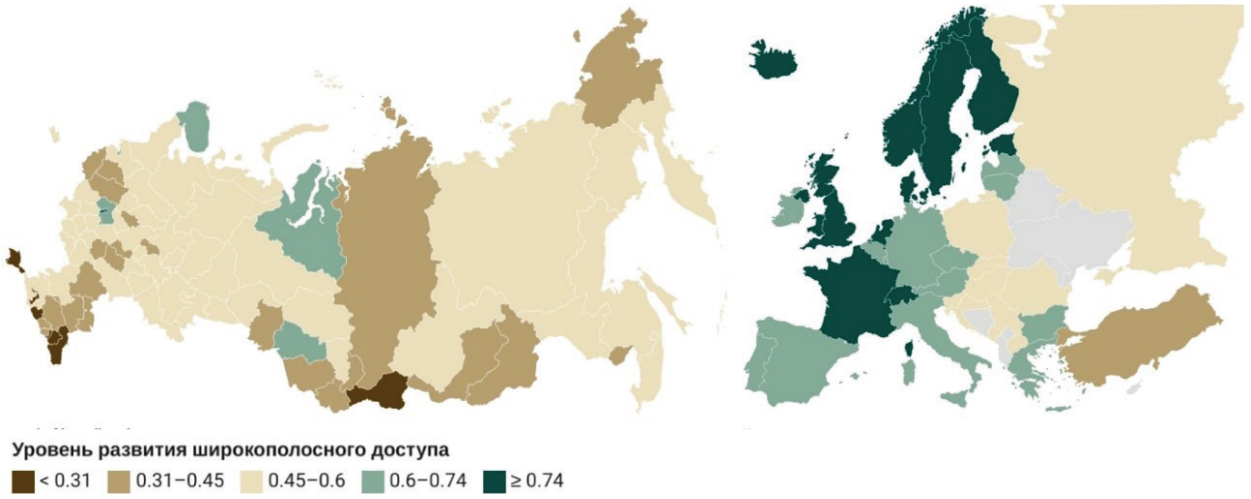


Рис. 2. Уровень доступа к широкополосному Интернету
Fig. 2. The level of broadband access

В пределах России регионы разбросаны не менее, чем европейские страны. Ямало-Ненецкий и Чукотский автономные округа находятся на одном уровне активности с Данией (0,72). Мурманская область (0,54) и Ненецкий автономный округ (0,54) немного опережают Францию (0,50). Москва делят строчку рейтинга с Люксембургом (0,49). Наименьшая активность населения в онлайн-потреблении наблюдается в республиках Северная Осетия-Алания (0,01), Калмыкия (0,02), Дагестан (0,03) и Адыгея (0,03). Среди рассмотренных европейских стран худший показатель активности — в Черногории (0,03) и Северной Македонии (0,9).

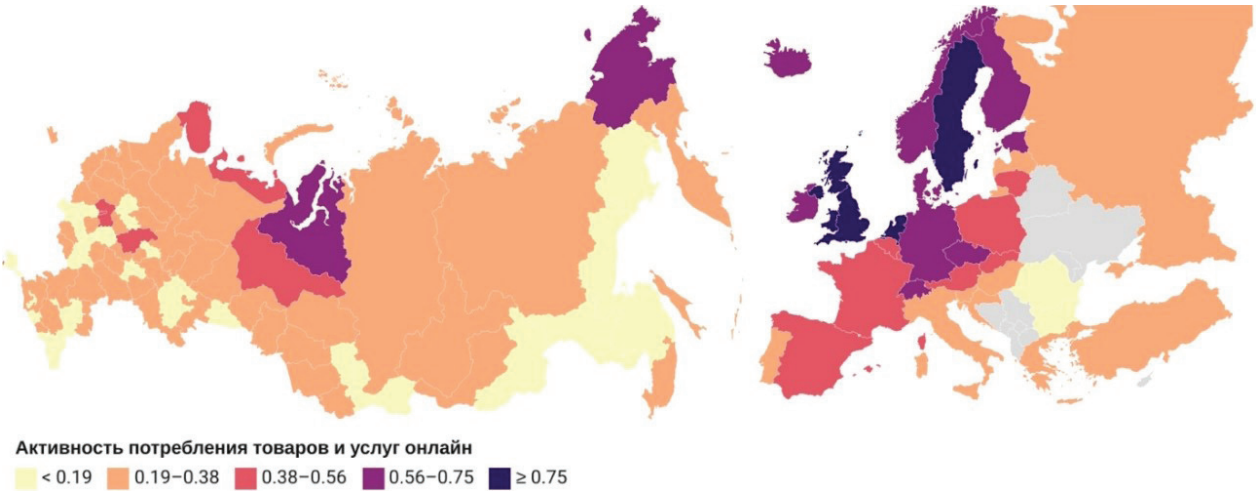


Рис. 3. Уровень активности электронной коммерции
Fig. 3. The level of online goods and services consumption

Согласно нашей оценке компьютерных навыков населения (рис. 4), Чукотский автономный округ обладает самым высоким уровнем компьютерной грамотности среди всех регионов с показателем 0,705, что значительно выше, чем у Великобритании (0,678). За округом следуют Москва (0,704) и Тюменская область (0,619). С другой стороны, Чеченская Республика имеет самый низкий показатель среди всех включенных регионов и стран — 0,132. Другие регионы с относительно низкими показателями включают

Республику Крым (0,132), Новгородскую область (0,260) и Республику Дагестан (0,268). Среди рассмотренных стран наивысший показатель у Исландии (0,848), за которой следуют Швейцария с показателем 0,776, Норвегия (0,761) и Нидерланды (0,753). Северная Македония имеет самый низкий показатель (0,232), который сопоставим с Новгородской областью (0,260). У Болгарии (0,251) и Румынии (0,361) уровни компьютерной грамотности немного выше.

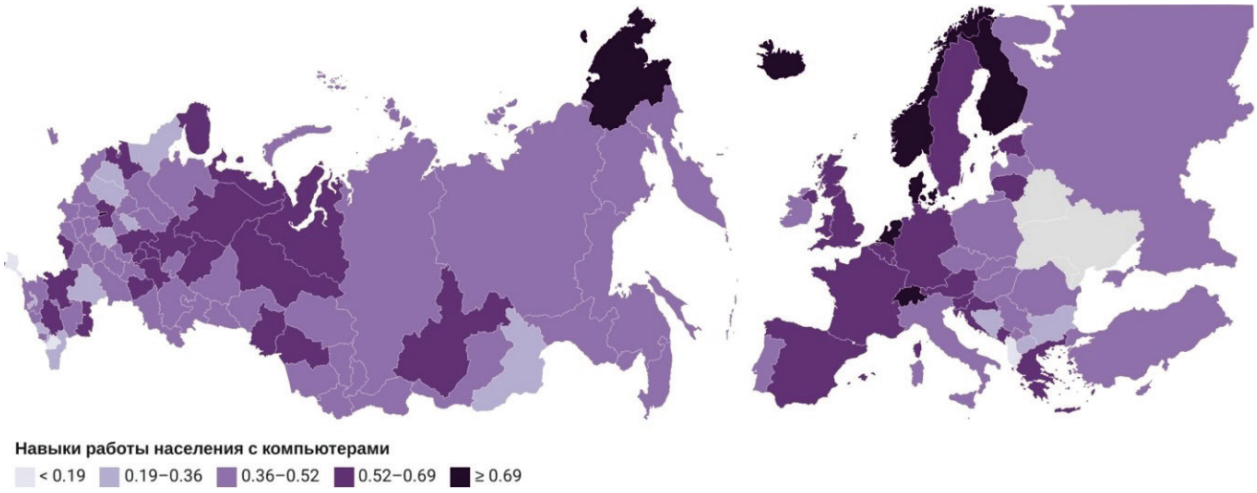


Рис. 4. Уровень компьютерных навыков населения
Fig. 4. The level of computer skills of the population

Уровень цифровизации бизнеса (рис. 5) относится к степени, в которой бизнес или организация интегрировали цифровые технологии и процессы в свою деятельность и общую стратегию. Это включает использование цифровых инструментов и платформ для улучшения коммуникации, автоматизации задач, анализа данных и повышения общей эффективности и производительности. Высокий уровень цифровизации может указывать на то, что бизнес более конкурентоспособен, адаптивен и отзывчив на изменяющиеся условия рынка, в то время как низкий уровень цифровизации может оставить бизнес в невыгодном положении в быстро меняющемся цифровом ландшафте сегодня. Уровень цифровизации бизнеса в России низкий — 0,354, что ниже большинства европейских стран, кроме Греции (0,319), Румынии и Северной Македонии (0,278). Даже Москва (0,500), которая находится на уровне ведущих стран по прочим показателям, ниже Португалии (0,503). Другие регионы с лучшими показателями в России — Санкт-Петербург (0,469) и Республика Татарстан (0,458). Самый низкий уровень цифровизации бизнеса в Республиках Дагестан (0,027), Северная Осетия - Алания (0,142) и Тува (0,193). Румыния имеет худшие показатели среди европейских стран (0,277).

Доля занятых в ИКТ (рис. 6) в общей занятости является очень информативным показателем, который коррелирует с концентрацией цифровой экономической активности и уровнем развития сектора. Доля занятых в ИКТ в России в среднем составляет 1,7 %, что соответствует уровню Греции (1,54 %) и Черногории (2 %). Доля занятых в ИКТ является важным показателем уровня развития цифровой экономики в регионах. Чем выше процент, тем более продвинутой и благополучной является территория с технологической точки зрения.

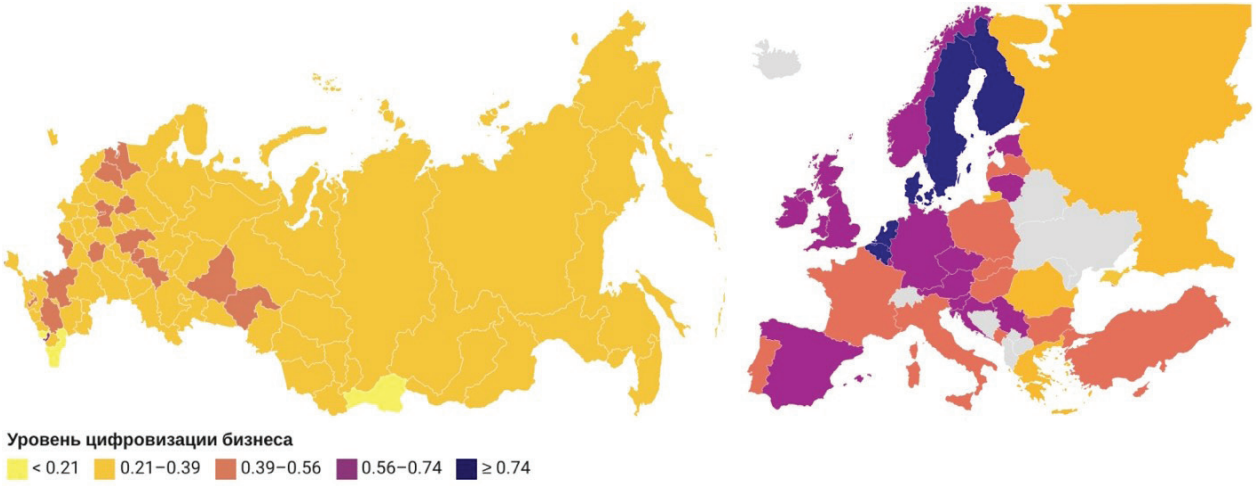


Рис. 5. Уровень цифровизации бизнеса
Fig. 5. The level of business digitalization

В региональном разрезе мы наблюдаем широкий диапазон показателей: Москва на уровне Норвегии — 3,18 %, Орловская область и Санкт-Петербург на уровне Болгарии — 3 % занятых в экономике, Новосибирская область на уровне Польши — 2,7 %. Большинство регионов приближаются к Турции по данному показателю (1 % занятых). Наименьшее число людей работает в ИКТ-секторе в Кировской области (0,47 %), Амурской области (0,49 %) и Республике Ингушетия (0,56 %). Как и в последние годы, из-за динамичного развития в отрасли наблюдается дефицит кадров, крупные города активно привлекают к себе квалифицированный персонал. Большинство регионов, даже имея хорошую ресурсную базу в виде специализированных вузов, не могут конкурировать по уровню зарплат в отрасли с Москвой.

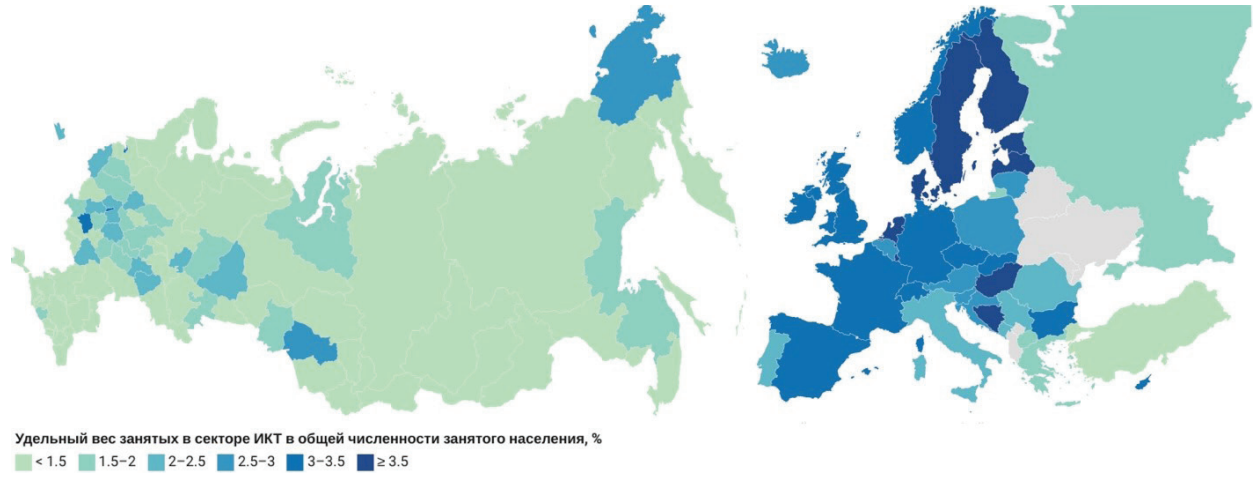


Рис. 6. Доля занятых в ИКТ
Fig. 6. The share of employed in ICT

ВЫВОДЫ

Результаты данного исследования дают важные представления о текущем состоянии развития цифровой экономики на национальном и субнациональном уровнях в России и Европе. Результаты показывают, что существуют значительные различия в развитии цифровой экономики в самой России, причем некоторые регионы значительно отстают от других. Кроме того, исследование показывает, что страны с наиболее развитой цифровой экономикой — это те, которые инвестировали в цифровую инфраструктуру и приняли прогрессивный и инновационный подход к технологиям и цифровизации в ключевых сферах.

Можно обозначить основные ограничения такого подхода к оценке. Одним из основных ограничений является доступность данных. Зачастую существует дефицит региональных данных о цифровизации и цифровой экономике, а также низкий уровень адаптации международных подходов на региональном уровне. Это может существенно повлиять на качество всех существующих методов региональной оценки. Также существуют различия в сборе статистических данных на региональном и страновом уровнях, что может затруднить сравнение между странами.

Во-вторых, некоторые важные показатели для оценки развития цифровой экономики недоступны на региональном уровне или наоборот. Например, показатель «Доля электронного документооборота между государственными органами» не собирается в странах ЕС, и нет разумно сопоставимых аналогов. Кроме того, некоторые показатели не могут быть напрямую сопоставлены из-за различий в методологии.

Еще одно важное ограничение — такой подход может не учитывать все значимые аспекты развития цифровой экономики. Например, метод сосредоточен на пространственных показателях и может не улавливать другие важные аспекты, такие как влияние цифровизации на производительность, инновации и экономический рост.

Ограничения существующих методов региональной оценки подчеркивают важность разработки новых подходов для оценки развития цифровой экономики на субнациональном и международном уровне. Они необходимы для процесса принятия политических и инвестиционных решений, а также способствуют экономическому росту и развитию в различных регионах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РНФ, грант № 21-77-00024.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Science Foundation, grant No. 21-77-00024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Тикунов В.С. Классификации в географии: ренессанс или увядание? (Опыт формальных классификаций). Смоленск: Издательство СГУ, 1997. 367 с.

Bergfeld M.-M.H., Weber F.-M. Dynasties of innovation: Highly performing German family firms and the owners' role for innovation. International Journal of Entrepreneurship and Innovation Management, 2011. V. 13. P. 80–94. DOI: 10.1504/IJEIM.2011.038449.

Corrocher N., Ordanini A. Measuring the digital divide: A framework for the analysis of cross-country differences. Journal of Information Technology, 2002. V. 17. No. 1. P. 9–19.

Desruelle P., Juraj S. Characterizing and comparing the evolution of the major global economies in information and communication technologies. Telecommunications Policy, 2014. V. 38. P. 1065–1079. DOI: 10.1016/j.telpol.2014.04.010.

Dutta S., Reynoso R.E., Litner J., Lanvin B., Guadagno F., WunschVincent S. The Global innovation index 2017: Innovation feeding the World (Chapter 1). Global Innovation Index. Cornell, INSEAD, WIPO, 2017.

Harvey D. Time-space compression and the postmodern condition. Abingdon, UK, Routledge: Modernity: Critical Concepts, 1999. V. 4. P. 98–118.

Jensen R.T. The digital provide: Information (technology), market performance and welfare in the South Indian fisheries sector. Quarterly Journal of Economics, 2007. V. 122. P. 879–924. DOI: 10.1162/qjec.122.3.879.

Moulton B.R. GDP and the digital economy. Cambridge, MA, MIT Press: Understanding the Digital Economy, 2000. P. 34–48.

Negroponte N. Being digital. New York: Alfred A. Knopf, 1995.

Selwyn N. Reconsidering political and popular understandings of the digital divide. New Media & Society, 2004. V. 6. No. 3. P. 341–362. DOI: 10.1177/1461444804042519.

Sidorov A., Senchenko P. Regional digital economy: Assessment of development levels. Mathematics, 2020. V. 8. No. 12:2143. DOI: 10.3390/math8122143.

REFERENCES

Bergfeld M.-M.H., Weber F.-M. Dynasties of innovation: Highly performing German family firms and the owners' role for innovation. International Journal of Entrepreneurship and Innovation Management, 2011. V. 13. P. 80–94. DOI: 10.1504/IJEIM.2011.038449.

Corrocher N., Ordanini A. Measuring the digital divide: A framework for the analysis of cross-country differences. Journal of Information Technology, 2002. V. 17. No. 1. P. 9–19.

Desruelle P., Juraj S. Characterizing and comparing the evolution of the major global economies in information and communication technologies. Telecommunications Policy, 2014. V. 38. P. 1065–1079. DOI: 10.1016/j.telpol.2014.04.010.

Dutta S., Reynoso R.E., Litner J., Lanvin B., Guadagno F., WunschVincent S. The Global innovation index 2017: Innovation feeding the World (Chapter 1). Global Innovation Index. Cornell, INSEAD, WIPO, 2017.

Harvey D. Time-space compression and the postmodern condition. Abingdon, UK, Routledge: Modernity: Critical Concepts, 1999. V. 4. P. 98–118.

Jensen R.T. The digital provide: Information (technology), market performance and welfare in the South Indian fisheries sector. Quarterly Journal of Economics, 2007. V. 122. P. 879–924. DOI: 10.1162/qjec.122.3.879.

Moulton B.R. GDP and the digital economy. Cambridge, MA, MIT Press: Understanding the Digital Economy, 2000. P. 34–48.

Negroponte N. Being digital. New York: Alfred A. Knopf, 1995.

Selwyn N. Reconsidering political and popular understandings of the digital divide. New Media & Society, 2004. V. 6. No. 3. P. 341–362. DOI: 10.1177/1461444804042519.

Sidorov A., Senchenko P. Regional digital economy: Assessment of development levels. Mathematics, 2020. V. 8. No. 12:2143. DOI: 10.3390/math8122143.

Tikunov V.S. Classifications in geography: Renaissance or withering? (The experience of formal classifications). Smolensk: Publishing House of Smolensk State University, 1997. 367 p. (in Russian).

УДК: 911.2+574.9 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-20-33**

А.А. Высоцкая[1], **А.А. Медведков**[1,2]

ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ГЕОСИСТЕМ (НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ ЕНИСЕЙСКОГО СЕВЕРА)

АННОТАЦИЯ

Рассмотрен опыт использования открытых данных для создания тематических карт на территорию Енисейской Сибири по важнейшим компонентам экологической оценки ландшафтов. Оценка экологически значимых свойств ландшафтов, раскрывающих их средозащитную роль, является основой для обоснования охраны природы и этноэкосистем в условиях нарастающего антропогенного воздействия. В связи с этим обсуждаются возможности использования геопространственных данных для решения задач подобного типа в бореальной криолитозоне (на примере территории Енисейской Сибири). Для реализации этой цели, принимая во внимание доступность открытых данных, выбраны наиболее информативные показатели (сплошность и температура многолетней мерзлоты, чистая первичная продукция, поток скрытого тепла, однородность среды обитания растений и животных), характеризующие экологически значимые свойства ландшафта. Характеристики сплошности многолетней мерзлоты определяют не только инерционность состояния мерзлотных ландшафтов при внешних воздействиях, но и потенциал активности криогенных процессов, а температура мерзлых пород — характер отклика мерзлотных геосистем на климатические воздействия. Средозащитный потенциал ландшафтов оценивается с использованием совокупного учета показателей чистой первичной продукции и потока скрытого тепла. Биопродукционные характеристики позволяют сравнивать территории по степени их уязвимости к внешним воздействиям и способности к восстановлению. Рассчитанные значения потока скрытого тепла в значительной степени индицируют гомеостатическую функцию лесов. Однородность среды обитания растений и животных рассмотрена в качестве косвенного показателя разнообразия природно-ресурсных условий для традиционного природопользования. Картографирование геокриологических условий произведено с использованием векторных данных, представленных в информационной системе «Земельные ресурсы России». Для создания карт чистой первичной продукции и потоков скрытого тепла использовались обработанные данные спектрорадиометра MODIS. Картографирование однородности биогеоценотических условий произведено по результатам расчета статистических закономерностей в распределении улучшенного вегетационного индекса (EVI) из базы данных «Global Habitat Heterogeneity». Рассмотрены результаты сопоставления однородности биогеоценотических условий с геоморфологическими особенностями исследуемого региона. Показана противоречивость выводов, полученных исключительно на основе анализа геопространственных данных без привлечения результатов полевых исследований. Обсуждаются сложности использования геопространственных данных для

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail:* **an.vys@yandex.ru; a-medvedkov@bk.ru**

[2] Институт географии РАН, Старомонетный переулок, д. 29с4, Москва, Россия, 119017, *e-mail:* **a-medvedkov@bk.ru**

ландшафтно-экологического анализа территорий с ярусным строением рельефа (Среднесибирское плоскогорье, Енисейский кряж и др.).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экологические функции лесных ландшафтов, чистая первичная продукция, поток скрытого тепла, однородность местообитаний растений и животных, картографирование ландшафтов

Anna A. Vysotskaya[1], **Alexey A. Medvedkov**[1,2]

INFORMATION RESOURCES FOR ASSESSING THE ENVIRONMENTAL POTENTIAL OF GEOSYSTEMS (ON THE EXAMPLE OF THE TERRITORY OF THE YENISEI NORTH)

ABSTRACT

The experience of using open data to create thematic maps for the territory of the Yenisey Siberia on the most important components of the ecological assessment of landscapes is considered. An assessment of the ecologically significant properties of landscapes, revealing their environmental role, is the basis for substantiating the protection of nature and ethnoecosystems in the face of increasing anthropogenic impact. In this regard, the possibilities of using geospatial data for solving problems of this type in the boreal cryolithozone (on the example of the territory of the Yenisei Siberia) are discussed. To achieve this goal, taking into account the availability of open data, the most informative indicators (continuity and temperature of permafrost, net primary production, latent heat flux, uniformity of the habitat of plants and animals) characterizing the ecologically significant properties of the landscape were selected. The permafrost continuity characteristics determine not only the inertia of the state of permafrost landscapes under external influences, but also the potential for the activity of cryogenic processes. The temperature of frozen rocks diagnoses the nature of the response of permafrost geosystems to climatic influences. The environmental protection potential of landscapes is estimated using the combined accounting of net primary production and latent heat flux. Bioproduction characteristics make it possible to compare territories in terms of their vulnerability to external influences and their ability to recover. The calculated values of the latent heat flux largely indicate the homeostatic function of forests. The homogeneity of the habitat of plants and animals is considered as an indirect indicator of the diversity of natural resource conditions for traditional nature management. Mapping of geocryological conditions was made using vector data presented in the information system “Land Resources of Russia”. Processed data from the MODIS spectroradiometer were used to create maps of net primary production and latent heat fluxes. Mapping of the homogeneity of biogeocenotic conditions was made based on the results of calculating statistical patterns in the distribution of the improved vegetation index (EVI) from the Global Habitat Heterogeneity database. The results of comparing the homogeneity of biogeocenotic conditions with the geomorphological features of the region under study are considered. The inconsistency of the conclusions obtained solely on the basis of the analysis of geospatial data without involving the results of field studies is shown. The difficulties of using geospatial data for landscape-ecological analysis of territories with a layered relief structure (the Central Siberian Plateau, the Yenisei Ridge, etc.) are discussed.

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **an.vys@yandex.ru**, **a-medvedkov@bk.ru**

[2] Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 29s4, Staromonetny ln., Moscow, 119017, Russia, *e-mail:* **a-medvedkov@bk.ru**

KEYWORDS: ecological functions of forest landscapes, net primary production, latent heat flux, homogeneity of plant and animal habitats, landscape mapping

ВВЕДЕНИЕ

Экологический потенциал ландшафта — одно из центральных понятий современной геоэкологии, которое в своей основе опирается на существующие разработки комплексной физической географии и ландшафтоведения. Вместе с тем необходимо отметить, что, несмотря на произведенное обоснование сущности данного понятия [*Исаченко*, 2001], в теоретическом отношении оно все еще находится в стадии становления. А.Г. Исаченко [2001] показал, что экологически значимые свойства геосистем находится в зависимости от показателей тепло- и влагообеспеченности, которые использованы им для проведения сравнительной оценки экологического потенциала зональных ландшафтов России. Представляется, что на каждом иерархическом уровне (макрорегиональный, региональный, локальный) могут быть выделены свои критерии для оценки экологического потенциала ландшафтов.

По-видимому, экологический потенциал ландшафта следует рассматривать как концепцию, в рамках которой могут создаваться и совершенствоваться методики управления качеством окружающей среды, отличающиеся по своей направленности. Как справедливо отмечает И.Н. Владимиров [2019]: «подход к оценке экологического потенциала ландшафтов зависит от цели исследований». Это может быть как социально-экологический подход, ориентированный на оценку влияния окружающей среды на человека, его качество жизни и хозяйственную деятельность, так и природно-экологический, но в этом случае должны быть другие компоненты оценки, базирующиеся на свойствах геосистем. В данном случае, учитывая специфику рассматриваемой территории (Енисейский Север), которая является частью экологического каркаса Северной Евразии, и принимая во внимание ресурсно-промысловое значение таежных ландшафтов, мы будем ориентироваться на природно-экологический подход.

В условиях увеличения темпов потепления климата и интенсификации антропогенного воздействия в криолитозоне (в т. ч. в Сибирской Арктике, к которой относится Енисейский Север), необходима актуальная информация о важнейших экологических свойствах ландшафтов и их ранжировании, что должно быть положено в основу обеспечения охраны природы и экологической безопасности. Особую важность это могло бы иметь для территорий традиционного природопользования, поскольку позволило бы отстоять от горнопромышленного освоения наиболее продуктивные участки сибирской тайги, обосновав их значимость с позиции регулирующих (в т. ч. противопожарных) и обеспечивающих функций ландшафта.

Цель данной статьи — анализ возможностей использования наиболее информативных показателей, полученных с применением открытых данных для оценки (в т. ч. и картографирования) экологических свойств таежных ландшафтов, которые в совокупности и формируют их экологический потенциал.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С использованием открытых данных (табл. 1), обработка которых производилась в ГИС-пакете Arc.Map 10.5, на территорию Енисейской Сибири создана серия карт (рис. 1–5), иллюстрирующих пространственную дифференциацию информативных характеристик (сплошность и температура многолетней мерзлоты, чистая первичная продукция, поток скрытого тепла и однородность местообитаний растений и животных), выступающих в качестве основных составляющих оценки экологического потенциала геосистем на региональном уровне.

Табл. 1. Базы открытых данных по ключевым параметрам оценки экологического потенциала геосистем бореальной криолитозоны
Table 1. Open data bases on key parameters for assessing the ecological potential of boreal cryolithozone geosystems

Фактор	Источник	Описание
Сплошность и температура многолетней мерзлоты	CD-ROM «Land Resources of Russia», IIASA, PAH, 2002[1]	Данные представлены в векторном формате на всю территорию России в информационной системе «Земельные ресурсы России»
Чистая первичная продукция	Данные спектрорадиометра MODIS: продукт MOD17A3HGFv061* [*Running*, *Zhao*, 2021]	Представлены растровые данные годовых значений чистой первичной продукции (NPP) с 500-метровым разрешением. Эти данные получены путем суммирования 8-дневных композитов NPP. NPP рассчитывается как разность между валовой первичной продукцией (GPP) и потерями на дыхание (MR) и измеряется в кгС/м^2. Данные о GPP вычисляются на основе значений других продуктов MODIS: доли поглощаемой фотосинтетически активной радиации (FPAR — MOD15) и независимой оценки потока фотосинтетически активной радиации (PAR) по данным наземных наблюдений. Потери на дыхание (MR) оцениваются по аллометрическому соотношению между индексом листовой поверхности (LAI — MOD15) и приростом тканей растений, которое отличается для разных типов растительного покрова (по данным Land Cover, MOD12)
Поток скрытого тепла	Данные спектрорадиометра MODIS: продукт MOD16A3GFv061*. [*Running* et al., 2021]	Представлены растровые данные с 500-метровым разрешением, являющиеся средним суточным значением потока скрытого тепла (LE) за каждый год. LE рассчитывается на основе уравнения Пенмана-Монтейна с использованием других продуктов MODIS: Land Cover (MOD12), LAI (MOD15), альбедо (MCD43C3), FPAR (MOD15) и данных наземных метеорологических наблюдений. Единицы измерения Дж/м^2•день. Помимо LE (потенциального и фактического), продукт включает также слои эвапотранспирации ET (потенциальной и фактической, суммированной за год)
Однородность среды обитания растений и животных	Набор данных о разнообразии местообитаний на земной поверхности[2] [*Tuanmu*, *Jetz*, 2015]	Растровые данные, характеризующие разнообразие местообитаний, представленные в базе данных «Global Habitat Heterogeneity». Всего в данной базе представлено 14 метрик с разрешением 1 км, 5 км и 25 км. Это набор формальных показателей/метрик в форме статистических различий между значениями соседних пикселей растров улучшенного вегетационного индекса (EVI), полученного по усредненным за 5 лет (2001–2005 гг.) данным MODIS (MOD13Q1 v.5 с 250-метровым разрешением). Из 14 показателей была выбрана метрика «однородность» (Homogeneity) с разрешением 1 км, рекомендуемая авторами [*Tuanmu*, *Walter*, 2015] как наиболее из них универсальная.

** Данные загружались с использованием сервиса Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples (AppEEARS. Электронный ресурс: https://lpdaac.usgs.gov/tools/appeears/), позволяющего для выбора данных использовать шейп-файл с границами исследуемого региона (Енисейской Сибири)*

[1] Land Resources of Russia. CD-ROM. IIASA, PAH, 2002. Электронный ресурс: https://webarchive.iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/guide.htm (дата обращения 30.09.2022)

[2] Global Habitat Heterogeneity. Электронный ресурс: https://www.earthenv.org/texture (дата обращения 27.09.2022)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Принимая во внимание доступность открытых данных и их индицирующее значение, нами выбраны информативные показатели, характеризующие экологически значимые свойства ландшафтов, о которых будет сказано ниже.

Карта многолетнемерзлых пород (ММП). Для создания карты (рис. 1) на исследуемую территорию использовались данные о сплошности и температуре ММП — наиболее статичных геокриологических параметрах, представленных в тематическом разделе «Природные условия: мерзлота» информационной системы «Земельные ресурсы России» («Land Resources of Russia»), разработанной учреждениями РАН и Международным институтом прикладного системного анализа (МИПСА).

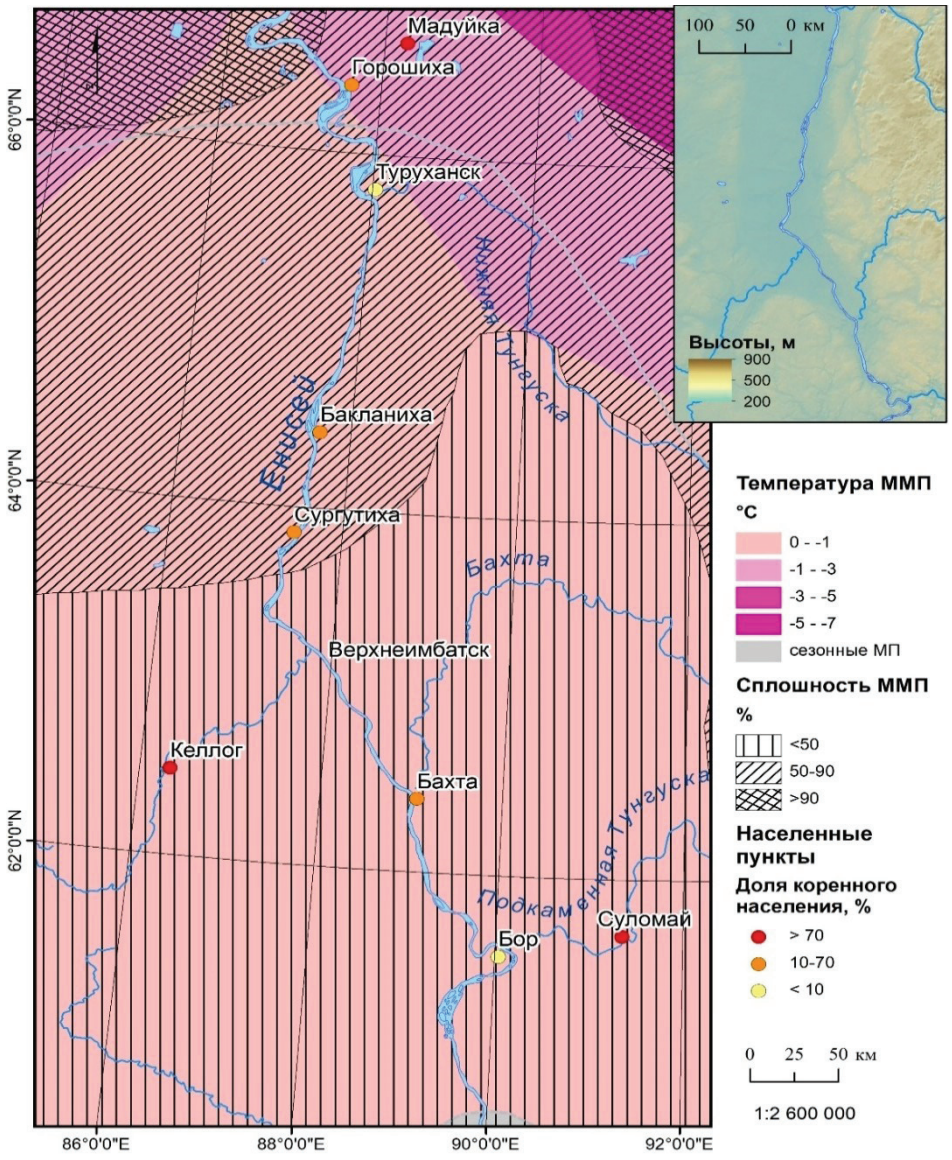


Рис. 1. Геокриологические условия Енисейского Севера
Fig. 1. Geocryological conditions of the Yenisei North

Информационно-тематическое наполнение упомянутого раздела базируется на содержании мелкомасштабных карт из Атласа снежно-ледовых ресурсов мира [1997], исходными данными при составлении которых послужили картографические материалы

более крупного масштаба, а также фактические данные о подземном оледенении и выявленные геокриологические закономерности [*Корейша*, *Соколов*, 1992].

Характеристики сплошности многолетней мерзлоты определяют не только инерционность состояния мерзлотных ландшафтов при внешних воздействиях, но и потенциал активности криогенных процессов, тогда как температура мерзлых пород — характер отклика мерзлотных геосистем на климатические воздействия.

Для оценки экологического потенциала геосистем рассматриваемой территории важное значение также имеет южная граница максимального четвертичного оледенения, имевшего, как в основном считается, среднеплейстоценовый возраст. Его граница на представленной карте (рис. 1) проведена по данным В.И. Астахова [2019]. Значимость упомянутого природного рубежа объясняется влиянием состава четвертичных отложений на геокриологические условия изучаемого региона. Так, по данным полевых исследований, охвативших территории в бассейнах рр. Столбовая (Центральносибирский государственный биосферный заповедник) и Большая Черная (родовые угодья суломайских кетов) выявлено, что в ледниковой зоне, т. е. той, которая перекрывалась покровным оледенением, мерзлотные ландшафты получили сегодня более широкое развитие, тогда как южнее упомянутой границы они значительно менее распространены [*Горшков* и др., 1998; *Медведков*, 2016 (б)]. Имеющиеся данные свидетельствуют о существующем дефиците инженерно-геологической информации и ее составляющих, что для картографирования мерзлотных ландшафтов имеет принципиальное значение. Данное обстоятельство весьма значимо, учитывая существующую приуроченность мерзлых пород южной криолитозоны к определенным литологическим условиям, в основном к покровам дисперсных отложений [*Втюрин*, 1975].

Карта чистой первичной продукции. Для создания названной карты (рис. 2) использовались исходные данные, представляющие собой растры с 500-метровым разрешением годовой суммы значений чистой первичной продукции — т. е. той части валовой органической продукции, которая не была израсходована «на дыхание»; это и есть величина прироста растений. Известно, что биопродукционные характеристики определяют средозащитный потенциал мерзлотно-таежных ландшафтов и скорость их восстановления после антропогенной трансформации; в этом же качестве выступает рассматриваемый показатель, являясь ключевым в данной категории.

Для расчета годовых значений чистой первичной продукции в NASA используются компоненты продукта MOD15A2H — индекс площади листьев (LAI) и доля фотосинтетически активной радиации (FPAR). Полученные значения представляют собой улучшенную версию данных продукта MOD17A2H, они генерируются в конце каждого года. Отметим, что в режиме реального времени улучшенные данные недоступны, поскольку сам продукт MOD15A2H рассчитывается только в конце календарного года.

В ходе работы исходные растры были усреднены за 5-летний период (2016–2020 гг.) и пересчитаны в растры с разрешением 10 км, что является оптимальным для регионального уровня исследования. Затем проведена процедура маскирования, создана маска водных объектов. Полученные маскированные слои были обработаны сначала низкочастотным фильтром сглаживания (Spatial Analyst/Neighborhood/Filter), затем — с использованием инструмента фокальной статистики. Эти инструменты в паре позволяют усреднить полученные показатели, сгладить шум, уменьшить экстремальные значения и выявить области относительно пониженных и повышенных величин (рис. 3). Низкочастотный фильтр сглаживания «размывает» границы между областями значений растра, присваивая каждому пикселю среднее значение из всех соседних пикселей (окно 3x3). Фокальная статистика также меняет значения в каждом пикселе на основе статистики значений соседних пикселей, причем область такого соседства может иметь

различную форму. В данном случае использовалась стандартное окно 3x3 (8 соседних пикселей).

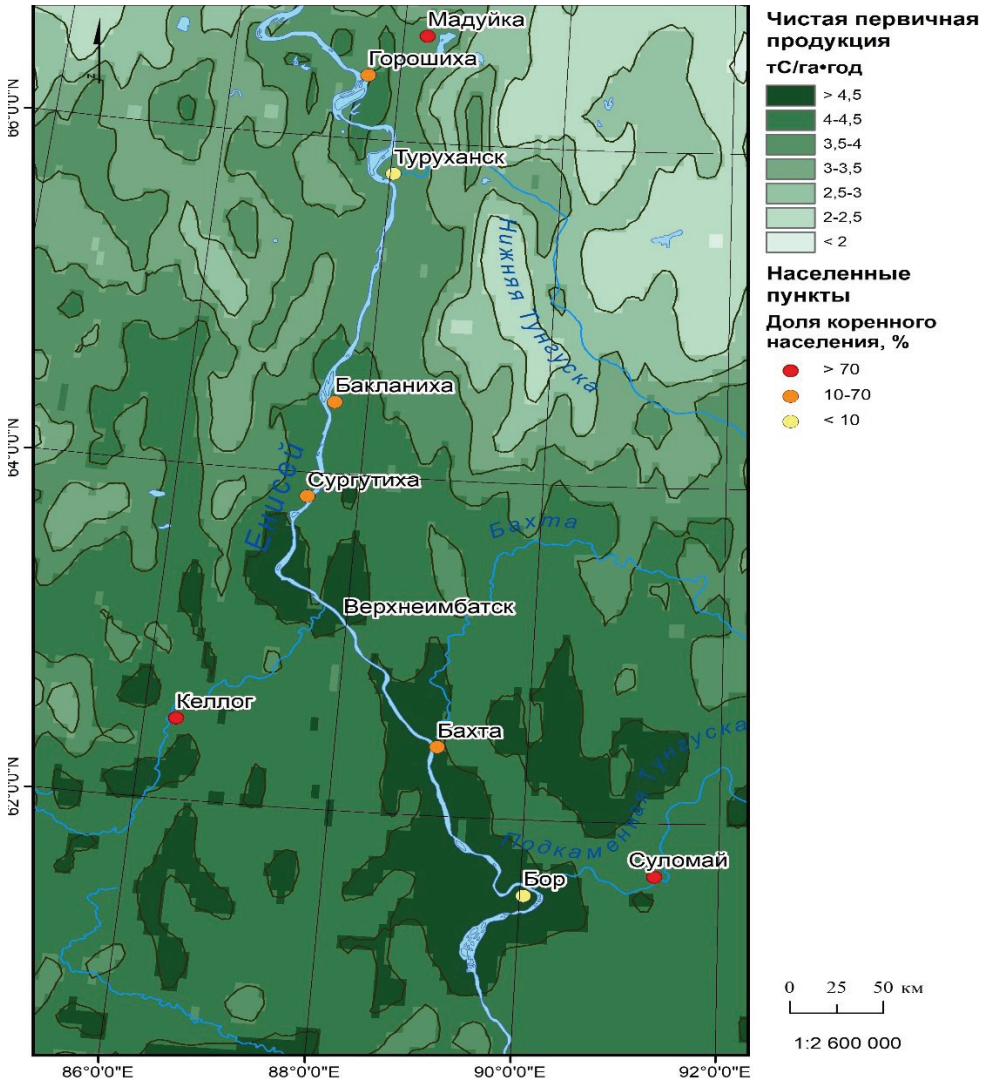


Рис. 2. Пространственное распределение значений чистой первичной продукции в пределах Енисейского Севера
Fig. 2. Spatial distribution of the values of net primary production within the Yenisei North

Чистая первичная продукция изначально оценивается в кгС/м^2•год, но для удобства в использовании полученные значения пересчитаны в ц/га•год. По результатам проведенной работы были выявлены основные тенденции в пространственном распределении первичной продукции (рис. 2 и 3). Отчетливо заметно, что распределение данного показателя в основном соответствует зонально-ландшафтным различиям. На юге Енисейского Севера в качестве заметного фактора дифференциации значений чистой первичной продукции выступает также и рельеф. Так, максимальные значения чистой первичной продукции соответствуют разным типам ледниковых равнин [*Медведков*, 2016b], что является темой для отдельного анализа, но в рамках данной статьи мы остановится только на выявленных соответствиях. На левобережье — это низкая ледниковая равнина с широким развитием аквальной морены, а на правобережье — ступенчато-холмистая и холмисто-грядовая ледниковая равнина.

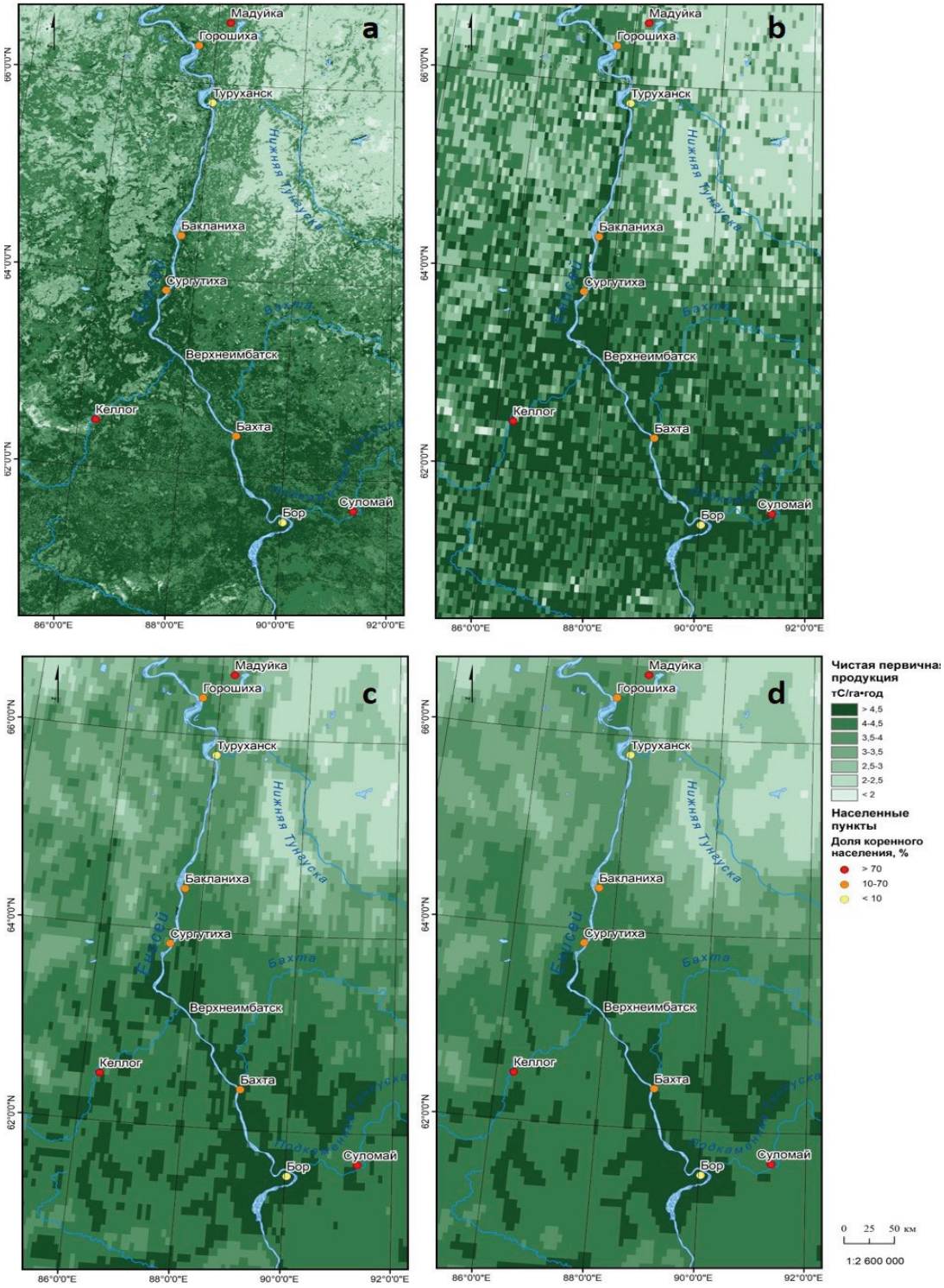


*Рис. 3. Этапы обработки данных MODIS: **a** — исходные данные с разрешением 500 м, усредненные за 5 лет; **b** — исходные данные с разрешением 10 км; **c** — результат обработки данных фильтром сглаживания (низкочастотный); **d** — результат обработки данных фокальной статистикой (окно 3x3, среднее)*

*Fig. 3. Stages of MODIS data processing: **a** — initial data with a resolution of 500 m, averaged over 5 years; **b** — initial data with a resolution of 10 km; **c** — the result of data processing by a smoothing filter (low-frequency); **d** — the result of data processing by focal statistics (window 3x3, average)*

Карта потока скрытого тепла (рис. 4). Для ее создания использовались исходные данные, представляющие собой растры 500-метрового разрешения со среднегодовыми значениями потока скрытого тепла. Поток скрытого тепла измеряется в Мдж/м^2•день (2,3 Мдж необходимо в среднем для испарения 1 л воды, а в регионе Енисейского Севера значения колеблются от менее л/м^2•день до 1,5 л/м^2•день и немногим более). Также, как и полученные показатели чистой первичной продукции, среднегодовые значения потоков скрытого тепла представляют собой улучшенную форму данных на основе использования продукта MOD15A2H в сравнении со значениями, получаемыми в режиме реального времени. Для расчета потоков скрытого тепла обработка исходных данных производилась по аналогичной схеме, как и в случае получения значений чистой первичной продукции. Так, было проведено усреднение данных за 2016–2020 гг., произведено огрубление пространственного разрешения до 10 км и реализовано маскирование водных объектов, что позволило сгладить полученные значения.

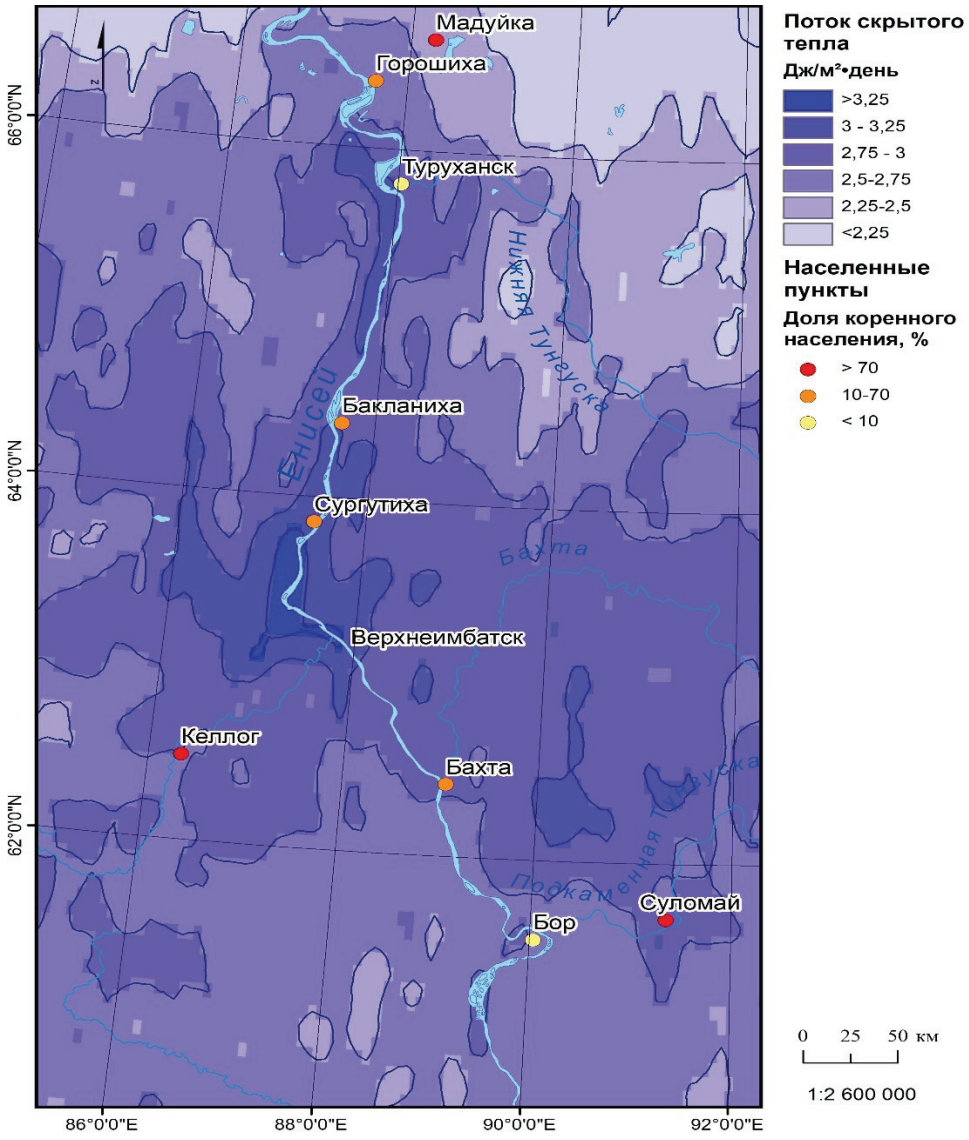


Рис. 4. Среднегодовые значения потоков скрытого тепла на территорию Енисейского Севера
Fig. 4. Average annual values of latent heat flows to the territory of the Yenisei North

Среднегодовые значения потока скрытого тепла в значительной степени индицируют гомеостатическую функцию лесов. Экологическое значение данного показателя заключается в том, что ландшафты с максимальным выбросом скрытого тепла имеют самый высокий потенциал влагообмена. В летнее время это выражается в форме появления «островов холода» на картах приповерхностных температур. Такие ландшафты не только с максимальной интенсивностью участвуют в водно-энергетическом обмене и лидируют по воспроизводству фитомассы, но также отличаются наибольшим противопожарным потенциалом в периоды с устойчивой сухой и солнечной погодой. В сибирской тайге данную роль выполняют немерзлотные ландшафты и природные комплексы с наименьшей степенью влияния процессов криогенеза на их структуру и функционирование [*Медведков*, 2016 (а); *Medvedkov* et al., 2023]. Представляется, что проявление гомеостатической функции лесов было бы более заметно по данным анализа летних значений (т. е. периода активной вегетации растений), но для этого потребовалось бы использование другого продукта с получаемыми значениями в режиме реального времени, что, по-видимому, снижало бы качество обрабатываемых данных.

Согласно рис. 5, наиболее заметно проявление экологической роли леса отмечается в той части Енисейской Сибири, где возрастают характеристики сплошности многолетней мерзлоты (т. е. там, где ее значения превышают 50 %). В этой области особенно заметно себя проявляют леса в долине р. Енисей, приуроченные к талым породам. По-видимому, болотные комплексы несколько искажают пространственную картину потоков скрытого тепла, увеличивая его значения на отдельных участках, но данный вопрос требует отдельного изучения и последующего рассмотрения.

Карта разнообразия среды обитания растительного и животного мира (рис. 5). Оценка разнородности биогеоценотических условий [*Tuanmu*, *Walter*, 2015] основана на расчете статистических закономерностей (выражаемых статистическими показателями или метриками) в распределении улучшенного вегетационного индекса EVI (Enhanced Vegetation Index). Этот индекс представляет собой улучшенную версию индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), поэтому он применяется в многолесных районах, где способен показать больше градаций, чем NDVI, а также менее чувствителен к фоновому и атмосферному шуму.

Исследователями [*Tuanmu*, *Walter*, 2015] из базы данных «Global Habitat Heterogeneity» рассмотрены 14 метрик EVI с разрешением 1 км, 5 км и 25 км. Данные метрики по своему качеству превосходят обычные, которые рассчитываются по категориальным данным, таким как landcover. Одна из наиболее универсальных метрик, по мнению [*Tuanmu*, *Walter*, 2015] — это однородность (Homogeneity), отражающая как высокие, так и низкие значения и отрицательно связана с разнообразием. Поэтому мы используем именно ее для оценки разнородности биогеоценотических условий.

Коллегами [*Tuanmu*, *Walter*, 2015] проведено сравнение вклада различных показателей неоднородности в анализ видового разнообразия птиц. На стадии формулировки гипотезы данная идея нам представлялось логичной, учитывая, что природоведам хорошо известно об установленных территориальных трендах в сообществах птиц и коррелирующих с ними факторах среды, а также о выявленной связи между изменчивостью орнитокомплексов и неоднородностью местообитаний растений [*Равкин* и др., 2022].

В дальнейшем, при сопоставлении карты однородности местообитаний (рис. 5) с геоморфологическими особенностями территории Енисейского Севера, у нас возникли серьезные вопросы. Так, было выявлено, что участки с выровненным денудационным рельефом (Среднесибирского плоскогорье и Енисейский кряж) имеют в среднем более высокие показатели однородности, а речные долины и низменности — более низкие.

Согласно представленной карте (рис. 5), особенно высоким разнообразием отличается долина Енисея. Полученные результаты несколько смущают, учитывая, что для территорий (т. е. в пределах денудационных поверхностей) с высокими показателями однородности типичен ярусный характер строения рельефа. Ярусность рельефа, собственно, и влияет на изменчивость биогеоценотических условий [*Медведков*, 2022], что также отражается и на разнообразии охотничье-промысловых ресурсов для традиционного природопользования.

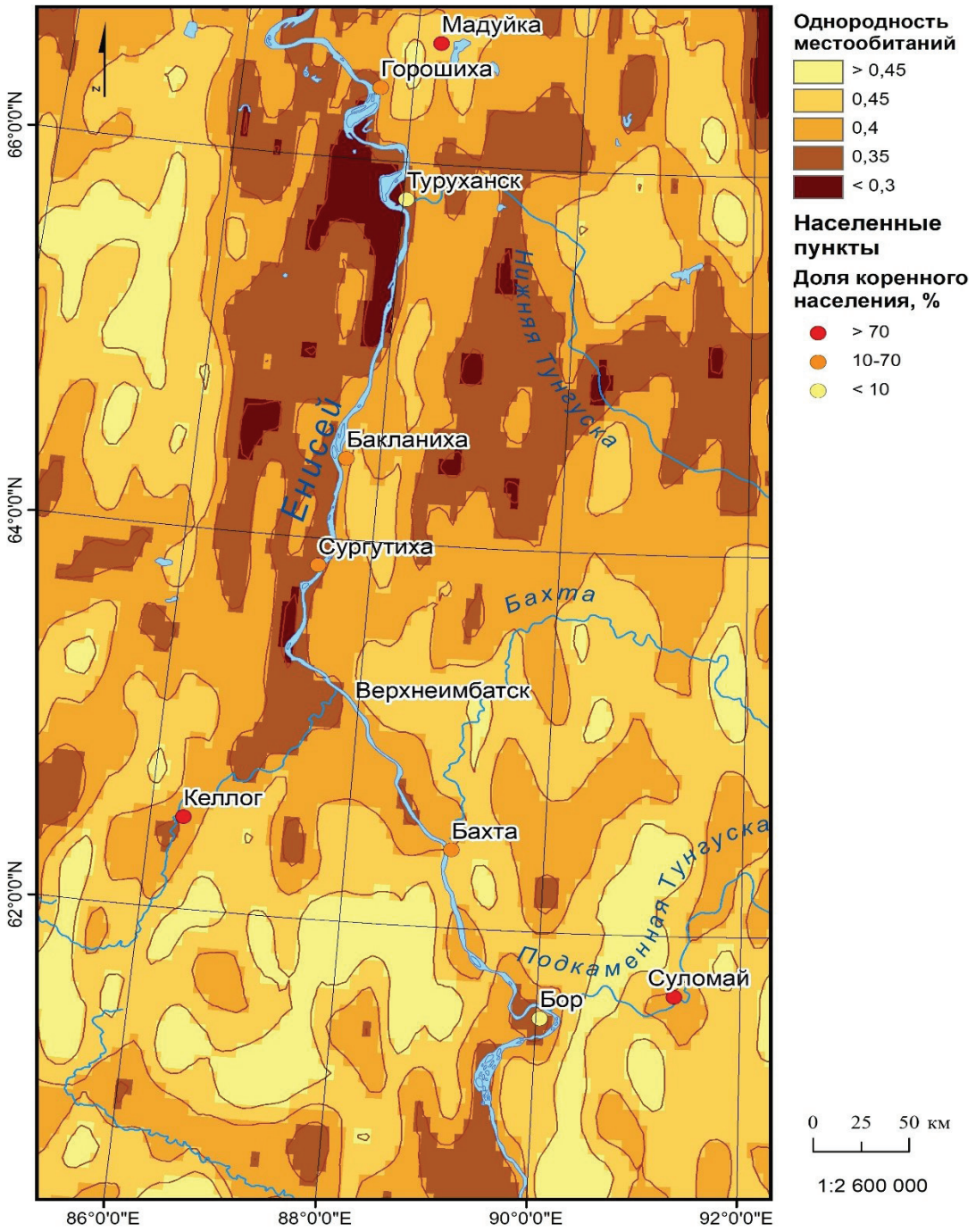


Рис. 5. Однородность местообитаний растений и животных
Fig. 5. Heterogeneity of plant and animal habitats

Авторы упомянутой методики и сами говорят о сложности сопоставления формальных показателей с реальными биогеофизическими процессами [*Tuanmu*, *Walter*, 2015]. Перспективы улучшения рассматриваемого подхода видятся им в возможности дополнения полученных метрик другими данными, например, значениями приповерхностной температуры и эвапотранспирации, которые будут отражать иные аспекты неоднородности среды обитания. Таким образом, полученные выводы предполагают необходимость проведения дальнейших исследований по выявлению связей между показателями однородности местообитаний и ландшафтной структурой территории.

ВЫВОДЫ

Выбранные показатели отражают разную степень соответствия полученных значений влиянию важнейших факторов физико-географической дифференциации (геолого-геоморфологическое строение и климатические условия). В целом это соответствие выявлено, но нуждается в более внимательном изучении, в т. ч. с привлечением результатов полевых исследований и архивных материалов геологических экспедиций. Наиболее проблемным из числа анализируемых оказался показатель однородности местообитаний растений и животных. Так, выявлено, что территории на западе Среднесибирского плоскогорья и севере Енисейского кряжа имеют в среднем более высокие показатели однородности в сравнении с долинами рек и низинами. Следует отметить, что Енисейский кряж и Среднесибирское плоскогорье — это территории со сложным строением рельефа, они представлены в виде денудационных поверхностей с присущим им ярусным строением рельефа.

Представляется, что значительная часть выбранных показателей (сплошность и температура многолетней мерзлоты, чистая первичная продукция и поток скрытого тепла) отражают экологические свойства ландшафтов на региональном уровне, но для перехода на более крупномасштабный уровень потребуется привлечение дополнительных данных, которые позволят детализировать имеющуюся картину в части лучшего понимания природно-ландшафтной структуры территории и средозащитной роли ее геосистем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-77-00048, https://rscf.ru/project/21-77-00048/.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Science Foundation, grant No. 21-77-00048, https://rscf.ru/project/21-77-00048/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Астахов В.И. Четвертичная гляциотектоника Урало-Сибирского Севера. Геология и геофизика, 2019. Т. 60. № 12. С. 1692–1708. DOI: 10.15372/GiG2019136.

Атлас снежно-ледовых ресурсов мира: в 2 т. Т. 1. М.: Институт географии РАН, 1997. 392 с.

Владимиров И.Н. Природная сущность и социальная значимость экологического потенциала геосистем. География и природные ресурсы, 2019. № 5. С. 12–18. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-5(12-18).

Втюрин Б.И. Подземные льды СССР. М.: Наука, 1975. 214 с.

Горшков С.П., Карраш Х., Парамонов А.В. Геоморфологическая индикация мерзлотных и немерзлотных ландшафтов средней тайги Центральной Сибири. Геоморфология, 1998. № 4. С. 55–61.

Исаченко А.Г. Экологическая география России. СПб: СпбГУ, 2001. 327 с.

Корейша М.М., Соколов Б.Л. Подземные льды и наледи. Материалы гляциологических исследований. Программа и методические основы составления атласа снежно-ледовых ресурсов мира, 1992. Вып. 74. С. 158–163.

Медведков А.А. Картографирование криогенных ландшафтов на основе анализа тепловых снимков. ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2016 (а). Т. 22. Ч. 1. С. 380–384. DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-380-384.

Медведков А.А. Среднетаежные геосистемы Приенисейской Сибири в условиях меняющегося климата. М.: МАКС Пресс, 2016 (б). 144 с.

Медведков А.А. Картографирование геолого-геоморфологической основы ландшафтов для управления экологическими рисками в условиях ярусного строения рельефа южной криолитозоны. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 78–90. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-78-90.

Равкин Ю.С., Цыбулин С.М., Ананин А.А., Железнова Т.К., Вартапетов Л.Г., Юдкин В.А., Жуков В.С., Преображенская Е.С., Стишов М.С., Торопов К.В., Равкин Е.С., Богомолова И.Н., Чеснокова С.В., Лялина М.И. Эколого-географическая организация и структура летнего населения птиц Северной Евразии. Общая биология, 2022. Т. 83. № 4. С. 302–320. DOI: 10.31857/S0044459622040066.

Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I.H. Textural features for image classification. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1973. V. 3. P. 610–621.

Medvedkov A.A., Vysotskaya A.A., Olchev A.A. Detection of geocryological conditions in boreal landscapes of the southern cryolithozone using thermal infrared remote sensing data: A case study of the northern part of the Yenisei Ridge. Remote Sensing, 2023. V. 15. No. 2. Art. 291. DOI: 10.3390/rs15020291.

Running S., Mu Q., Zhao M., Moreno A. MODIS/Terra net evapotranspiration gap-filled yearly L4 global 500m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2021. DOI: 10.5067/MODIS/MOD16A3GF.061.

Running S., Zhao M. MODIS/Terra net primary production gap-filled yearly L4 Global 500m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2021. DOI: 10.5067/MODIS/MOD17 A3HGF.061.

Strien van M.J., Grêt-Regamey A. Unsupervised deep learning of landscape typologies from remote sensing images and other continuous spatial data. Environmental Modelling & Software, 2022. V. 155. Art. 105462. DOI: 10.1016/j.envsoft.2022.105462.

Tuanmu M.-N., Jetz W. A global, remote sensing-based characterization of terrestrial habitat heterogeneity for biodiversity and ecosystem modeling. Global Ecology and Biogeography, 2015. V. 24. P. 1329–1339. DOI: 10.1111/geb.12365.

REFERENCES

Astakhov V.I. Quaternary glaciotectonics of the Ural-Siberian north. Russian Geology and Geophysics, 2019. V. 60. No. 12. P. 1692–1708 (in Russian). DOI: 10.15372/GiG2019136.

Gorshkov S.P., Karrash H., Paramonov A.V. Geomorphological indication of permafrost and non-permafrost landscapes of the middle taiga of Central Siberia. Geomorfologiya, 1998. No. 4. P. 55–61 (in Russian).

Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I.H. Textural features for image classification. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1973. V. 3. P. 610–621.

Isachenko A.G. Ecological geography of Russia. St. Petersburg: St. Petersburg State University, 2001. 327 p. (in Russian).

Koreisha M.M., Sokolov B.L. Underground ice and icefield. Materials of glaciological research. The program and methodological foundations of compiling a world atlas of snow and ice resources, 1992. Iss. 74. P. 158–163 (in Russian).

Medvedkov A.A. Mapping of permafrost landscapes based on the analysis of thermal images. InterCarto. InterGIS, 2016 (a). V. 22. Part 1. P. 380–384 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-380-384.

Medvedkov A.A. Mid-taiga geosystems of the Yenisei Siberia under climate change. Moscow: MAKS Press, 2016 (b). 144 p. (in Russian).

Medvedkov A.A. Mapping of the geological and geomorphologic basement of landscapes under the level structure of relief for managing environmental risks within the southern cryolithozone. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2022. V. 28. No. 1. P. 78–90 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-78-90.

Medvedkov A.A., Vysotskaya A.A., Olchev A.A. Detection of geocryological conditions in boreal landscapes of the southern cryolithozone using thermal infrared remote sensing data: A case study of the northern part of the Yenisei Ridge. Remote Sensing, 2023. V. 15. No. 2. Art. 291. DOI: 10.3390/rs15020291.

Ravkin Y.S., Tsybulin S.M., Ananin A.A., Zheleznova T.K., Vartapetov L.G., Yudkin V.A., Zhukov V.S., Preobrazhenskaya E.S., Stishov M.S., Toropov K.V., Ravkin E.S., Bogomolova I.N., Chesnokova S.V., Lyalina M.I. Ecological and geographical organization and structure of the summer bird assemblages of Northern Eurasia. Biology Bulletin Reviews, 2022. V. 83. No. 4. P. 302–320 (in Russian). DOI: 10.31857/S0044459622040066.

Running S., Mu Q., Zhao M., Moreno A. MODIS/Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled Yearly L4 Global 500m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2021. DOI: 10.5067/MODIS/MOD16A3GF.061.

Running S., Zhao M. MODIS/Terra Net Primary Production Gap-Filled Yearly L4 Global 500m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2021. DOI: 10.5067/MODIS/MOD17 A3HGF.061.

Strien van M.J., Grêt-Regamey A. Unsupervised deep learning of landscape typologies from remote sensing images and other continuous spatial data. Environmental Modelling & Software, 2022. V. 155. Art. 105462. DOI: 10.1016/j.envsoft.2022.105462.

Tuanmu M.-N., Jetz W. A global, remote sensing-based characterization of terrestrial habitat heterogeneity for biodiversity and ecosystem modeling. Global Ecology and Biogeography, 2015. V. 24. P. 1329–1339. DOI: 10.1111/geb.12365.

Vladimirov I.N. Natural essence and social significance of the ecological potential of geosystems. Geography and Natural Resources, 2019. No. 5. P. 12–18 (in Russian). DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-5(12-18).

Vtyurin B.I. Underground ice of the USSR. Moscow: Nauka, 1975. 214 p. (in Russian).

World atlas of snow and ice resources: in 2 v. V. 1. Moscow: Institute of Geography of Russian Academy of Sciences, 1997. 392 p.

УДК: 911.3 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-34-54**

В.С. Скачков[1], **Д.В. Заяц**[2,3]

ДИНАМИКА РИСКОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ АРГЕНТИНЫ В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

АННОТАЦИЯ

Целью данного исследования выступает оценка рисков пространственной дезинтеграции Аргентины, определение ее динамики (в период с 2006 по 2022 гг.) и движущих сил. Согласно применяемой методике, пространственная дезинтеграция проявляется в нарушении и разрушении системообразующих связей между административно-территориальными единицами 1-го порядка и определяются совокупностью факторов. Авторы выделяют 7 факторов пространственной дезинтеграции: исторический, социально-экономический, внутриполитический, этнокультурный, транспортный, военно-стратегический и внешнеполитический, которые позволяют выявить риски дезинтеграции страны как системы в целом, так и выявить отдельные, наиболее выделяющиеся регионы. Проведенный анализ показал, что с 2006 г. по настоящее время для Аргентины риск пространственной дезинтеграции несколько увеличился, однако остается относительно низким на фоне других исследованных ранее латиноамериканских стран (Мексика, Венесуэла, Чили, Боливия). Ведущими факторами пространственной дезинтеграции Аргентины стали внутриполитический и социально-экономический. Выявлены провинции с наибольшими рисками пространственной дезинтеграции. Это Сальта, Энтре-Риос, Огненная Земля, Неукен, Корриентес, Формоса, Рио-Негро и Мисьонес, которых можно разделить на «старых» и «новых дезинтегрантов» согласно динамике количества и качества факторов. Территориальный рисунок распределения рисков пространственной дезинтеграции за прошедшие 16 лет претерпел изменения: видно их увеличение для северных и северо-восточных приграничных провинций, а также поляризация Патагонии, заключающаяся в ослаблении рисков провинций Чубут и Санта-Крус и их усиление в Рио-Негро. Отмечается, что на основе имеющихся наработок по соседним странам есть смысл расширить пространство применения методики и исследовать пограничные регионы в Аргентине и Чили.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пространственная дезинтеграция, политическая турбулентность, Латинская Америка, территориальные диспропорции

[1] Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991,
e-mail: **cccp271994@mail.ru**

[2] Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991,
e-mail: **ethnogeo@mail.ru**

[3] Московский педагогический государственный университет, Географический факультет, ул. Кибальчича, д. 16, Москва, Россия, 129626,
e-mail: **ethnogeo@mail.ru**

Vladislav S. Skachkov[1], **Dmitriy V. Zayats**[2,3]

DYNAMICS OF THE RISKS OF SPATIAL DISINTEGRATION IN ARGENTINA AT THE BEGINNING OF THE XXI CENTURY

ABSTRACT

The aim of this study is to assess the risks of the spatial disintegration of Argentina, the determination of its dynamics (from 2006 to 2022) and the driving forces. According to the methodology used, spatial disintegration is manifested in the violation and destruction of system-forming relations between administrative-territorial units of the 1st order and is funded by a set of factors. The authors distinguish seven factors of spatial disintegration: historical, socio-economic, domestic, ethnocultural, transport, military-strategic and foreign policy, which make it possible to identify the risks of the country's disintegration as a whole and to distinguish individual, most "implant" regions. The analysis showed that from 2006 to the present for Argentina, the risk of spatial disintegration increased slightly, but remains relatively low compare other previously studied Latin American countries (Mexico, Venezuela, Chile, Bolivia). The leading triggers of the spatial disintegration of Argentina were domestic political and socio-economic factors. The provinces with the greatest combination of risks were identified: Salta, Entre Rios, Tierra del Fuego, Neuquén, Corrientes, Formosa, Rio Negro, Misiones, which can be divided into "old" and "new disintegrators", according to the dynamics of the number and quality of factors. The territorial drawing of the distribution of disintegration risks over the past 16 years has undergone changes: their increase for the northern and north-eastern border provinces, as well as the polarization of Patagonia, consisting in weakening the risks of the province of Chubut and Santa Cruz and their strengthening in Rio Negro. It is noted that on the basis of existing developments in neighboring countries, it makes sense to expand the space of the methodology and explore the border heterogeneous regions in Argentina and Chile.

KEYWORDS: spatial disintegration, political turbulence, Latin America, territorial imbalances

ВВЕДЕНИЕ

Ввиду геополитических сдвигов последнего времени, проблематика усиления взаимодействия России с дружественными странами представляется крайне актуальной, особенно в плане поиска международных дипломатических партнеров, поставщиков товаров и услуг. Одним из регионов, потенциал взаимодействия которого с нашей страной чрезвычайно высок, является Латинская Америка. При этом следует признать, что в отечественной географической науке этот регион изучен слабее, чем близлежащие Европа, Азия и АТР.

Говоря о стратегическом партнерстве с латиноамериканскими государствами, следует выделить три крупнейшие экономики, которые входят в международную «Большую двадцатку» — Бразилию, Мексику и Аргентину. Взаимодействие России с частью из них уже происходит в рамках объединения БРИКС, членство в котором имеет Бразилия, а Аргентина недавно подала заявку[4].

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **cccp271994@mail.ru**

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **ethnogeo@mail.ru**

[3] Moscow State Pedagogical University, Faculty of Geography, 16, Kibalchicha str., Moscow, 129626, Russia, *e-mail:* **ethnogeo@mail.ru**

[4] Nota al Pie. Электронный ресурс: https://www.notaalpie.com.ar/2022/09/08/argentina-solicito-formalmente-a-china-el-ingreso-a-los-brics/ (дата обращения 30.01.2023).

Между Аргентиной и Россией сложилось своеобразное «геополитическое понимание» после присоединения Крыма в 2014 г. Тогда аргентинский президент Кристина Киршнер подняла проблему принадлежности Фолклендских (Мальвинских) островов в западной прессе, указав на двусмысленность позиций западных политиков в вопросах легитимности проведения референдумов на территориях, которые являются предметом межгосударственного конфликта[1]. От последующего санкционного противостояния России и Европейского союза сельское хозяйство Аргентины получило дополнительную выгоду[2].

В большинстве отечественных географических исследований Аргентина — федеративное государство с большим стажем развития — рассматривается без учета своей региональной структуры, которая скрывает сильные территориальные контрасты и диспропорции. Государственная политика, с одной стороны, способствует развитию одних частей страны, а с другой — провоцирует социально-экономическую депрессию других регионов. Подобная разность потенциалов генерирует как возможности (например, вследствие пространственной дифференциации внутреннего рынка товаров и услуг), так и риски пространственной дезинтеграции. Именно оценка рисков пространственной дезинтеграции — потенциальной возможности ослабления, нарушения и разрушения системообразующих связей между регионами государства — является целью данной работы. Запрос на проведение подобного исследования может исходить как изнутри системы (разработка региональной политики, поиск альтернативных точек роста частным капиталом), так и извне (выстраивание эффективного межгосударственного сотрудничества, развитие трансграничного партнерства, привлечение иностранных инвесторов).

Подобную тематику исследования сложно назвать популярной, поскольку пространственная дезинтеграция, как правило, понимается лишь через призму ее радикальных исходов, таких как зона распространения сецессии или возникновение неконтролируемой центральными властями территории (в частности — контролируемой нелегитимными и нелегальными группировками: наркокартелями, радикальными политическими формированиями). Рассматривая известную дихотомию А. Бьюкенена «революция или отделение?», можно сказать, что традиционно в Латинской Америке первое предпочитали второму, что выражается в частоте государственных переворотов [*Бьюкенен*, 2001].

Как правило, работы отечественных латиноамериканистов фокусируются на проблемах, которые являются хрестоматийными для стран региона. Среди них можно выделить:

1) экономическую нестабильность (высокая инфляция, необходимость структурных реформ, специализация на неэффективных отраслях);
2) смену векторов внутренней и внешней политики, политический «маятник» (в случае Аргентины: перонизм — киршнеризм/антикиршнеризм);
3) гипертрофия столичного региона в экономической, политической и культурной жизни страны, чрезмерная концентрация населения в Буэнос-Айресе.

В то же время нужно указать на специфические черты, присущие Аргентине:

1) федеративное политическое устройство (кроме Аргентины, в Латинской Америке федерациями являются Бразилия, Мексика и Венесуэла);

[1] El Cronista. Электронный ресурс: https://www.cronista.com/economia-politica/Cristina-comparo-el-referendum-de-Malvinas-con-el-de-Crimea-20140319-0091.html (дата обращения 30.01.2023).

[2] Sputnik. Mundo. Электронный ресурс: https://sputniknews.lat/20150211/1034236114.html (дата обращения 30.01.2023).

2) расовая композиция аргентинцев контрастирует с расовой структурой населения большинства стран региона: высокая доля белых, низкая доля индейцев и метисов [*Lizcano*, 2005].

Помимо сочетания типичного и оригинального, исследовательский интерес к Аргентине вызван большой площадью государства (2,8 млн км^2, 8-е место в мире), значительной протяженностью с севера на юг и как следствие — разнообразием природных ландшафтов и хозяйственной деятельности в их пределах.

Исследования по расчету рисков пространственной дезинтеграции уже были проведены авторами на примерах Венесуэлы, Мексики, Чили, Боливии и Эквадора [*Скачков*, *Заяц*, 2022 (а, б)]. Главной инновацией именно данного исследования по отношению к предыдущим будет введение в анализ не только географических, но и хронологических координат; оценка рисков будет проведена для двух этапов — 2006 и 2019–2022 гг. Первый временной отрезок выбран по совокупности причин: окончание «выздоровления» экономики страны от шоков дефолта начала века, наличие оценок по рейтингу недееспособности государств (Fragile State Index) и индексу демократии (Democracy Index). Границы второго этапа обусловлены наиболее достоверной статистической информацией перед началом пандемии коронавируса и экономических, а также внутриполитических последствий.

Анализируя показатели указанных исследований, можно заключить, что позиция Аргентины по прошествии 16 лет (2006–2022) несильно изменилась в обоих рейтингах. Согласно Fragile State Index (FSI), который показывает, насколько государство способно контролировать свою территорию, Аргентина занимает 135–140-е места в мире (умеренная стабильность), а их абсолютные значения, несмотря на положительную динамику, изменились слабо[1]. В Латинской Америке более «дееспособными» считаются Уругвай, Коста-Рика, Панама и Чили, т. е. в основном государства, которые являются небольшими по размеру экономики, населению и площади территории (даже Чили по площади меньше Аргентины почти в 4 р.). Серьезные перепады на графике можно отнести к эффекту низкой базы.

Поскольку FSI является интегральным показателем, включающим в себя индикаторы различных сфер, то в портрете страны отчетливо выделяется наиболее актуальный блок проблем — экономический. Если средний балл недееспособности государства в политической и социальной сферах, а также в показателе «сплоченности» — 4,0–4,5, то для экономики он поднимается до 7 в отдельных значениях.

По индексу демократии оценка Аргентины тоже изменялась слабо: 6,63 в 2006 г. и 6,81 в 2021 г. Занимая 50-е место в мире, в Латинской Америке Аргентина традиционно уступает лишь Чили, Уругваю и Коста-Рике, в последнее время приблизившись к Бразилии (которая, согласно рейтингу, потеряла после прихода к власти Ж. Болсонару)[2].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Русскоязычные публикации, посвященные Аргентине и ее проблемам, в основном лишены регионального анализа. Специфика отдельных аргентинских провинций, как правило, выявляется слабо или не принимается в расчет. Мейнстрим для отечественных географов-латиноамериканистов — политические [*Мартынов*, 2020; *Яковлев*, *Яковлева*, 2020] и экономические исследования [*Яковлев*, 2018; *Клещенко*, *Морайта*, 2019], посвященные «типичным латиноамериканским» проблемам. Отдельно стоит упомянуть

[1] Fragile State Index. Электронный ресурс: https://fragilestatesindex.org/country-data/ (дата обращения 30.01.2023).

[2] Economist Intelligence. Электронный ресурс: https://www.eiu.com/n/solutions/viewpoint/political-and-economic-analysis/ (дата обращения 30.01.2023).

работы, касающиеся взаимодействия России и Аргентины, но опять же лишенные рассмотрения отдельно взятых административных единиц [*Яковлева*, 2019; *Алексеева*, *Гореславский*, 2020].

Ближе к исследуемой работе можно отнести статьи, выполненные непосредственно аргентинскими специалистами либо их коллегами из США и Западной Европы. Сложный вопрос, касающийся взаимодействия региональных политических и экономических элит между собой и национальным правительством, поднимается в работе Ж. Беренд и М. Бьянки. Выдвигается тезис, что развитые регионы с диверсифицированной экономикой требуют самого гибкого подхода со стороны национального правительства, поскольку экономические и политические элиты предпочтут сообща добиваться преференций для своих территорий. В развитых регионах экономические элиты сильнее и сплоченнее, поэтому руководства стран должны быть заинтересованы в продвижении своих креатур в управление крупнейшими частными компаниями для снижения внутриполитических рисков. В то же время экономически отсталые регионы не рассматриваются как источники политических проблем [*Behrend*, *Bianchi*, 2017].

С предыдущей работой перекликается статья Л. Гонсалеса и М. Назарено. Исследование посвящено региональной специфике социального расслоения, которое по-разному проявляет себя в провинциях с разной экономической специализацией. Авторы выдвигают гипотезу, согласно которой экономические предпосылки к консервации политических элит или возникновению динамичной конкурентной среды присущи территориям, где контроль со стороны государства был ослаблен ввиду слабой освоенности [*González*, *Nazareno*, 2021].

Сложные перипетии взаимоотношений между регионами в исторической ретроспективе представлены в работе Э. Гибсона и Т. Фаллети. Авторы рассматривают федерализм как необходимый компромисс между политическими элитами провинций, несмотря на унитарность экономики и политики страны, которая с течением времени лишь усугублялась [*Gibson*, *Falleti*, 2007].

Еще одной междисциплинарной социально-экономической и политологической работой можно считать статью Э. Ньембро, М. Дондо и Х. Мартин Чивитарези. В исследовании утверждается, что четыре провинции с наихудшим социально-экономическим положением в 2000 г. — Мисьонес, Чако, Формоза и Сантьяго-дель-Эстеро по прошествии десятилетия лишь усилили отставание от остальных регионов. Авторы видят корень проблемы в ограниченных фискальных возможностях провинций, что лишь усиливает финансовое доминирование Буэнос-Айреса и способствуют большей территориальной и социальной поляризации страны [*Niembro* et al., 2016].

Попыткам децентрализации Аргентины посвящена работа О. Као и Ж. Вака. Авторы раскрывают слабые стороны процесса децентрализации, который плавно развивался с 1960-х гг. до 2001 г. При делегировании широких полномочий с национального уровня на региональный и муниципальный общество столкнулось с неэффективной работой местных властей, в т. ч. и при выполнении социальных обязательств. Исследователи утверждают, что усилия большей части региональных элит были направлены на консервацию власти в провинции, вызывая парадоксальную ситуацию, когда в национальное правительство попасть было легче, чем в региональное [*Cao*, *Vaca*, 2007].

К важным политико-географическим работам теоретического характера, инструментарий которых был использован в данном исследовании, можно отнести эволюцию территориально-политических систем и неконтролируемых территорий В.А. Колосова [1992], проблемы политической регионалистики Р.Ф. Туровского [2006], а также «теорию разломов» С. Роккана и С. Липсета [*Rokkan*, 1967].

Риск пространственной дезинтеграции — измеримая величина негативных последствий нарушения и разрушения системообразующих связей между регионами внутри государства. Математически эти риски представляют собой сумму рисков по отдельным факторам пространственной дезинтеграции, которых авторы выделяют 7: исторический, социально-экономический, внутриполитический, этнокультурный, транспортный, военно-стратегический и внешнеполитический.

С одной стороны, применяемая методика позволяет произвести расчет гомогенности политического пространства государства, а также сопоставлять полученные значения с показателями других государств. С другой стороны, в процессе разбора каждого отдельного фактора проявляются регионы, являющиеся наиболее обособленными в пространстве всего государства. По логике исследователей, именно на них следует обратить внимание в первую очередь, поскольку вероятность возглавить процессы дезинтеграции в них выше.

Под регионом в исследовании понимается комплекс элементов геосистемы, включающий в себя природные и антропогенные ландшафты, а также население, проживающее и ведущее хозяйство в пределах данных территорий. Таксономически ранг «регион» в рамках исследования приравнивается к административно-территориальной единице 1-го порядка (т. е. провинции Аргентины) и является подсистемой пространства государства. Роль каждого отдельного фактора дезинтеграции и его вес определяется тем, насколько значительную долю населения он затрагивает в своем пространственном распределении. Чем больше населения впрямую затрагивает своей деятельностью тот или иной фактор пространственной дезинтеграции, тем он объективно важнее и для общества, и для государства.

Исходя из этого формула (1) расчета потенциальных рисков пространственной дезинтеграции для страны будет иметь следующий вид:

$$F = \frac{n}{N} \quad (1),$$

где F — вес отдельного фактора; n — суммарная численность населения, проживающего в единицах административно-территориального деления (АТД), подверженных риску пространственной дезинтеграции по данному фактору; N — общая численность населения в государстве.

Далее определяем общий риск пространственной дезинтеграции страны из выражения (2):

$$\Sigma = F_{\text{И}} + F_{\text{СЭ}} + F_{\text{внутр.}} + F_{\text{Э}} + F_{\text{Т}} + F_{\text{ВС}} + F_{\text{внеш.}} \quad (2),$$

где Σ — итоговый показатель риска пространственной дезинтеграции страны; $F_{И}$ — вес исторического фактора; $F_{СЭ}$ — вес социально-экономического фактора; $F_{внутр}$ — вес внутриполитического фактора; $F_{Э}$ — вес этнокультурного фактора; $F_{Т}$ — вес транспортного фактора; $F_{ВС}$ — вес военно-стратегического фактора; $F_{внеш}$ — вес внешнеполитического фактора.

Табл. 1. Параметризация факторов пространственной дезинтеграции для стран Латинской Америки
Table 1. Parameterization of spatial disintegration factors for Latin America's countries

Фактор	Проявление фактора	Параметры, позволяющие оценить действие фактора
Исторический	Опыт сецессии или автономного существования региона в прошлом	Число лет автономии и/или фактической независимости региона
Социально-экономический	Неравномерность развития человеческого потенциала в АТЕ	Верхний и нижний квартили по значениям ИЧР среди единиц АТД первого порядка
Внутриполитический	Различие в электоральных предпочтениях населения региона на общегосударственных выборах по сравнению со средними значениями в государстве	Отклонение в доле голосов за победившего кандидата (партию) от среднего значения по стране. Число избирательных кампаний, в которых победила оппозиция
Этнокультурный	Отличие этнорасовой композиции региона от всего государства	Отклонение в доле основных этнорасовых групп в регионе от их средней доли в стране
Транспортный	Затруднение устойчивого всепогодного сообщения с другими регионами	Число сухопутных транспортных связей (автомобильных и железных дорог, трубопроводов) с соседними регионами страны
Военно-стратегический	Присутствие военного контингента и военной инфраструктуры в пределах региона	Балльная оценка сформированности военной инфраструктуры в регионе
Внешнеполитический	Влияние на население и политическую повестку региона зарубежных акторов	Балльная оценка величины внешнего влияния: 3 балла присваивается АТЕ с наибольшим значением плотности пограничных переходов (ПП), 2 балла — АТЕ, занимающим 2–3-е места по этому показателю, 1 балл — остальным, имеющим ПП Дополнительные баллы: 3 балла — АТЕ с самыми высокими значениями прямых иностранных инвестиций (ПИИ), 2 балла — регионам, где объемы ПИИ выше среднего по стране, 0,5 балла — АТЕ-аутсайдеру; 3 балла за наличие военных баз зарубежных стран; при наличии официальных территориальных притязаний на АТЕ со стороны соседней страны получившаяся сумма баллов удваивается

Новые возможности для просчета рисков пространственной дезинтеграции открыли широко использующиеся ныне ГИС-технологии. Во-первых, произошло облегчение генерации базы данных показателей, значимых для выявления рисков пространственной дезинтеграции. Подсчет числа транспортных выходов за территорию региона, протяженности внешних границ, площадей, занятых военной инфраструктурой, становится более легкой задачей. Во-вторых, ГИС позволяют выявить регионы, непохожие на другие, своеобразные девиации, несущие угрозу развитию страны. В-третьих, средствами ГИС возможно визуализировать динамику рисков пространственной дезинтеграции регионов, отмечать воодушевляющие или же, наоборот, тревожные сдвиги в их распределении.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исторический фактор

Прежде чем перейти к анализу каждого из факторов дезинтеграции, следует учесть важную особенность территориальных диспропорций в Аргентине. Гипертрофированная концентрация населения и экономического потенциала всего лишь в четырех АТЕ 1-го порядка (Автономный город Буэнос-Айрес, провинции Буэнос-Айрес, Санта-Фе и Кордова), приводит к тому, что значительная часть исторически определяющих событий происходила именно в пределах данного, наиболее значимого для страны ареала.

Здесь следует оговорить ряд моментов. Во-первых, в исследовании учитывались примеры «выпадания» территорий из политического поля государства, начиная с конца 1826 г., когда бывшими провинциями вице-королевства Ла-Плата была принята конституция. Во-вторых, следует различать государственный переворот и примеры пространственной дезинтеграции. Упрощая, можно сказать, что переворот ослабляет все государство в равной мере, без дифференциации по отдельным регионам. Однако в случае мятежа, который не сопровождался государственным переворотом, данная логика не работает: центральная власть на какое-то время утрачивает контроль над частью территории, т. е. управляется с формальной точки зрения нелегитимными политическими силами. В-третьих, далеко не каждая забастовка или стачка является примером пространственной дезинтеграции: рабочие могут остановить производство, но при этом не нарушать связи внутри государства. Пространственная дезинтеграция в Аргентине больше присуща позапрошлому, нежели прошлому столетию. Со временем повышалась мобильность факторов производства, а также формировались политические институты, поэтому протест из политической сферы медленно дрейфовал в сторону экономической, а противостояние между правительством и бунтующими принимало зачастую отраслевой, экстерриториальный характер (пример: забастовка аргентинских железнодорожников в 70–80-е гг. XX в.). Подобные процессы были свойственны и другим странам Латинской Америки [*Альперович*, *Слезкин*, 1991; *Строганов*, 2023].

Социально-экономический фактор

Как уже указывалось, территориальная структура хозяйства Аргентины моноцентрична. На долю провинций, находящихся в эстуарии Ла-Платы, приходится ⅔ ВВП страны и почти 60 % населения[1]. Однако если рассматривать не только экономическую составляющую Индекса человеческого развития, но и социальную, то подобные контрасты несколько сглаживаются.

Несмотря на то, что оценка ИЧР производится ежегодно, после 2016 г. значения для АТЕ 1-го порядка многих стран (в т. ч. и РФ) предоставляются лишь в территориально агрегированном виде, на промежуточном таксономическом ранге между всем государством и АТЕ 1-го порядка. Поэтому для выявления динамики значения приведены на 2006 и 2016 гг.

[1] El Economista. Электронный ресурс: https://eleconomista.com.ar/economia/en-pba-caba-genera-mas-50-pib-nacional-n16291 (дата обращения 30.01.2023).

В 2006 г. в верхнем квартиле по уровню ИЧР (значение более 0,832 при среднем 0,804 по стране) находились четыре АТЕ: Неукен (0,832), Санта-Крус (0,837), Огненная Земля (0,850), расположенные на юге страны, а также столица (0,861)[1]. Все эти южные регионы — экспортоориентированные за счет добычи углеводородов и развития туризма, а столица — за счет небольшой площади, агломерационного эффекта, локализации крупнейших компаний и роли главного торгово-промышленного хаба (узла в сети) в стране. Провинциям Санта-Крус и Огненная Земля статистическую фору дает небольшая численность населения (366 тыс. и 173 тыс. чел. соответственно). Буэнос-Айрес в этом плане тоже создает свой статистический парадокс: столичная агломерация имеет население свыше 17 млн чел., но основная ее часть лежит в пределах одноименной провинции (14 млн)[2].

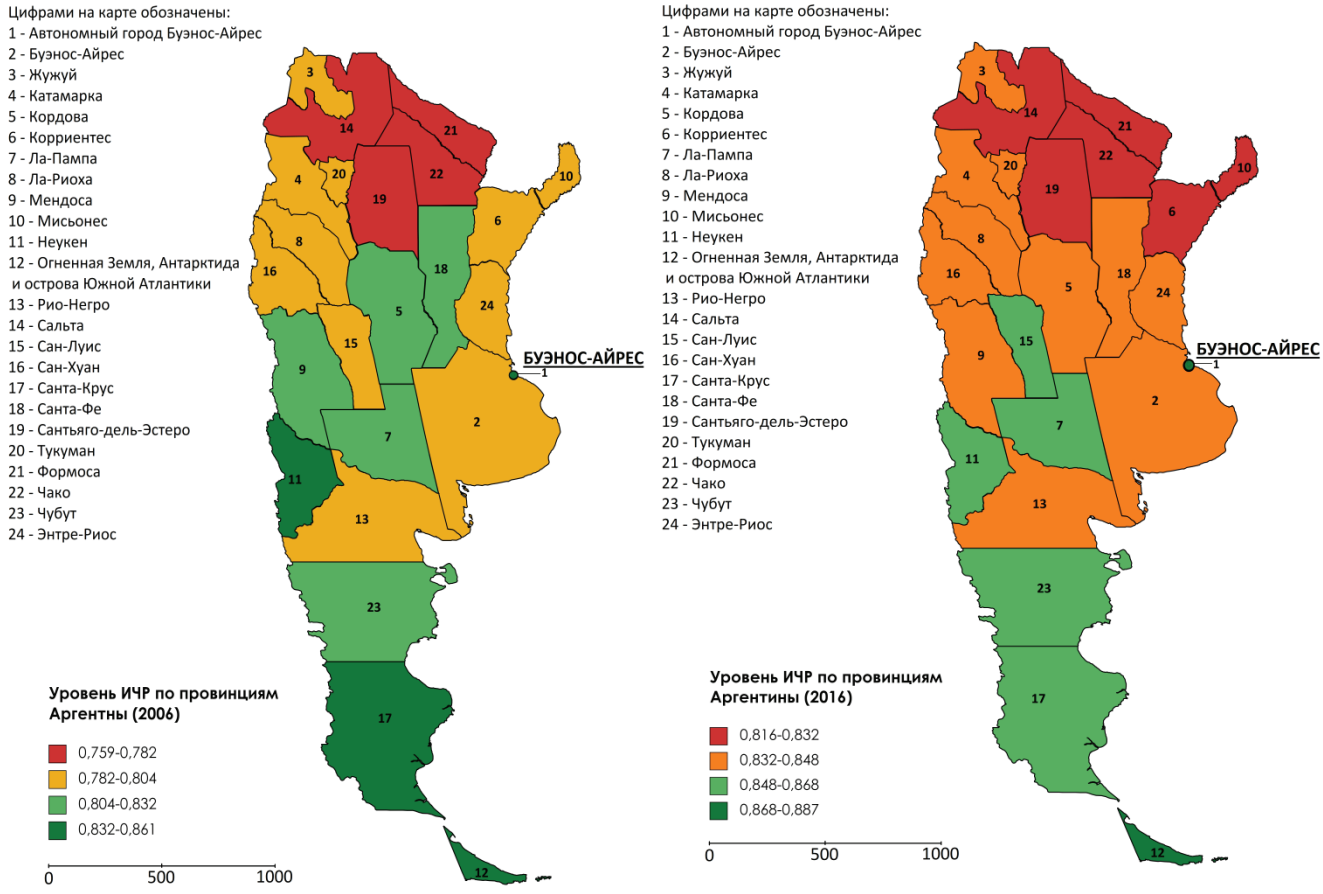


Рис. 1. Индекс человеческого развития по провинциям Аргентины в 2006 и 2016 гг.
Fig. 1. Human development index by provinces of Argentina in 2006 and 2016

Нижний квартиль включал в себя все регионы со значением ИЧР ниже 0,782 (при среднем 0,804 по стране). В эту когорту попали провинции Сальта (0,781), Чако (0,777), Сантьяго-дель-Эстеро (0,770) и Формоса (0,759), расположенные диаметрально противоположно от наиболее благополучных регионов, т. е. на севере. Население в этих регионах занято сельским хозяйством и переработкой сельскохозяйственного сырья (производство вин, сахара), отчасти лесозаготовкой и текстильной промышленностью. Этим видам экономической деятельности свойственна относительно малая

[1] Global Data Lab. Электронный ресурс: https://globaldatalab.org/shdi/ (дата обращения 30.01.2023).
[2] Instituto Geografico Nacional. Электронный ресурс: https://www.ign.gob.ar/Nuestras Actividades/ Geografia/ Dato sArgentina/DivisionPolitica (дата обращения 30.01.2023).

производительность труда, они создают товары с низкой добавленной стоимостью. Продукция сельскохозяйственных провинций ориентируется во многом на местные рынки, в этом регионе широко представлена теневая экономика; значительна роль государственного сектора в структуре занятости населения.

К 2016 г. картина несколько изменилась. Граница верхнего квартиля сместилась до 0,867 (при средней по стране величине ИЧР 0,848), и этот порог проходили лишь Огненная Земля (0,887) и столица страны (0,885). Эти два региона по значениям сильно оторвались от всех остальных (стоит отметить, что в 2016 г. неожиданно на третье место вышла провинция Чубут с показателем 0,863). В обоих регионах драйверами роста являются экспортоориентированные отрасли экономики, а также туризм.

Среди аутсайдеров социально-экономического развития (граница нижнего квартиля — 0,832) ситуация выглядит иным образом: их число за 10 лет увеличилось. В 2016 г. к регионам с пониженным уровнем ИЧР можно было отнести провинции Чако (0,816), Сантьяго-дель-Эстеро (0,817), Формоса (0,822), Корриентес (0,825), Мисьонес (0,829) и Сальта (0,830). Пополнившие этот список провинции Корриентес и Мисьонес также расположены на севере страны и специализируются преимущественно на сельском хозяйстве (производство чая и табака).

Исходя из имеющихся данных, можно сделать вывод о том, что социально-экономическая поляризация Аргентины за прошедшие десятилетия только нарастала: полюса максимального роста сохранились лишь в двух регионах, в то время как список депрессивных регионов увеличился, и главное — не претерпел изменений, т. е. происходила консервация отсталости. Рост внешнего долга, разгон инфляции, особенности рынка труда и действия профсоюзов привели к увеличению доли бедного населения (36–43 % по национальному порогу)[1]. В условиях ухудшающейся экономической конъюнктуры увеличение числа неблагополучных и уменьшение числа процветающих в социально-экономическом плане регионов выглядит закономерным[2].

Внутриполитический фактор

Решающими в борьбе за пост главы государства и состав федерального парламента являются исходы кампаний в лидирующих по численности избирателей регионах — столице и провинциях Буэнос-Айрес, Кордова и Санта-Фе. Остальные 20 провинций, даже в случае консолидированной поддержки своего кандидата или партии, вряд ли смогут навязать острую политическую борьбу регионам ядра.

Несколько утрируя, можно заключить, что политическая история Аргентины со времен правления Х.Д. Перона — это двухпартийное противостояние основанной Пероном Хустисиалистской партии и Радикального гражданского союза. Разумеется, речь идет лишь о периодах, когда проводились свободные выборы, поскольку за последние десятилетия военная хунта управляла страной в периоды 1955–1958, 1966–1973, 1976–1983 гг.

В рамках исследования для оценки рисков пространственной дезинтеграции по внутриполитическому фактору на 2006 г. будут использоваться данные предыдущих трех президентских кампаний (1995, 1999, 2003). В 1994 г. была принята конституционная реформа, главные положения которой касаются сроков избрания главы государства (теперь он мог переизбираться второй раз), а также вводилось прямое избирательное право (до этого было косвенное).

---

1 Biblio Chile. Электронный ресурс: https://www.biobiochile.cl/noticias/internacional/america-latina/2022/12/06/a rgentina-43-de-las-personas-esta-bajo-la-linea-de-la-pobreza-y-un-8-es-indigente-segun-estudio.shtml (дата обращения 30.01.2023).

2 Instituto Geografico Nacional. Электронный ресурс: https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-4-46-152 (дата обращения 30.01.2023).

В 2001 г. разразился экономический кризис, который быстро перетек в политическую сферу («Аргентинасо»). В это время в стране сменилось сразу несколько лидеров, которые по статусу были наделены полномочиями главы государства, а основные избирательные настроения сводились к тезису: «Пусть убираются все!» [*Яковлева*, 2014]. Поэтому расчеты отклонений электоральных предпочтений от среднего по стране следует принимать с некоторыми оговорками.

Оппозиционные настроения сильнее всего были выражены в столице: Автономный город Буэнос-Айрес в среднем на 20,7 процентных пунктов (п. п.) отличался от совокупного результата выборов по стране. Наоборот, «гиперлояльными» центру можно считать провинции Чубут (30), Санта-Крус (30,8), Сан-Луис (37,8) и Ла-Риоха (50,1).

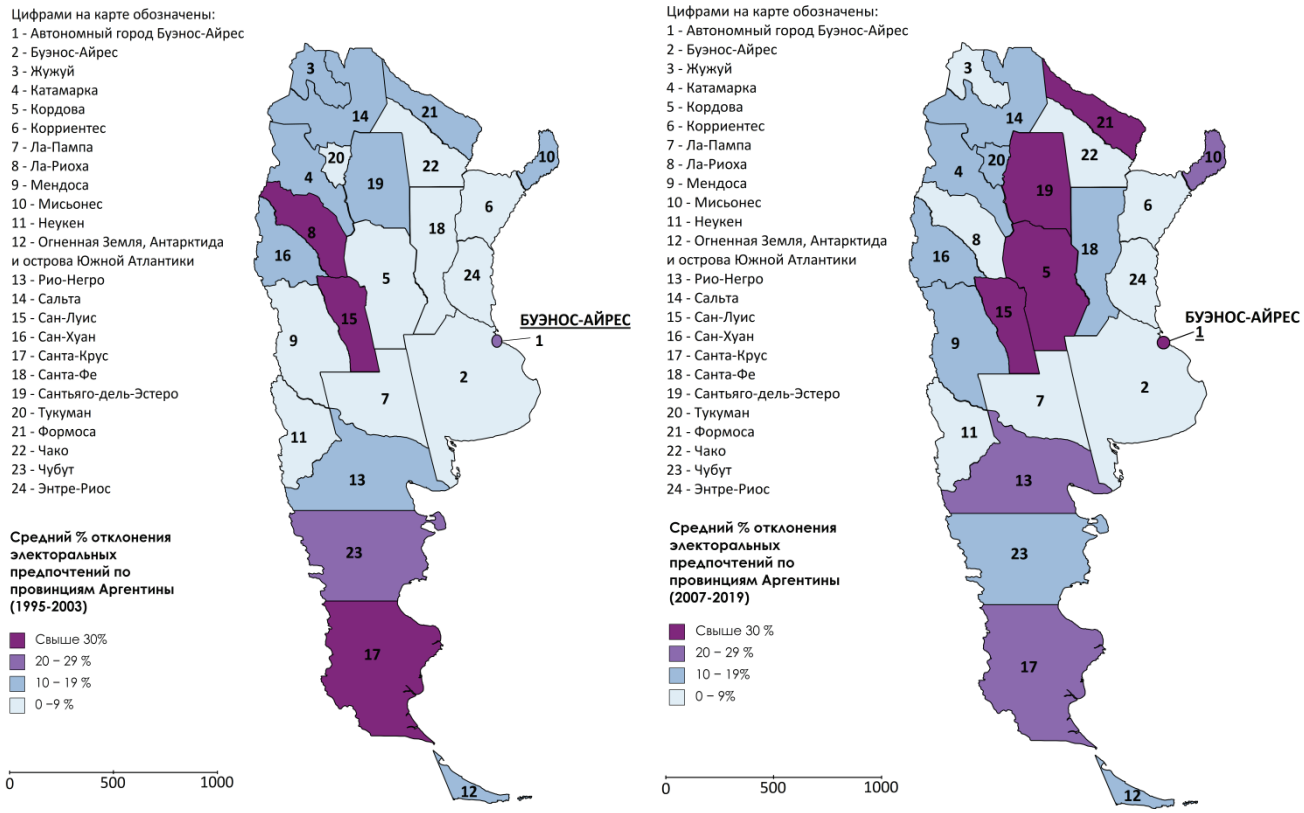


Рис. 2. Среднее отклонение электоральных предпочтений населения провинций Аргентины
Fig. 2. The average deviation of electoral preferences of the population of the provinces of Argentina

В 2003 г. к власти в стране пришел Нестор Киршнер, который взял курс на реставрацию перонизма, а продолжателем его дела стала супруга — Кристина Киршнер. Важные штрихи внутриполитической повестки в этот период рассматривались в русскоязычных СМИ[1]. Однако в 2015 г. избиратели Аргентины простимулировали «правый дрейф», к власти пришел М. Макри, при котором набиравший ход при Киршнерах экономический кризис лишь усилился. В 2019 г. хустисиалисты вновь победили: де-юре президентский пост занял А. Фернандес, но эксперты и избиратели убеждены, что до сих пор рычаги управления сконцентрированы в руках Кристины Киршнер (ее супруг Нестор умер в 2010 г.).

[1] Например, «Ведомости». Электронный ресурс: https://www.vedomosti.ru/opinion/columns/2022/09/05/939114 -ispitanie-ognem (дата обращения 30.01.2023).

После 2006 г. прошли еще четыре избирательных кампании: 2007, 2011, 2015 и 2019 гг. Наиболее лояльными центральному правительству провинциями можно назвать прежде всего бедные регионы — Формоса (отклонение 31,5 п. п. от средних результатов по стране), Мисьонес (21,1), Рио-Негро (21,7), Сантьяго-дель-Эстеро (46 п. п.), а также провинцию Санта-Крус. Последняя является экономически относительно процветающим регионом и в 2006 г. входила в группу «хустисиалистских» провинций.

Город Буэнос-Айрес лишь усилил свои оппозиционные настроения: отклонение от средних результатов выборов по стране теперь составляют 31 п. п. Перешли в стан оппозиции и избиратели Сан-Луиса, предпочтения которых отличаются на 43 п. п., а также Кордовы (отклонение 37,3 п. п.).

Как можно заметить, поляризация регионов Аргентины происходила не только по уровню социально-экономического развития, но и по электоральным предпочтениям. «Дрейфующие» во внутриполитическом ландшафте регионы свидетельствуют, с одной стороны, об эволюции политической культуры, а с другой — о потенциальных угрозах политической турбулентности.

Этнокультурный фактор

На фоне большинства латиноамериканских государств, в культуре и социуме которых ярко выражен индейский компонент, Аргентина представляет собой «белую ворону». Согласно переписи населения 2010 г., 96 % аргентинцев идентифицируют себя как «бланкос» («белые»), в то время как к коренным народам причисляют себя всего 2,4 % (например, в соседней Чили — 13 %). С одной стороны, может показаться, что на фоне экономических и политических проблем вопросы расовой сегрегации в стране не так актуальны, как, например, в Бразилии, Мексике или странах Андского региона. С другой стороны, коренными американцами считают себя почти 1 млн чел., многие из которых убеждены, что «индейский вопрос» сознательно игнорировался на высшем уровне вплоть до конца XX в.[1] [*Munoz*, 2020].

Зарубежные исследования, связанные с рассмотрением проблем индейского населения в Аргентине, в большинстве своем сводятся либо к социокультурным, либо к экономическим аспектам. В первом случае анализируются вопросы с получением образования индейцами, а также пренебрежительное отношение и стигматизация со стороны «белых» аргентинцев [*Ossola*, 2020; *Ungaretti* et al., 2020]. Во втором случае рассматривается сложный вопрос, связанный с разработкой природных ресурсов на территориях, которые имеют не только хозяйственное, но и культурное (сакральное) значение для индейцев [*Hogenboom*, 2015; *Savino*, 2016; *Iñigo*, 2020]. Стоит отметить, что аналогичные проблемы встречаются практически во всех странах Латинской Америки вне зависимости от доли коренного населения.

К сожалению, имеющиеся данные переписи 2001 г. не позволяют качественно оценить долю коренного населения по провинциям Аргентины. В официальной статистике указывалось их распределение по группам провинций, а не каждой АТЕ в отдельности.

В 2010 г. Национальный институт статистики и переписей зафиксировал рост численности индейцев — как в абсолютном, так и в относительном исчислении: 955 тыс. против 600 тыс. в 2001 г. и 2,4 % против 1,4 %. Также были уточнены данные о доле коренных народов в населении каждой из провинций. Наиболее «индейскими» оказались провинции Чубут (8,5 %), Неукен (7,87 %), Жужуй (7,81 %), Рио-Негро (7,1 %), Сальта (6,52 %), Формоса (6,08 %). Провинции, где доля индейцев в 2 р. меньше, чем в среднем по стране: Корриентес (0,52 %), Энтре-Риос (1,06 %), Сан-Хуан (1,17 %), Ла-Риоха и Мисьонес

[1] International Work Group for Indigenous Affairs. Электронный ресурс: https://www.iwgia.org/en/argentina (дата обращения 30.01.2023).

(по 1,18 %). Анализируя пространственное распределение, а также особенности процессов воспроизводства индейского населения, можно предположить, что география наиболее и наименее индейских территорий за это время поменялась слабо.

Подобное распределение коренных народов согласуется с историко-географическим фоном Аргентины. Белое население страны — потомки иммигрантов из Европы, которые прибывали в Буэнос-Айрес и оседали в основном в Пампе (правобережье Параны) или аргентинском Междуречье (левобережье Параны). Индейцы преимущественно жили в предгорьях Анд на северо-западе страны и в Патагонии.

Резюмируя, можно отметить, что роль индейского населения во внутриполитической повестке невелика, особенно в сравнении с соседними странами. В отличие от Чили, где мапуче являются силой, которая обладает высоким протестным потенциалом, в наиболее «индейских» (учитывая скромную долю в населении) аргентинских провинциях обсуждаются лишь вопросы природопользования[1,2].

Транспортный фактор

Несмотря на концентрацию экономического потенциала и населения в Пампе и Междуречье, В. Дубовик [2014] относит Аргентину к странам с относительно равномерным транспортным покрытием территории. Успехов в транспортном освоении страна достигла уже достаточно давно, поэтому различия между 2006 г. и настоящим временем минимальны.

Безусловно, доступность городов — узлов транспортной системы в центре и на севере государства выше, чем на юге. Однако, анализируя топологию сухопутных транспортных коммуникаций, можно прийти к выводу, что только провинция Огненная Земля ввиду островного положения не имеет автомобильного или железнодорожного сообщения с остальными регионами страны.

Военно-стратегический фактор

Данный фактор, как и транспортный (с которым он тесно связан), можно считать относительно инерционным. В аргентинских условиях сверхцентрализации экономики и населения в пределах столичной агломерации и двух соседних провинций не следует ожидать значительных территориальных сдвигов воинских контингентов и военной инфраструктуры.

Последним выходцем из вооруженных сил, который занимал высший пост в Аргентине, был Р. Биньоне, которого отстранили от власти в 1983 г. После этого и по сегодняшний день руководители страны — гражданские. Вооруженные силы и военно-промышленный комплекс Аргентины развивались неравномерно во времени: при военной хунте доля расходов на оборону от ВВП достигала 8 %, а в 1980–1990-е гг. происходила тотальная демилитаризация и приватизация активов ВПК. Когда экономика оправилась от кризиса в начале XXI в., а внутриполитическая обстановка стабилизировалась, армия и ВПК начали модернизироваться, что привело к расширению их бюджетов. Более подробно аспекты развития военной индустрии в стране рассмотрены российскими исследователями [*Пятаков*, 2015; *Корольков*, *Русакова*, 2018].

Пространственное размещение военного контингента Аргентины представлено в «Белой книге обороны». Анализируя эти открытые данные, можно прийти к выводу, что сухопутные вооруженные силы страны представлены во всех провинциях, базы военно-морского флота — в провинциях Буэнос-Айрес, Огненная Земля, Чубут и городе Буэнос-

1 INDEC. Encuesta Complementaria de Pueblos Indígenas (ECPI) 2004–2005.

2 INDEC. Электронный ресурс: http://www.estadistica.sanluis.gov.ar/estadisticaWeb/Contenido/Pagina148/File/LI BRO/censo2010_tomo1.pdf) (дата обращения 30.01.2023).

Айрес, а подразделения ВВС — в провинциях Буэнос-Айрес, Энтре-Риос, Санта-Фе, Мендоса, Чубут, Сан-Луис.

Подобное размещение увязывается с относительно равномерной транспортной доступностью территории страны и плотностью населения: в провинциях, на долю которых приходится большинство жителей страны, список размещенных военных подразделений гораздо обширнее, чем в Патагонии или на северо-западе. Здесь же сосредоточены главные предприятия военно-промышленного комплекса.

В своей работе А. Пятаков [2015] упоминает о таких компаниях, как CINAR (судоверфь в провинции Буэнос-Айрес), Fabrica Argentina de Aviones (авиастроительная корпорация, которая имеет завод в Кордове), La Direccion General de Fabricaciones Militares (концерн, занимающийся производством стрелкового оружия и боеприпасов и обладающий производственными площадками в Санта-Фе, Кордове и Буэнос-Айресе).

Таким образом, можно сделать вывод, что под наибольшим силовым контролем центрального правительства находятся провинции Буэнос-Айрес, Кордова и Санта-Фе, автономный город Буэнос-Айрес; лакун в военно-политическом плане на территории страны обнаружить не удалось[1].

Внешнеполитический фактор

В отличие от остальных факторов пространственной дезинтеграции, внешнеполитический включает в себя три составляющих: плотность пограничных пропускных пунктов, наличие вооруженного контингента зарубежной страны, показатель накопленных прямых иностранных инвестиций на душу населения.

Внешнеполитический фактор неоднороден: если плотность погранпереходов можно считать относительно инерционным показателем, слабо меняющимся со временем, то, например, динамика инвестиционных потоков относительно непостоянна.

Протяженная аргентинская сухопутная граница (11 968 км) насчитывает, по разным данным, 72–75 пропускных пунктов. Наибольшая плотность погранпереходов регистрируется в провинции Рио-Негро — 1,76 на 100 км границы (3 балла в рейтинге). Значительно выше средней плотности (0,65 на 100 км) показатели провинций Энтре-Риос, Мисьонес, Сальта, Ла-Риоха, Мендоса, Неукен и Чубут (по 2 балла). Остальные провинции, которые выходят к границе и имеют пункты пропуска, оценены в 1 балл (Корриентес, Формоса, Жужуй, Катамарка, Сан-Хуан, Санта-Крус и Огненная Земля)[2].

Относительно размещения иностранного военного контингента по территории Аргентины информация неполная и противоречивая. В ряде СМИ в 2018 г. появилась информация, что Южное командование ВС США займется строительством гуманитарных баз в аргентинских провинциях Неукен, Мисьонес и Огненная Земля3,4,5. Это можно связать с интересами крупных американских корпораций, которые формируют инфраструктурные сооружения «для борьбы со стихийными бедствиями» в районах добычи стратегически важных полезных ископаемых: нефти, лития и др. Авторы исследования считают обоснованным присвоить указанным провинциям по 2 балла из максимальных 3, чтобы отметить их потенциальную уязвимость.

---

1 Libro Blanco de la Defensa 2015. Argentina, 2015. Despliegue detallado de las Fuerzas Armadas.

2 Argentina gobierno. Электронный ресурс: https://www.argentina.gob.ar/seguridad/pasosinternacionales (дата обращения 30.01.2023).

3 El Megafono. Электронный ресурс: https://elmegafono.net/4489/2018/07/20/ (дата обращения 30.01.2023).

4 Extermo Sur de la Patagonia. Электронный ресурс: https://www.elextremosur.com/nota/el-comando-sur-en-neuquen-merodeando-las-gigantes-reservas-de-vaca-muerta/ (дата обращения 30.01.2023).

5 Noticias de America Latina y el Caribe. Электронный ресурс: https://www.nodal.am/2018/08/bases-extranjeras-en-argentina-es-el-imperialismo-divide-y-reina-por-carlos-leiggener/ (дата обращения 30.01.2023).

Табл. 2. Итоговые расчеты рисков пространственной дезинтеграции для АТЕ Аргентины
Table 2. Final calculations of risks of spatial disintegration for the provinces of Argentina

Фактор	2006 г.				2016–2022 гг.			
	АТЕ	Численн. населения (тыс. чел.)	Доля от населения страны (%)	Вес фактора	АТЕ	Численн. населения (тыс. чел.)	Доля от населения страны (%)	Вес фактора
Исторический	Автономный город Буэнос-Айрес, Буэнос-Айрес, Корриентес, Санта-Фе, Энтре-Риос, Тукуман, Сан-Луис, Мендоса, Кордова	30 867	77	0,77	Автономный город Буэнос-Айрес, Буэнос-Айрес, Корриентес, Санта-Фе, Энтре-Риос, Тукуман, Сан-Луис, Мендоса, Кордова	34 614	76	0,76
Социально-экономический	Лидеры: Автономный город Буэнос-Айрес, Неукен, Санта-Крус, Огненная Земля Аутсайдеры: Сальта, Чако, Формоса, Сантьяго-дель-Эстеро	7 515	19	0,19	Лидеры: Огненная Земля, Автономный город Буэнос-Айрес Аутсайдеры: Сальта, Чако, Формоса, Сантьяго-дель-Эстеро, Корриентес, Мисьонес	9 844	22	0,22
Внутриполитический	«Лоялисты»: Санта-Крус, Ла-Риоха, Чубут, Сан-Луис Оппозиция: автономный город Буэнос-Айрес	4 439	11	0,11	«Лоялисты»: Формоса, Мисьонес, Рио-Негро, Санта-Крус, Сантьяго-дель-Эстеро Оппозиция: автономный город Буэнос-Айрес, Кордова, Сан-Луис	11 303	25	0,25
Этнокультурный	Индейские провинции: Чубут, Неукен, Жужуй, Рио-Негро, Сальта, Формоса Неиндейские: Корриентес, Энтре-Риос, Сан-Хуан, Ла-Риоха, Мисьонес	8 462	21	0,21	Индейские провинции: Чубут, Неукен, Жужуй, Рио-Негро, Сальта, Формоса Неиндейские: Корриентес, Энтре-Риос, Сан-Хуан, Ла-Риоха, Мисьонес	9 774	22	0,22
Транспортный	Огненная Земля, Неукен, Энтре-Риос, Сальта	3 128	8	0,08	Огненная Земля, Неукен, Энтре-Риос, Сальта	3 648	8	0,08
Военно-стратегический	Катамарка, Рио-Негро	1 007	3	0,03	Катамарка, Рио-Негро	1 163	3	0,03
Внешне-политический	Неукен, Огненная Земля, Рио-Негро, Санта-Крус	1 591	4	0,04	Неукен, Огненная Земля, Рио-Негро, Мисьонес	2 648	6	0,06
ИТОГО				**1,43**				**1,62**

К сожалению, данных по прямым иностранным инвестициям в Аргентине в региональном разрезе обнаружить не удалось. По устаревшим работам можно установить, что в середине 2000-х гг. наиболее привлекательными для иностранных инвестиций считались богатые сырьевые провинции — Неукен, Санта-Крус и Огненная Земля (начислено по 3 балла каждой)[1]. Однако с того момента инвестиционная конъюнктура изменилась, что нашло выражение в росте инфляции, дефиците бюджета, ограничении заимствований на внешнем рынке ввиду угроз дефолта и падением страны в рейтинге легкости ведения бизнеса (с 77-го места в 2006 г. до 126-го в 2020 г.)[2]. Казалось бы, ПИИ должны были серьезно сократиться, однако данные показывают, что они росли до 2013 г., затем наблюдался спад в 2014–2016 гг., и новый приток капитала происходил до 2019 г., после чего наступило серьезное затишье. Главной причиной этого, скорее всего, стало сворачивание экономической активности на фоне пандемии[3].

Следует ожидать высоких душевых значений иностранных инвестиций в богатые ресурсные регионы: нефтяные Санта-Крус, Неукен и Огненную Землю, а также литиевые Сальту и Жужуй. Большие значения будут характерны и для города Буэнос-Айрес, главных «ворот» страны в окружающий мир.

Территориальных споров на общепризнанной территории Аргентины в данный момент не зафиксировано. Здесь следует принять во внимание исход Фолклендского вооруженного конфликта (победа Великобритании), а также амбиции Аргентины в закреплении права на некоторую часть Антарктиды, которые пока носят более декларативный и демонстративный характер.

Таким образом, по внешнеполитическому фактору пространственной дезинтеграции наиболее уязвимыми являются провинции Неукен (4 балла в 2006 г. и 5 баллов в 2022 г.), Огненная Земля (4 и 4 балла), Мисьонес (2 и 4 балла).

ВЫВОДЫ

Общий риск пространственной дезинтеграции Аргентины увеличился за 16 лет с 1,43 до 1,62. По сравнению с другими государствами Латинской Америки, которые были проанализированы при помощи данной методики, риски пространственной дезинтеграции страны невелики. На вторую половину 2010-х гг. риск пространственной дезинтеграции Чили составлял 1,85, Мексики — 2,23, Венесуэлы — 2,3, Боливии — 3,17. Исключением является относительно гомогенный Эквадор с риском 1,34.

Отчасти полученные результаты совпадают с трендами, обозначенными в Рейтинге недееспособности государств: согласно этим данным, Аргентина достаточно стабильна, хотя и несколько утратила свои позиции на фоне некоторых государств мира. Впрочем, в Латиноамериканском регионе Аргентина составляет категорию «благополучных» стран, наряду с Коста-Рикой, а также соседними Уругваем и Чили.

В итоговом риске пространственной дезинтеграции Аргентины высока доля социально-экономического и внутриполитического факторов. Структурные проблемы аргентинской экономики теперь усиливаются макроэкономическими шоками, связанными с пандемией и геополитической неопределенностью в Евразии. Подобный альянс внешних и внутренних проблем отражается и на уровне социально-экономического развития регионов страны: главными бенефициарами роста стали столица и малозаселенная Огненная Земля, живущая за счет экспорта энергоресурсов и туризма. В то же время,

---

1 Infrastructure and the Location of Foreign Direct Investment a Regional Analysis, 2007.

2 The World Bank. Электронный ресурс: https://www.worldbank.org/en/programs/business-enabling-environment (дата обращения 30.01.2023).

3 Trading Economics. Электронный ресурс: https://tradingeconomics.com/argentina/foreign-direct-investment (дата обращения 30.01.2023).

Неукен и Санта-Крус замедлили темпы экономического роста, а хронически отстающие северные провинции не поспевают даже за общегосударственными трендами.

Не стоит упускать из внимания и динамичную внутриполитическую обстановку. Администрации К. Киршнер и ее последователя А. Фернандеса пока не смогли предложить проработанного плана действий по выводу страны из экономического кризиса, и сложно предположить, сможет ли популизм обеспечить победу Frente de Todos на предстоящих президентских выборах осенью 2023 г. Пока можно с уверенностью сказать, что достаточно бедные провинции отличаются повышенной лояльностью режиму: провинции Мисьонес, Формоса, Рио-Негро дают на 20–30 п. п. выше результат за коалицию перонистских и киршнеристских партий, чем в среднем по стране.

Анализируя динамику рисков пространственной дезинтеграции отдельных регионов, нельзя не отметить некоторые особенности. В рамках используемой методики обычно выделяются АТЕ 1-го порядка, которые сочетают 3 и более факторов пространственной дезинтеграции. В случае Аргентины их 9 и их можно разделить на 2 группы:

1) «Традиционные» регионы-дезинтегранты. К этой категории принадлежат провинции Сальта (высокие риски дезинтеграции по социально-экономическому, этнокультурному, транспортному факторам), Энтре-Риос (исторический, этнокультурный, транспортный), Автономный город Буэнос-Айрес (исторический, социально-экономический, внутриполитический), Неукен (этнический, транспортный, внешнеполитический), Огненная Земля (социально-экономический, внешнеполитический и транспортный факторы). Главное их отличие — это сохранение и количественной, и качественной составляющих рисков, отсутствие изменений в природе рисков с 2006 г., за исключением провинции Неукен, которая к настоящему времени перестала входить в состав регионов — «локомотивов» развития по показателю ИЧР. Следует отметить, что риски по историческому и транспортному факторам являются относительно инертными.
2) «Новые» регионы-дезинтегранты, преимущественно сосредоточенные на северо-востоке страны (кроме Рио-Негро). Сюда относятся Корриентес (к высоким рискам по историческому и этнокультурному факторам добавился риск по социально-экономическому), Формоса (социально-экономический, этнокультурный, плюс внутриполитический к настоящему времени), Рио-Негро (к внешнеполитическому, этнокультурному, военно-стратегическому добавился внутриполитический) и, наконец, провинция Мисьонес, которая в 2006 г. отличалась высоким риском лишь по этнокультурному фактору, а к настоящему времени характеризуется высокими рисками еще и по социально-экономическому, внутри- и внешнеполитическим факторам.

Пространственные сдвиги в рисках дезинтеграции в Аргентине можно охарактеризовать следующими тенденциями:

1) усиление гетерогенности приграничных северных и северо-восточных провинций;
2) поляризация Патагонии.

Как было указано выше, северный фасад государства состоит как из «традиционных», так и «новых» гетерогенных регионов, отличающихся высокой поддержкой действующей киршнеристской администрации, а также в отдельных местностях имеющие исторический опыт дезинтеграции, а в других — повышенную долю коренного населения.

В Патагонии одновременно происходило снижение рисков сразу по нескольким факторам пространственной дезинтеграции в провинциях Чубут, Неукен и Санта-Крус, усиление «чужеродности» Рио-Негро, а также сохранение оторванности Огненной Земли. На текущий период лидерами по рискам пространственной дезинтеграции являются провинции Рио-Негро и Мисьонес. На той же широте, что и Рио-Негро, в Чили находится область Араукания, которая тоже обладает наибольшим риском пространственной дезинтеграции в своей стране. Это наблюдение представляет собой отдельный исследовательский вопрос и очерчивает новые контуры применения методики оценки рисков.

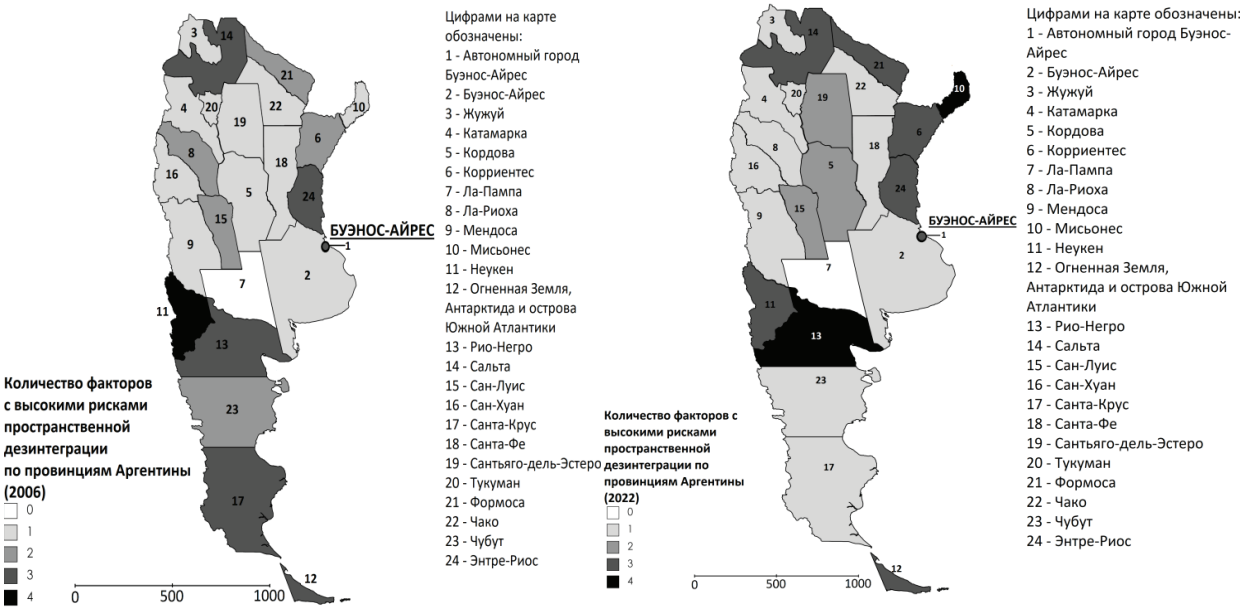


Рис. 3. Риски пространственной дезинтеграции провинций Аргентины, 2006 и 2022 гг.
Fig. 3. Risks of spatial disintegration by provinces of Argentina in 2006 and 2022

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеева Т.А., Гореславский С.С. Военно-техническое сотрудничество России со странами Латинской Америки. Потенциал развития и факторы риска. Латинская Америка, 2020. № 9. С. 24–46. DOI: 10.31857/S0044748X0010598-6.

Альперович М.С., Слезкин Л.Ю. История Латинской Америки (с древнейших времен до начала XX века). Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1991. 286 с.

Бьюкенен А. Сецессия. Право на отделение, права человека и территориальная целостность государства. М.: Рудомино, 2001. 240 с.

Дубовик В.О. Транспортная система Аргентины. Бюллетень транспортной информации, 2014. № 4 (226). С. 32–37.

Клещенко Л.Л., Морайта И.А. Коррупция в Аргентине: социально-политические аспекты. Латинская Америка, 2019. № 8. С. 23–34. DOI: 10.31857/S0044748X0005577-3.

Колосов В.А. Территориально-политическая организация общества: автореф. дис. ... доктора географ. наук. М.: Ин-т географии РАН, 1992. 47 с.

Корольков А.В., Русакова Т.Ю. Военно-техническая политика Аргентины и ее влияние на геополитическую стратегию. Латинская Америка, 2018. № 3. С. 36–44.

Мартынов Б.Ф. Латиноамериканский популизм: некоторые размышления по поводу. Латинская Америка, 2020. № 2. С. 19–29. DOI: 10.31857/S0044748X0008142-5.

Пятаков А.Н. Военно-технический потенциал Аргентины и сотрудничество с Россией. Латинская Америка, 2015. № 11. С. 20–39.

Скачков В.С., Заяц Д.В. Риски дезинтеграции государственной территории (на примере Мексики, Венесуэлы и Чили). Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2022 (а). № 3. С. 50–61.

Скачков В.С., Заяц Д.В. Оценка рисков пространственной дезинтеграции в государстве с многоядерной территориально-политической структурой (на примере Боливии). Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле, 2022 (б). № 67 (3). С. 475–490. DOI: 10.21638/spbu07.2022.305.

Строганов А.И. Латинская Америка: Страницы истории XX века. М.: URSS, 2023. 208 с.

Туровский Р.Ф. Политическая регионалистика. М.: Издательский дом ВШЭ, 2006. 784 с.

Яковлев П.П. Хроническая болезнь аргентинской экономики. Латинская Америка, 2018. № 10. С. 10–24. DOI: 10.31857/S0044748X0001037-9.

Яковлев П.П., Яковлева Н.М. Президентские выборы в Аргентине. Выбор пути развития. Свободная мысль, 2020. № 1 (1679). С. 106–120.

Яковлева Н.М. Аргентинская модель посткризисного развития. Мировая экономика и международные отношения, 2014. № 2. С. 67–76.

Яковлева Н.М. Страны BRICS и Аргентина: потенциал взаимодействия. Навстречу саммиту в Бразилии. Латинская Америка, 2019. № 4. С. 5–19. DOI: 10.31857/S0044748X00 04363-8.

Behrend J., Bianchi M. Economic structure and sub-national policy in Argentina. SciELO journals, 2017 Dataset. DOI: 10.6084/m9.figshare.5720998.v1.

Cao H., Vaca J. El fracaso de la descentralización Argentina. Andamios, 2007. V. 4 (7). P. 249–267.

Gibson E., Falleti T.G. La unidad a palos: Conflicto regional y los orígenes del federalismo argentino. Postdata, 2007. V. 12. P. 171–204.

González L., Nazareno M. Estados, alianzas y desigualdad subnacional: dos provincias argentinas en perspectiva comparada, 2003–2015. Revista de ciencia política, 2021. V. 41 (1). P. 135–161. DOI: 10.4067/S0718-090X2021005000104.

Hogenboom B. Latin America's transformative new extraction and local conflicts. European Review of Latin American and Caribbean Studies, 2015. V. 99. P. 143–151.

Iñigo C.V. Borders, development and territory in Argentina: Indigenous mobilization in the Central Chaco. Latin American Perspectives, 2020. V. 47 (5). P. 199–211.

Lizcano F. Composición étnica de las tres áreas culturales del Continente Americano al comienzo del siglo XXI. Convergencia, 2005. V. 38. P. 185−232.

Munoz R. Construcción estatal de la cuestión indígena en Chaco (Argentina): Ley de las comunidades indígenas de 1987. E&C, Quito, 2020. V. 11. P. 99–116.

Niembro A., Dondo M., Civitaresi H.M. La manifestación territorial de las desigualdades socioeconómicas en Argentina: Del diagnóstico a las políticas públicas. Población y sociedad, 2016. V. 23 (1). P. 79–123.

Ossola M.M. Jóvenes indígenas y educación superior en Argentina: Experiencias y desafíos del ingreso, la permanencia y la graduación universitaria. Desidades, Rio de Janeiro, 2020. V. 26. P. 39–51.

Rokkan S. Geography, religion, and social class: Crosscutting cleavages in Norwegian politics. Party systems and voter alignments. New York: Free Press, 1967.

Savino L. Landscapes of contrast: The neo-extractivist state and indigenous peoples in "post-neoliberal" Argentina. The Extractive Industries and Society, 2016. V. 3 (2). P. 404–415.

Ungaretti J., Etchezahar E., Barreiro A. Validation of the subtle and blatant prejudice scale towards indigenous people in Argentina. Curr Psychol, 2020. V. 39. P. 1423–1429.

REFERENCES

Alekseeva T., Goreslavsky S. Military-technical cooperation of Russia with the countries of Latin America. Potential for development and risk factors. Latin America, 2020. No. 9. P. 24–46 (in Russian). DOI: 10.31857/S0044748X0010598-6.

Alperovich M.S., Slezkin L.Yu. History of Latin America (from ancient times to the beginning of the twentieth century). Textbook for students of universities. 2nd ed. Moscow: Higher school, 1991. 286 p. (in Russian).

Behrend J., Bianchi M. Economic structure and sub-national policy in Argentina. SciELO journals, 2017 Dataset. DOI: 10.6084/m9.figshare.5720998.v1.

Buchanan A. Secession. The right to secession, human rights and the territorial integrity of the state. Moscow: Rudomino, 2001. 240 p (in Russian).

Cao H., Vaca J. El fracaso de la descentralización Argentina (The failure of Argentine decentralization). Andamios, 2007 V. 4 (7). P. 249–267 (in Spain).

Dubovik V. The transport system of Argentina. Transport Information Bulletin, 2014. No. 4 (226). P. 32–37 (in Russian).

Gibson E., Falleti T.G. La unidad a palos: Conflicto regional y los orígenes del federalismo Argentino (Unity with sticks: Regional conflict and the origins of Argentine federalism). Postdata, 2007. V. 12. P. 171–204 (in Spain).

González L., Nazareno M. Estados, alianzas y desigualdad subnacional: Dos provincias argentinas en perspectiva comparada, 2003–2015 (States, alliances and subnational inequality: Two Argentine provinces in comparative perspective, 2003–2015). Revista de ciencia política, 2021. V. 41 (1). P. 135–161 (in Spain). DOI: 10.4067/S0718-090X2021005000104.

Hogenboom B. Latin America's transformative new extraction and local conflicts. European Review of Latin American and Caribbean Studies, 2015. V. 99. P. 143–151.

Iñigo C.V. Borders, development and territory in Argentina: Indigenous mobilization in the Central Chaco. Latin American Perspectives, 2020. V. 47 (5). P. 199–211.

Kleshchenko L., Morayta I. Corruption in Argentina: Socio-political aspects. Latin America, 2019. No. 8. P. 23–34 (in Russian). DOI: 10.31857/S0044748X0005577-3.

Kolosov V.A. Territorial and political organization of society: Abstract of the dissertation ... Doctor of geographical sciences. Moscow: Institute of Geography of Russian Academy of Sciences, 1992. 47 p. (in Russian).

Korolkov A., Rusakova T. Argentina's military-technical politics and its influence on geopolitical strategy. Latin America, 2018. No. 3. P. 36–44 (in Russian).

Lizcano F. Composición étnica de las tres áreas culturales del Continente Americano al comienzo del siglo XXI (Ethnic composition of the three cultural areas of the American Continent at the beginning of the 21st century). Convergencia, 2005. V. 38 (in Spain).

Martynov B. Latin American populism: Some relevant thoughts. Latin America, 2020. No. 2. P. 19–29 (in Russian). DOI: 10.31857/S0044748X0008142-5.

Munoz R. Construcción estatal de la cuestión indígena en Chaco (Argentina): Ley de las comunidades indígenas de 1987 (State construction of the indigenous question in Chaco (Argentina): Indigenous Communities Law of 1987). E&C, Quito, 2020. V. 11. P. 99–116 (in Spain).

Niembro A., Dondo M., Civitaresi H.M. La manifestación territorial de las desigualdades socioeconómicas en Argentina: Del diagnóstico a las políticas públicas (The territorial manifestation of socioeconomic inequalities in Argentina: From diagnosis to public policies). Población y sociedad, 2016. V. 23 (1). P. 79–123 (in Spain).

Ossola M.M. Jóvenes indígenas y educación superior en Argentina: Experiencias y desafíos del ingreso, la permanencia y la graduación universitaria (Indigenous youth and higher education in Argentina: Experiences and challenges of entering, permanence and university graduation). Desidades, Rio de Janeiro, 2020. V. 26. P. 39–51 (in Spain).

Pyatakov A. Military-technical potential of Argentina and cooperation with Russia. Latin America, 2015. No. 11. P. 20–39 (in Russian).

Rokkan S. Geography, religion, and social class: Crosscutting cleavages in Norwegian politics. Party systems and voter alignments. New York: Free Press, 1967.

Savino L. Landscapes of contrast: The neo-extractivist state and indigenous peoples in "post-neoliberal" Argentina. The Extractive Industries and Society, 2016. V. 3 (2). P. 404–415.

Skachkov V., Zayats D. Risks of disintegration of the state territory (on the example of Mexico, Venezuela and Chile). Moscow University Bulletin. Series 5. Geography, 2022 (a). No. 3. P. 50–61 (in Russian).

Skachkov V., Zayats D. Assessing the risks of spatial disintegration in a state with a multinuclear territorial and political structure (on the example of Bolivia). Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences, 2022 (b). No. 67 (3). P. 475–490 (in Russian). DOI: 10.21638/spbu07.20 22.305.

Stroganov A. Latin America: Pages of the History of the 20th Century. Moscow: URSS, 2023. 208 p. (in Russian).

Turovsky R. Political regionalism. Moscow: Publishing House of the HSE, 2006 (in Russian).

Ungaretti J., Etchezahar E., Barreiro A. Validation of the subtle and blatant prejudice scale towards indigenous people in Argentina. Curr Psychol, 2020. V. 39. P. 1423–1429.

Yakovlev P. Chronic disease of the Argentine economy. Latin America, 2018. No. 10. P. 10–24 (in Russian). DOI: 10.31857/S0044748X0001037-9.

Yakovlev P., Yakovleva N. Presidential elections in Argentina. Choice of development path. Free Thought, 2020. No. 1 (1679). P. 106–120 (in Russian).

Yakovleva N. Argentinian model of post-crisis development. World Economy and International Relations, 2014. No. 2. P. 67–76 (in Russian).

Yakovleva N. BRICS countries and Argentina: Potential for interaction. Towards the summit in Brazil. Latin America, 2019. No. 4. P. 5–19 (in Russian). DOI: 10.31857/S0044748X0004363-8.

УДК: 314.9+528.9 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-55-72**

В.С. Тикунов[1], **В.Р. Гайдуков**[2]

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДЕКСА ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ СТРАН ОЭСР И ИХ РЕГИОНОВ

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена вопросам разработки индекса человеческого развития (ИЧР) в рамках проведения межтерриториальных сравнений стран Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) и их регионов. Рассмотрены процессы создания базовой картографической основы для проведения геоинформационного моделирования индекса человеческого развития на страновом и региональном уровнях одновременно. Выявлены новые черты аппарата математико-картографического моделирования, описаны основные концептуальные сложности разработки тематического содержания подобного моделирования. На основе анализа международной и российской версии индекса человеческого развития предложена концепция тематического наполнения данного индекса для обеспечения межтерриториальных сравнений. В рамках геоинформационного моделирования были получены результаты с позиций общих представлений о дифференциации территорий по значениям индекса человеческого развития. Предложен подход к комплексированию оценочных и типологических моделей, который позволил не только рассмотреть типологию территорий по степени интенсивности значений индикаторов индекса человеческого развития, но и рассмотреть их в связке со всем многообразием значений индекса в рамках данного типа, что позволило дать комплексную характеристику территории. Полученный анализ позволил рассмотреть территорию с позиции общественного здоровья, эффективности системы среднего специального и высшего образования, а также оценить размер экономики территории применительно к численности населения. На основе этого был выявлен ряд основных проблем территорий с позиций компонентов индекса человеческого развития и дан ряд рекомендаций лицам, принимающим управленческие решения в рамках ведения национальной и региональной политики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: индекс человеческого развития, общественное здоровье, эффективность системы образования, социально-экономическое развитие, геоинформационное моделирование

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991,
e-mail: **vstikunov@yandex.ru**

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991,
e-mail: **gayd.vladislav2013@yandex.ru**

Vladimir S. Tikunov[1], **Vladislav R. Gaidukov**[2]

GEOINFORMATION MODELING OF THE HUMAN DEVELOPMENT INDEX OF OECD COUNTRIES AND THEIR REGIONS

ABSTRACT

The article is devoted to the development of the Human development Index (HDI) in the framework of inter-territorial comparisons of the countries of the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) and their regions. The processes of creating a basic cartographic basis for conducting geoinformation modeling of the human development index at the country and regional levels at the same time are considered. New features of the mathematical-cartographic modeling apparatus are revealed, the main conceptual difficulties of developing the thematic content of such modeling are described. Based on the analysis of the international and Russian versions of the human development index, the concept of thematic content of this index is proposed to ensure inter-territorial comparisons. Within the framework of geoinformation modeling, the results were obtained from the standpoint of general ideas about the differentiation of territories according to the values of the human development index. An approach to the integration of evaluation and typological models is proposed, which allowed not only to consider the typology of territories according to the degree of intensity of the values of the human development index indicators, but also to consider them in conjunction with the entire variety of index values within this type, which made it possible to give a comprehensive characteristic of the territory. The analysis made it possible to consider the territory from the standpoint of public health, the effectiveness of the system of secondary specialized and higher education, as well as to assess the size of the territory's economy in relation to the population. On the basis of this, a number of the main problems of the territories were identified from the standpoint of the components of the human development index and a number of recommendations were given to those making managerial decisions within the framework of national and regional policy.

KEYWORDS: human development index, public health, efficiency of the education system, socio-economic development, geoinformation modeling

ВВЕДЕНИЕ

Изучение социально-экономического развития во все времена являлось темой, не теряющей своей актуальности. Причиной того, что данная тематика широко волновала и продолжает волновать все мировое сообщество, является ее исключительная важность для комфортного существования человечества. Правильная и объективная оценка развития территории — во многом залог успешного, стабильного мирового развития, ключ к решению крайне острой проблемы социально-экономического неравенства, а также к разработке документов в области мировой, национальной, региональной политики и источник новых научных открытий для эффективного и рационального управления территориями.

Поиск подходящего инструмента для измерения социально-экономического развития все чаще заставляет обращаться к огромному числу индексов, которые в данный момент времени востребованы и популярны, разрабатываются ведущими международными

[1] M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **vstikunov@yandex.ru**

[2] M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **gayd.vladislav2013@yandex.ru**

и национальными организациями. Их использование на различных территориальных уровнях сопряжено с рядом сложных проблем в методическом и концептуальном плане. Во многих случаях используемые наборы данных, даже в самых авторитетных индексах, очень специфичны и имеют ряд концептуальных вопросов, признаваемых самими авторами; при этом данные наборы составлены так, что их статистическая несоизмеримость делает невозможным их использование на различных территориальных уровнях. Это доказывает наличие огромного числа национальных версий даже основополагающих индексов, признаваемых мировым сообществом, одним из которых является индекс человеческого развития.

Индекс человеческого развития (ИЧР) — составной индекс, ежегодно рассчитываемый Программой развития ООН. Индекс измеряет уровень жизни, грамотности, образованности и продолжительности жизни как основных характеристик человеческого потенциала. В соответствии со значением индекса происходит классификация стран по уровню развития.

Человеческое развитие понимается как результат социально-экономического развития с одной стороны, и как основа будущего роста — с другой; и в настоящее время представляет собой один из наиболее востребованных объектов исследования экономической науки. На его основании можно объективно оценить деятельность органов власти, сформировать систему важнейших целевых показателей социально-экономического развития [*Иконникова*, 2012].

Вследствие этого появляется необходимость формирования набора данных для правомерного расчета индексов для сравнения стран и их регионов как единой системы, а также поиска непротиворечивой методики его расчета. На базе этого возможно проводить корректные научные сравнения, формировать программы территориального развития и управления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На первом этапе проведения исследования стояла задача адаптации тематического набора индикаторов, входящих в ИЧР, для проведения правомерных и объективных межтерриториальных сравнений. Для этого была тщательно проанализирована концепция классического тематического наполнения ИЧР для исследования стран мира, показанных на рис. 1.

Рис. 1. Тематическое содержание классического варианта ИЧР[1]
Fig. 1. Thematic content of the classical version of the HDI

[1] *Caplan B.* Against the Human Development Index, 2009. Электронный ресурс: http://econlog.econlib.org/archives/2009/05/against_the_hum.html (дата обращения 05.12.2022).

Содержательный анализ индикаторов в рамках корректности межтерриториальных сравнений вызывает определенные вопросы. Использование в качестве индикаторов образования среднего количества лет обучения в школе и ожидаемых лет обучения при поступлении в систему образования является весьма спорным решением [*Косьмин* и др., 2017]. Синхронизация этих индикаторов даже на страновом уровне сопряжена с большим числом трудностей и упирается в различные сроки обучения и разницу в самих системах образования в странах мира. То же самое касается и уровня доходов, который можно лишь условно количественно соизмерить для проведения межстрановых исследований. Само понятие «доход» может по-разному восприниматься населением на одной и той же территории, что также делает его крайне непростым показателем в плане унификации [*Суринов*, *Луппов*, 2020].

Проиллюстрируем данный тезис на примере рассчитанного ИЧР для регионов России в рамках исследований ООН. Вариант, разработанный для регионов России, имеет несколько измененный тематический набор индикаторов, отвечающий требованиям и реалиям отечественной учетно-статистической информации [*Янгирова*, *Искаков*, 2022].

ИЧР российских регионов по федеральным округам, 2019 год

	Душевой ВВП, долл. ППС	Индекс дохода	Ожидаемая продолжительность жизни, лет	Индекс долголетия	Грамотность, %	Доля учащихся в возрасте 7–24 лет	Индекс образования	ИЧР 2019	Место 2019	ИЧР 2018	Место 2018
Центральный федеральный округ	32727	0,875	74,5	0,826	99,8	0,900	0,965	0,887	2	0,883	2
Северо-Западный федеральный округ	32433	0,873	73,7	0,812	99,8	0,892	0,963	0,881	3	0,875	3
Южный федеральный округ	19176	0,794	73,7	0,812	99,7	0,865	0,953	0,850	6	0,848	6
Северо-Кавказский федеральный округ	11108	0,712	76,6	0,861	99,2	0,707	0,897	0,819	8	0,815	8
Приволжский федеральный округ	24309	0,830	72,9	0,799	99,6	0,870	0,954	0,858	4	0,853	4
Уральский федеральный округ	50506	0,940	72,5	0,792	99,7	0,871	0,955	0,893	1	0,890	1
Сибирский федеральный округ	26057	0,840	71,1	0,769	99,6	0,882	0,958	0,852	5	0,849	5
Дальневосточный федеральный округ	28804	0,855	70,2	0,754	99,7	0,822	0,939	0,846	7	0,842	7
Россия	29189	0,857	73,3	0,806	99,7	0,862	0,952	0,870		0,866	

Рис. 2. Перечень индикаторов ИЧР Российских регионов[1]
Fig. 2. List of indicators of the HDI of Russian regions

Перечень индикаторов ИЧР для российских регионов отличается иным тематическим содержанием: вместо показателя дохода используется региональный ВВП на душу населения, в блоке образования используется показатель доли учащихся в возрасте 7–24 лет. Все это доказывает неприменимость даже самых авторитетных индексов при переходе уровня расчета на иной территориальный уровень. При ином наборе данных их

[1] Индекс человеческого развития в России 2021/2022: региональные различия. Электронный ресурс: https://ac.gov.ru/uploads/2Publications/analitika/2022/_2021_long.pdf?ysclid=llqvsvua5v505895282 (дата обращения 23.04.2023).

статистическая несопоставимость делает невозможным использование национальной версии в рамках международных сравнений.

Вследствие данных трудностей был пересмотрен набор индикаторов, используемых при расчете данного индекса. Отметим, что сами тематические блоки — экономика, продолжительность жизни и образование — остались без изменений. Были пересмотрены лишь индикаторы, из которых состоят данные блоки.

В блоке экономики показатель дохода на душу населения был заменен на ВРП на душу населения. В целом подобная замена делает данный блок более формализуемым, поскольку при этом обеспечивает отсутствие необходимости возможного дополнительного анализа стоимости проживания на территории и уводит его из аспектов субъективных оценочных суждений, которые могут возникнуть при рассмотрении дохода, однако при этом позволяет рассмотреть размер экономики территории по отношению к населению. Отечественная разработка также оправдывает и допускает наш подход в рамках оценки экономической составляющей, где используется показатель ВВП (ВРП) на душу населения [*Горбунова*, 2013].

Блок продолжительность жизни предлагается расширить индексом общественного здоровья, состоящим из показателей ожидаемой продолжительности жизни женщин и мужнин, а также младенческой смертностью. Данный индекс апробирован в научных исследованиях и является полезным инструментом при оценке условий и качества жизни человека [*Колосницына*, 2019].

Наибольшему переосмыслению подвергся блок образования, который, согласно классической методике, является наиболее неоднозначным и противоречивым. Смещение акцентов на школьное образование и в целом на грамотность населения вполне оправдано при оценке индекса в масштабах всего мира, когда в исследовании принимают участие беднейшие страны, где проблема отсутствия даже базового образования и низкого уровня грамотности действительно ярко выражена [*Ломакина*, 2013].

В случаях, когда исследование направлено на рассмотрение стран только с высоким и очень высоким уровнем человеческого развития, подобный подход может потерять свою ярко выраженную работоспособность вследствие повсеместно высоких значений уровня грамотности населения, а также наличием обязательного минимального уровня образования, декларируемого на государственном уровне. Это особенно актуально для нашего исследования, поскольку, согласно докладу о человеческом развитии, ни одна из рассматриваемых нами стран не находится на низком или даже среднем уровне по ИЧР.

Правильность подобных рассуждений подтверждает также пересмотр блока образования в отечественной адаптации ИЧР, составленного ООН. Даже в разрезе федеральных округов России показатель грамотности населения практически не имеет ярко выраженной дифференциации и повсеместно имеет значение более 99 % [*Бирюков*, 2016], в то время как показатель «доля учащихся в возрасте 7–24 лет» имеет скорее демографический характер, явно не относящийся к самому понятию человеческого развития.

Для решения данных проблем предложено произвести смещение акцентов с уровня школьного образования на более высокие его ступени. Такой подход направлен на рассмотрение человеческого развития и реализации в рамках уровней образования, не являющихся обязательными, а выбираемых самим человеком.

Были использованы следующие показатели: число лиц с высшим и средним образованием в доле работоспособного населения в возрасте от 16 до 25 лет и число безработных лиц, имеющих высшее и среднее образование, по отношению к работоспособному населению. Таким набором характеризуется эффективность самой системы образования, сложившейся в стране, с позиций реализации человеческого

потенциала. Все данные были взяты из международных баз региональных и страновых данных таких организаций, как ОЭСР[1] и Евростат[2], а также дополнены данными национальных статистических агентств. Была предложена многоуровневая концепция расчета ИЧР для проведения правомерных межтерриториальных сравнений (рис. 3).

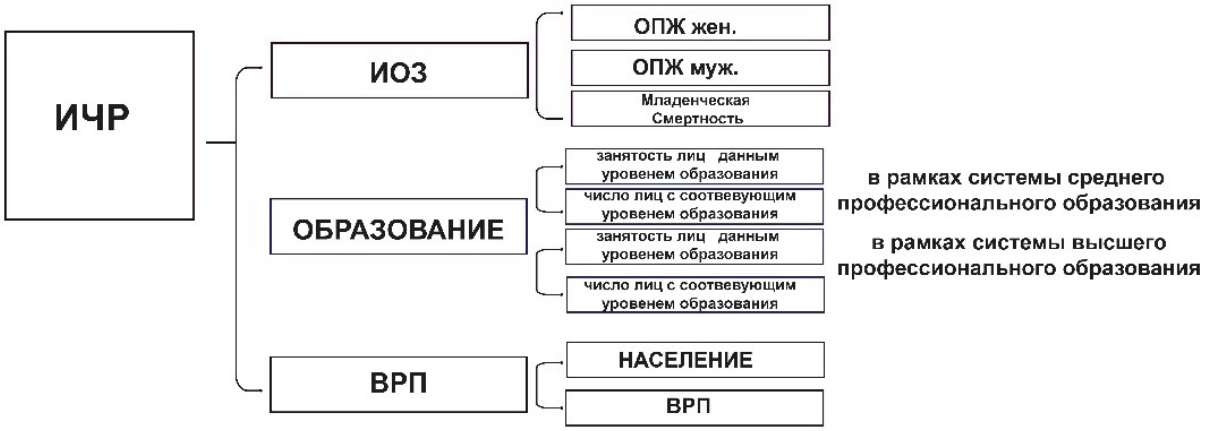


Рис. 3. Многоуровневая концепция расчета ИЧР для межтерриториальных сравнений
Fig. 3. Multilevel concept of HDI calculation for interterritorial comparisons

После определения тематического набора индикаторов стало возможным приступить к процессу геоинформационного моделирования, который потребовал разработки цифровой картографической основы и выбора математического аппарата моделирования.

Проведение геоинформационного моделирования ИЧР для правомерных межтерриториальных сравнений на уровне стран и их регионов требует интеграции базовых пространственных и статистических социально-экономических данных. При этом процесс интеграции на первом этапе базируется на актуализации базы пространственных данных [*Тикунов* и др., 2023].

Была разработана цифровая картографическая основа, отображающая современное состояние населенных пунктов, дорожной сети, административных границ и ряда прочих общегеографических объектов, типичных для социально-экономической картографии. Это было осуществлено с опорой на единицы статистического учета наднациональных статистических агентств [*Тулохонов*, 2007]. Особое внимание при разработке основы уделено сетке административных границ, которая является связующим звеном между пространственными данными и набором первичных социально-экономических индикаторов.

Согласно опыту исследований регионов России и стран Евросоюза, основная сетка регионов стран выбиралась согласно европейскому стандарту учета территориальных единиц уровня NUTS-2[1] (регионы второго уровня — «средней величины») [*Игонин*, 2012], которые опираются на единицы статистического учета, а также на программы ведения национальной и региональной политики. Учитывая данный опыт, на глобальном уровне были использованы стандарты статистической организации ОЭСР.

Территориальные сетки (TL2 и TL3) официально установлены и относительно стабильны во всех странах — членах ОЭСР и используются многими в качестве основы для

[1] OECD.Stat. Электронный ресурс: https://stats.oecd.org/ (дата обращения 01.06.2021).
[2] Eurostat (European Statistical Office; DG ESTAT). Электронный ресурс: https://ec.europa.eu/eurostat/ (дата обращения 01.06.2021).

реализации региональной политики, а также являются единицами статистического учета на региональном уровне[1].

Регионы в 38 странах ОЭСР классифицируются по двум территориальным уровням, отражающим административную организацию стран. 391 крупный регион ОЭСР (TL2) представляет собой первый административный уровень субнационального управления, 2 197 малых регионов ОЭСР (TL3) включены в регион TL2 и представляют второй административный уровень. Регионы TL3 соответствуют административным регионам, за исключением Австралии, Канады, Германии и Соединенных Штатов. Все регионы определены в пределах национальных границ[2].

Для стран, не входящих в ОЭСР, были определены только регионы TL2 для Колумбии и Российской Федерации, тогда как для Латвии и Литвы TL3 получены из европейского стандарта NUTS[1,2].

При создании основы уделено внимание системе связей базовой картографической основы и набора индикаторов на глобальном уровне для обеспечения достоверности, сопоставимости и автоматизированной обработки информации в разрезе административно-территориального деления.

Специально для проведения исследования был создан классификатор, построенный по иерархичной системе, когда все множество объектов административно-территориального деления подразделяется на группы согласно территориальному делению, и эти группы располагаются по двум уровням классификации в соответствии с административной подчиненностью, причем в каждый уровень включаются объекты, непосредственно подчиненные объектам предыдущего уровня.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первый уровень классификации включает 38 государств, участвующих в моделировании. Согласно кодировке, принятой ОЭСР, каждая страна имеет свой уникальный цифровой код, который и используется для связи базовой картографической основы с базой индикаторов.

Ко второму уровню классификации относится 421 регион стран, включенных в моделирование. Причем в рамках базы данных ОЭСР каждый регион страны имеет собственный индикационный номер, характерный только для данной территориальной единицы.

Путь создания трехзначного или четырехзначного итогового индикатора делает данную систему непротиворечивой и упорядоченной. В нижеприведенном изображении показан фрагмент базы глобальных данных на базовой картографической основе, выделенные регионы соответствуют АТД Чехии. Четырехзначный индикатор территории принимает вид 1604, где первые две цифры — код, принятый для страны, к которой данные регионы относятся, вторые две — уникальное значение самой территориальной единицы. В случае если индикатор страны не превышает двузначных значений, индикатор региона будет трехзначным соответственно. Подобная система хорошо подходит для проведения межтерриториальных сравнений, при необходимости — единовременного учета как странового, так и регионального уровня (рис. 4).

Таким образом формируется уникальная базовая картографическая основа, полностью отвечающая возможным задачам как национального, так и регионального анализа, а также территориального управления (рис. 4–5).

---

1 NUTS — Nomenclature of territorial units for statistics. European Commission. Электронный ресурс: https://ec.europa.eu/eurostat/web/regions-and-cities/overview (дата обращения 25.04.2023).

2 Организация экономического сотрудничества и развития (ОЭСР). Электронный ресурс: https://anticor.hse.ru/main/organization/OECD?ysclid=llr01xroqk298084701 (дата обращения 25.04.2023).

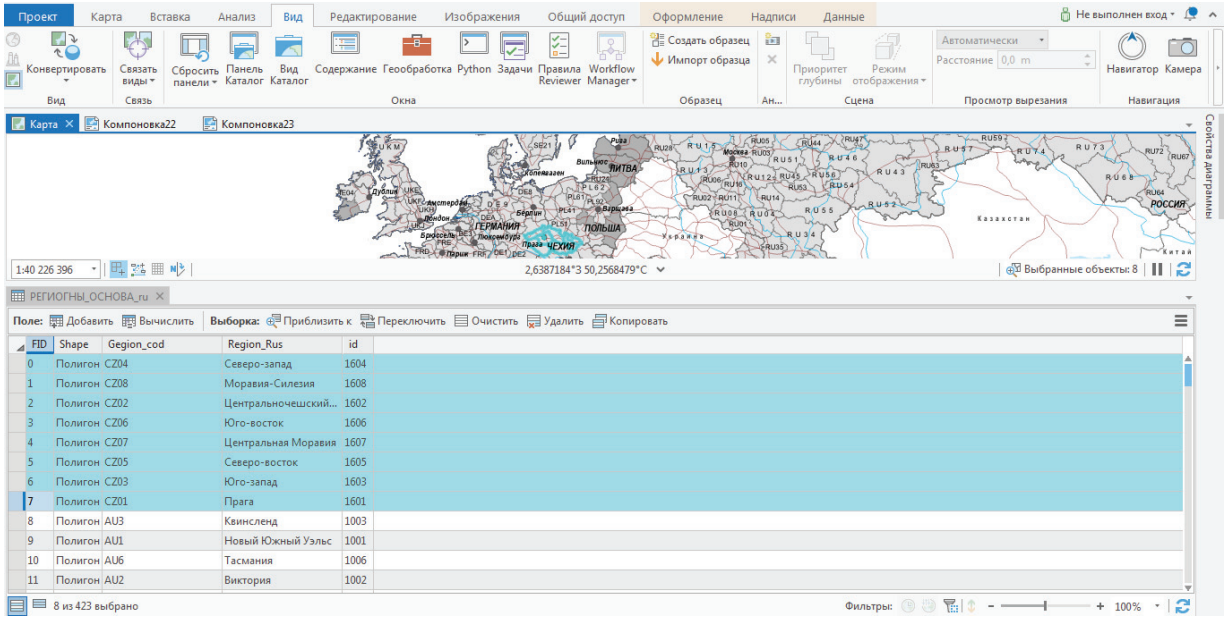


Рис. 4. Региональная кодировка согласно разработанной классификации
Fig. 4. Regional coding according to the developed classification

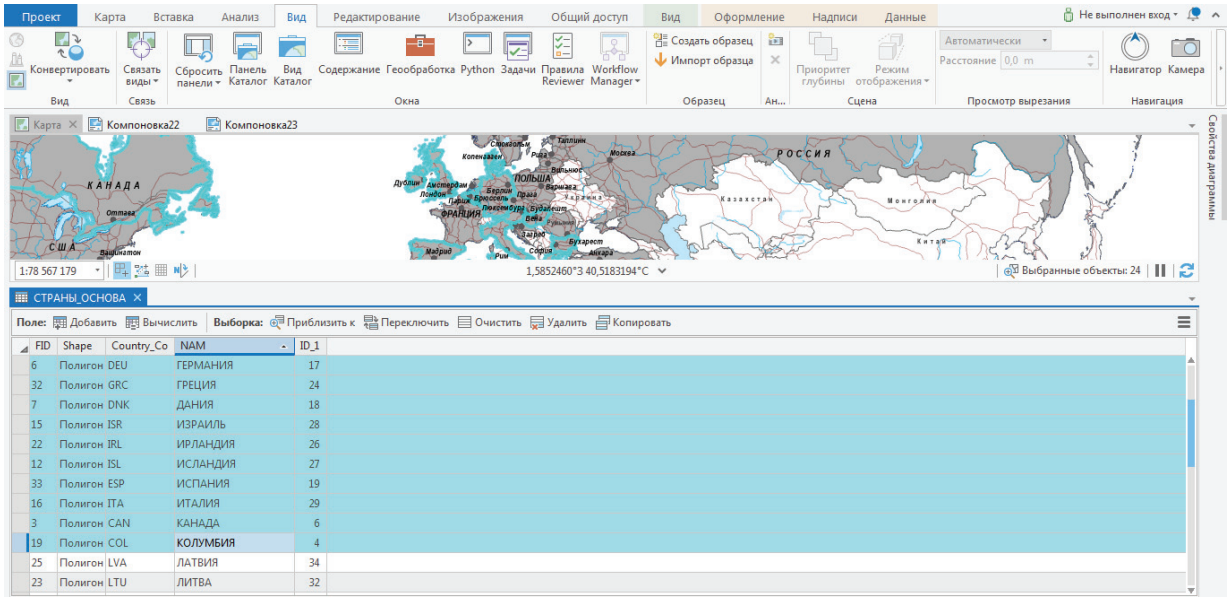


Рис. 5. Страновая кодировка согласно разработанной классификации
Fig. 5. Country coding according to the developed classification

На основании первого элемента геоинформационной модели можно осуществлять сам процесс моделирования (рис. 6–7).

Рис. 6. Фрагмент базовой картографической основы, часть 1
Fig. 6. Fragment of the basic cartographic framework, part 1

Рис. 7. Фрагмент базовой картографической основы, часть 2
Fig. 7. Fragment of the basic cartographic framework, part 2

Далее наступил черед выбора математического аппарата моделирования. На взгляд авторов наиболее подходящим инструментарием расчета территориальных индексов являются алгоритмы математико-картографического моделирования, которые обеспечивают непосредственную связь индикаторов, участвующих в расчете интегрального индекса с территориальной единицей [*Тикунов*, 1997]. Данные алгоритмы имеют широкое научное признание, однако их использование в рамках учета странового и регионального уровня будет сопровождаться определенными особенностями, ранее не раскрытыми при работе на региональном или страновом уровне по отдельности [*Тимонин*, 2015].

Рассмотрим основные особенности данного алгоритма через возможную технологическую схему его реализации для геоинформационного моделирования ИЧР.

На первом этапе пользователь, моделирующий соответствующий индекс, обращается к базе социально-экономических индикаторов и отбирает необходимые данные для расчета индекса, согласно его задаче.

Необходимость правомерных межтерриториальных сравнений в рамках моделирования по оценочному алгоритму во многом описывается впервые, что может создать специфические изменения самой технологии расчета.

Применительно к классической методике, первым этапом моделирования является нормировка индикаторов согласно формуле (1):

$$\hat{x}_{ij} = \frac{\left|x_{ij} - x_j^0\right|}{\left|\max/\min x - x_j^0\right|}, \quad i = 1,2,3,\ldots,N, \quad j = 1,2,3,\ldots,M, \tag{1}$$

где x — наихудшее значение (по каждому показателю) из всех встречающихся с точки зрения их влияния на разрабатываемый индекс.

Так, при расчете индекса ИЧР, а именно — индекса общественного здоровья в рамках наихудших значений показателей, характеризующих процессы смертности, требуется брать максимальные значения младенческой смертности $_{\max/\min}x$ — наиболее отличающиеся от $x0$ значения показателей; n — количество исследуемых территориальных единиц [*Прохоров*, *Тикунов*, 2005].

Здесь заложена ключевая особенность моделирования на данном уровне исследования, которая заключается в необходимости одномоментного учета показателей как стран, так и их регионов, вследствие чего до этапа расчета нормировок встает задача создания технического картографического спаянного слоя, содержащего все 454 территориальные единицы. Данный слой был специально разработан для нашего исследования. Разработанная и описанная система кодировок территорий максимально соответствует решаемой задаче. Упомянутый слой участвует лишь в расчетах, используется как технический и в дальнейшем как самостоятельный тематический слой при картографировании результатов моделирования не участвует. Но он играет большую роль в рамках расчета страновых и региональных показателей как единого массива; m — число показателей, использованных для расчетов, индивидуальное для каждого индекса.

Таким образом, на первом этапе исследователю необходимо создать технический картографический слой на основе геоинформационной модели, база данных которого содержит все территориальные единицы и приуроченные к ним пространственно-распределенные социально-экономические индикаторы, задействованные в исследовании, а также провести двухэтапную свертку показателей по методу главных компонент.

На следующем этапе работы на базе нормированных показателей в рамках спаянного слоя производится ранжирование каждой территориальной единицы путем сравнения показателей всех территориальных единиц с условной наихудшей. Оно осуществляется с использованием евклидовых расстояний (d^0) как меры близости всех территориальных единиц к условной, имеющей наихудшие значения (x) по всему комплексу показателей. Использование координатного пространства также способствует учету непосредственной связи каждого индикатора с территориальной единицей в процессе моделирования индексов [*Прохоров*, *Тикунов*, 2005].

С целью более корректной агрегации всех индикаторов в сводный индекс использование данного алгоритма требует дополнительной обработки информационного массива индикаторов и приуроченных к ним территорий с использованием машинного обучения по методу главных компонент для ортогонализации и свертки системы показателей.

Полученные значения вектора-столбца d^0 интегральных оценочных характеристик для удобства дальнейшего анализа были дополнительно нормированы по формуле (2):

$$\hat{d}_i^0 = \frac{d_i^0 - \min d^0}{\max d^0 - \min d^0}, \qquad i = 1, 2, 3, \ldots, n. \tag{2}$$

Величина d^0 варьируется в пределах от нуля до единицы (нуль соответствует наихудшей комплексной оценке, единица — наилучшей). На ее основании производится дальнейший содержательный географический анализ результатов моделирования в рамках образованных тематических слоев картографической модели, отличающейся информационным контентом от базовой. Пользователь в итоге получает новый тематический слой, содержащий значения смоделированного интегрального индекса.

Далее данный алгоритм может использоваться в рамках двух основных направлений. Одно из этих направлений используется для получения индивидуализированной характеристики каждой территориальной единицы путем получения значения положения территориальной единицы при сравнении ее с элементами всей системы.

Алгоритм в подобной интерпретации позволяет создавать ценный материал для комплексной оценки территориального развития, поскольку включает все многообразие территориальных единиц и их индивидуальность.

Для более детального и глубоко анализа социально-экономического развития территории через применение территориальных индексов с возможностью рассмотрения внутренней структуры индекса и понимания процессов, происходящих в территориальной социально-экономической системе, необходимо обращение к типологическому алгоритму [*Тикунов*, 1997].

На первом этапе, как и в оценочном алгоритме, необходимо выбирать базовый набор индикаторов, на основе которого и будет вестись реализация алгоритма. Набор данных также должен быть из спаянного слоя, содержащего все 454 территориальные единицы.

В рамках данного исследования была установлена еще одна специфическая особенность геоинформационного моделирования социально-экономических индексов. Для многоуровневых интегральных индексов, таких как ИЧР, должны быть рассчитаны самостоятельные индексы для каждого индикатора на основе оценочного алгоритма (индекса ВРП на душу населения, индекса общественного здоровья, а также блока образования), на значения которых будет опираться типологический алгоритм. Далее также

производится нормировка исходных данных, но, в отличие от оценочного алгоритма, она производится по дисперсиям согласно формуле (3):

$$\hat{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - \overline{x_j}}{\sigma_j} \quad \overline{x_j} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_{ij}\,; \quad \sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_{ij} - \overline{x_j})^2} \tag{3}$$

$$i = 1,2,3,\dots,n; j = 1,2,3,\dots,m;$$

На следующем этапе рассчитывается матрица для расчета евклидовых расстояний (d_{ik}), соединяющих каждую пару включенных в расчет участков границ и отражающих их различия по формуле (4):

$$d_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^{m}\left(\hat{x}_{ij} - \hat{x}_{kj}\right)^2}, i = 1,2,3,\dots,n; j = 1,2,3,\dots,m; \tag{4}$$

В самом простом случае реализация типологической классификации заключается в следующем: из полученных значений d_{ik} выбирается наибольшее расстояние, а две территориальные единицы, которые оно связывает, становятся ядрами однородных типов (таксонов). Таксоны формируются распределением остальных регионов между двумя ядрами по минимальности евклидовых расстояний.

В случае выделения большего числа таксонов на первом этапе для выделения третьего ядра и в последующих каждую из всех оставшихся территориальных единиц подставляют в виде ядра, а остальные распределяются между требуемым числом ядер по минимальности d_{ik} и находится вариант с наименьшими внутригрупповыми различиями [*Игонин*, *Тикунов*, 2019].

Для каждого варианта группировки подсчитывается сумма внутригрупповых различий и тот вариант, который дает наименьшую сумму, принимается в качестве окончательного, а территориальная единица, служившая ядром, фиксируется как окончательное третье ядро. Процедура продолжается аналогично для формирования четырех, пяти, шести и т. д. однородных групп [*Игонин*, *Тикунов*, 2019].

На каждом шаге определяется новое ядро и формируется новая группировка. Получаемый ряд группировок можно анализировать на основе абсолютного и относительного коэффициентов неоднородности и с их помощью выбирать оптимальное количество таксонов [*Игонин*, 2019].

В рамках реализации данного алгоритма мы получаем, помимо распределения территориальных единиц по типам, таблицы, содержащие групповые характеристики внутренних структур каждого типа, которые крайне полезны при комплексном анализе территориальных единиц при расчете социально-экономических индексов.

На завершающем этапе пользователем формируется новый тематической слой, содержащий атрибутивную информацию согласно установленному в процессе моделирования типу территории.

Особо отметим, что типологический алгоритм не моделирует само значение индекса, он позволяет проводить содержательный анализ выделенных типов для комплексной характеристики территории. Она требует обязательного комплексирования оценочной и типологической картографической модели. Данное действие является типичным с позиций составления общих социально-экономических карт [*Салищев*, 1990] и позволяет

рассматривать индивидуальные оценочные значения индексов в сочетании с внутренней структурой индексов, характеризующих типы территорий. Это позволяет обоснованно установить социально-экономические процессы, происходящие на территории с разным уровнем индексов социально-экономического развития.

Таким образом, нами были получены две картографические модели: оценочная и комплексная оценочно-типологическая.

Рассмотрим правомерность результатов моделирования на примере оценочной модели 1 (рис. 8). На ней отчетливо прослеживается скопление высоких значений в регионах стран Западной и Северной Европы, что видно и при изучении странового уровня; наиболее высокими значениями индекса обладают Финляндия, Швеция, Германия, Австрия и Исландия. Отметим, что данные страны не имеют четко выраженной территориальной дифференциации на региональном уровне.

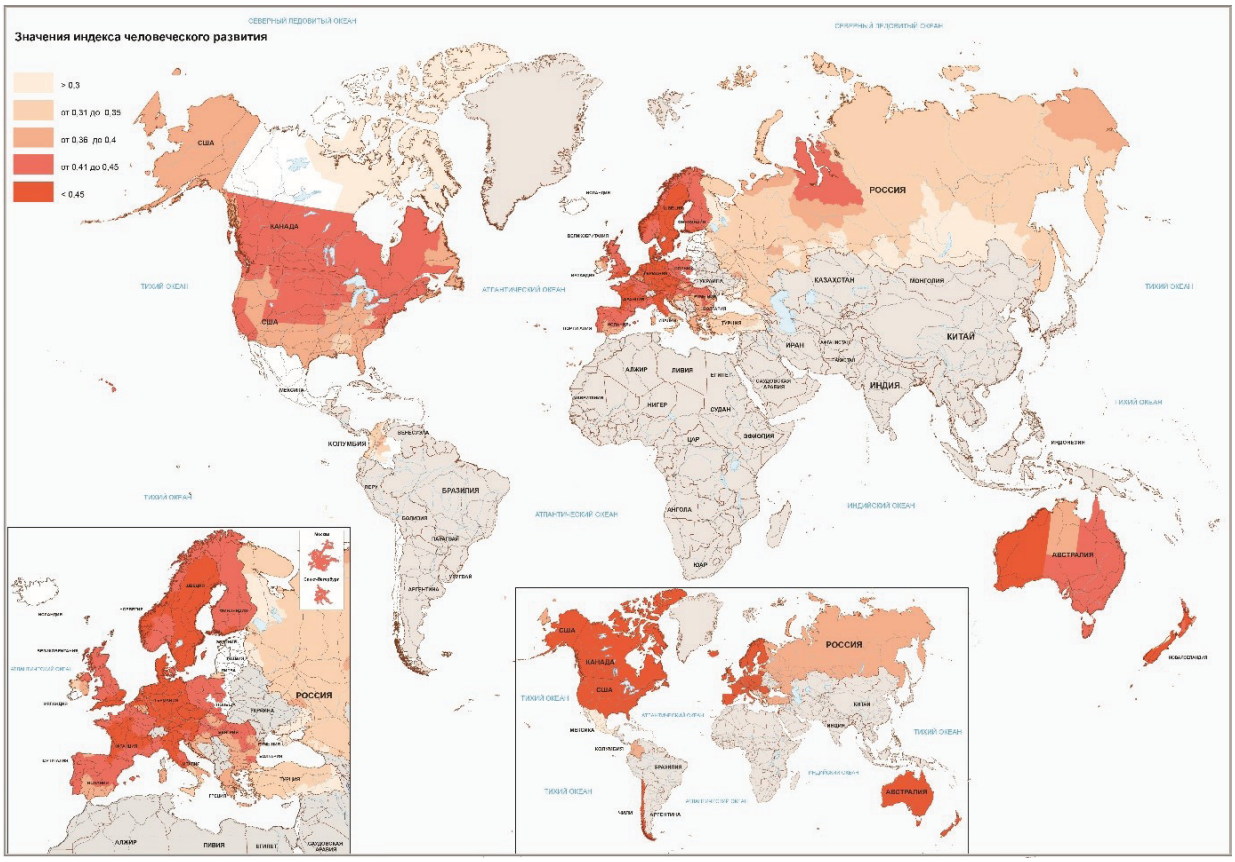


Рис. 8. Оценочная картографическая модель индекса человеческого развития (модель 1)
Fig. 8. Estimated cartographic model of the human development index (model 1)

Следующую группу образуют регионы таких стран, как США, Австралия, Новая Зеландия, Канада, страны Южной и Восточной Европы. Отметим, что территориальная дифференциация данных стран более выражена, например — четко выражена дифференциация северных и южных штатов США. Происходит заметное снижение показателя ИЧР по направлению на юг и восток в регионах стран Европы.

К странам с низкими значениями ИЧР относятся Россия, Турция и Колумбия. Отметим, что регионы азиатской южной границы в России образуют целый агломерат территорий с минимальными значениями ИЧР, которые не достигают 0,3.

Схожая ситуация характерна и для Турции, где имеется скопление таких регионов у границы со странами ближнего Востока.

В целом подобная картина вполне согласуется с общими представлениями о географии ИЧР и может быть использована для дальнейшего комплексного анализа. Оформление результатов проводится через сочетание двух способов: штриховок и фоновой заливки или двух фоновых заливок с осветлением одной из них.

Традиционные взгляды в картографии говорят о плохой сочетаемости фоновых методов как способа комплексирования типологических и оценочных моделей. Наилучшим вариантом комплексирования моделей является создание окантовок контуров полигонов, а также проведение простейшей с позиций геоинформационного моделирования операции — слияния полигонов по единому атрибуту в рамках типологической модели. Путем применения данной методики была получена комплексная картографическая модель 2 (рис. 9).

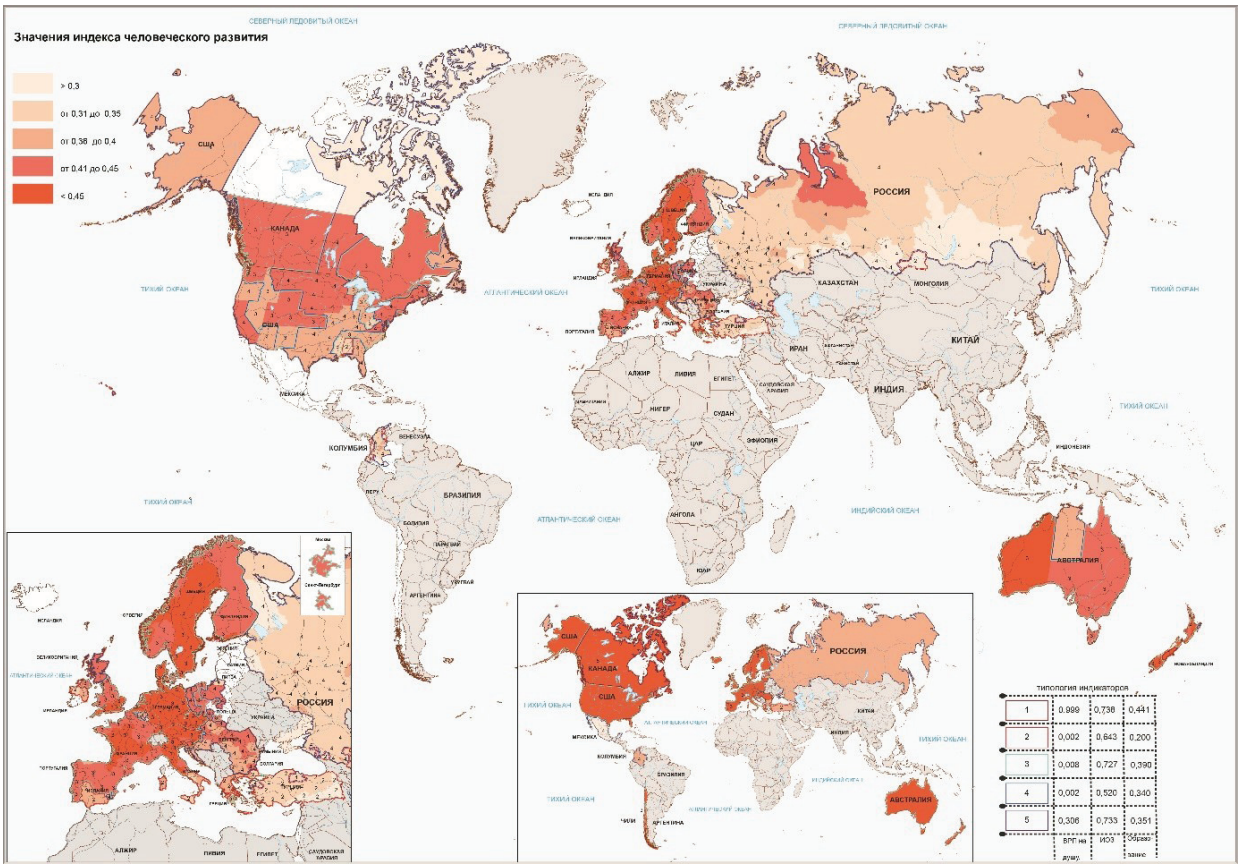


Рис. 9. Комплексная модель картографическая модель индекса человеческого развития (модель 2)
Fig. 9. Complex model cartographic model of the human development index (model 2)

Был проведен содержательный анализ полученных результатов на основании комплексной картографической модели в рамках влияния каждого индикатора на значения интегрального индекса. Данный анализ позволил составить содержательные расшифровки для каждого типа территории, представленные на модели 2:

- первый тип — максимальные значения индексов ВРП, ИОЗ и образования;
- второй тип — территории с минимальными значениями индекса ВРП на душу населения, высокими значениями ИОЗ, минимальными значениями индекса образования;
- третий тип — территории с очень высокими значениями ИОЗ и индекса образования, с невысокими значениями индекса ВРП на душу населения;
- четвертый тип — территории со сниженными значениями ИОЗ, пониженными значениями индекса образования и минимальными значениями индекса ВРП;
- пятый тип — высокие значения индекса ВРП, ИОЗ и образования.

На этом этапе работ дается оценка типов.

Первый тип распространен в единственном регионе, который имел лидирующие значения во всех рассчитываемых индексах за исключением индекса размера. Данный регион — Кентербери отличается очень высокими значениями интегрального индекса с максимальными возможностями для реализации человеческого развития.

Второй тип характерен преимущественно для территорий с минимальными значениями ИЧР; к таким территория относятся: Республика Адыгея, юго-восточная часть Турции и др. На таких территориях высокая доля ИОЗ может свидетельствовать о благоприятном климате, хороших условиях окружающей среды, а также хорошей работе системы здравоохранения. Но они отличаются колоссальными проблемами в системе образования и в экономической сфере.

Третий тип территорий имеет основное распространение на территориях со значениями ИЧР выше среднего, от 0,351 до 0,4: в основном это регионы Европейских стран, а также крупнейшие города России — Москва и Санкт-Петербург. Для таких территорий характерны проблемы в экономической сфере и образовательной компоненте, при этом социальные условия согласно ИОЗ развиты хорошо. Данный аспект может указывать на недостаточность размера экономики в рамках системы образования для полноценной реализации человеческого развития, при этом показатели социальной сферы достаточны для поддержания высоких значений ИЧР. Страновой анализ данной группы показал, что в нее попали страны Европы и США, что может говорить о проблемах в национальном управлении. Однако высокие значения ИОЗ свидетельствуют о высоком уровне развития социальной сферы в целом.

Отличительная особенность 4 типа сразу же выделяется при анализе модели и заключается в его распространении исключительно на территориях со значениями ИЧР ниже среднего (от 0,31 до 0,35) и на некоторых территориях с более высокими значениями, исключительно локализованными в странах Восточной Европы — Болгарии, Румынии, а также скоплении северных штатов США и во всех регионах России, за редким исключением. На страновом уровне данный тип представлен Болгарией, Румынией, Россией, Мексикой и Колумбией. Для таких территорий, учитывая средние и нижние значения ИЧР и типологию значений индикаторов, можно выделить следующие отличительные признаки с позиции социально-экономических процессов: явно наблюдаемые проблемы в экономической сфере, ощутимые проблемы в системах высшего и среднего образования в аспектах их эффективности, а также общественного здоровья, что говорит о комплексе проблем, связанных с человеческим развитием. Для лиц, принимающих управленческие решения, такие территории могут говорить о том, что на них необходимы системные решения, способные улучшить всю социально-экономическую сферу.

Пятый тип представлен исключительно на страновом уровне. Принимая во внимание схожесть данного типа с территориальной единицей первого уровня, мы приходим к выводу, что в данной группе находятся наиболее успешные страны с наиболее

благоприятными условиями для реализации человеческого развития; к таким странам относится Канада.

Таким образом, путем комплексирования оценочных и типологических характеристик, можно оценить значения индикаторов с позиции их внутренней структуры, установить социально-экономические процессы, происходящие с привязкой к уровням значений глобального уровня человеческого развития.

ВЫВОДЫ

В рамках исследования был произведен анализ международных и национальных инициатив расчета индекса человеческого развития, была установлена существенная разница в тематическом содержании и невозможность использования данных систем для правомерных межтерриториальных сравнений на страновом и региональном уровнях единовременно.

Была разработана многоуровневая система индексов для получения значений интегрального уровня индекса человеческого развития. На ее основании определен состав тематических индикаторов, полностью отвечающих требованиям проведения межтерриториальных сравнений на страновом и региональном уровнях, разработана иерархическая система территориальных индикаторов в геоинформационной модели.

Рассмотрены особенности проведения геоинформационного моделирования, выявлены основные особенности данного моделирования в рамках единовременного учета странового и регионального уровня, что позволило обогатить представления о классических с позиций картографии алгоритмах математико-картографического моделирования.

Созданные оценочные, типологические и комплексные картографические модели показали свою высокую эффективность для географического анализа смоделированных индексов. В рамках картографирования и анализа предложены авторские решения комплексирования оценочной и типологической модели, позволившее детально рассмотреть типологическую принадлежность территории и выявить все разнообразие территориальной дифференциации оценочных значений для каждого типа.

Созданные картографические модели позволили вывить уровни развития территорий и описать возможные происходящие процессы, установить наиболее проблемные аспекты с позиций человеческого развития.

В результате проведенного анализа смоделированный индекс доказал свои достоверность и соответствие общим представлениям социально-экономической географии. Это является подтверждением не только правомерности самого подхода к определению тематического содержания, но и возможности его расчета при геоинформационном моделировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бирюков И.Г. Дифференциация российских регионов по уровню человеческого развития. Мир науки и образования, 2016. № 1(5). С. 79–96.

Горбунова О.Н. ИЧР: методологии расчета, показатели и индикаторы. Социально-экономические явления и процессы, 2013. № 3(49). С. 49–53.

Игонин А.И., Тикунов В.С. Математико-картографическое моделирование и картографирование демографической ситуации в регионах Европы и России. Наука. Инновации. Технологии, 2019. № 3. С. 115–130.

Иконникова О.В. Развитие теории человеческого капитала: общественно исторические и экономические аспекты. Проблемы современной экономики, 2012. № 4. С. 443–446.

Колосницына М.Г. Факторы роста ожидаемой продолжительности жизни: кластерный анализ по странам мира. Демографическое обозрение, 2019. Т. 6. № 1. С. 124–150.

Косьмин А.Д., Кузнецова О.П., Косьмина Е.А. Краткий обзор подходов к измерению человеческого развития. Российское предпринимательство, 2017. № 10. С. 1615–1636. DOI: 10.18334/rp.18.10.37968.

Ломакина Т.Ю. Концептуальные подходы формирования образовательной траектории личности в системе непрерывного образования. Отечественная и зарубежная педагогика, 2013. № 6(15). С. 260.

Салищев К.А. Картоведение: учебник, 3-е изд. М.: МГУ, 1990. 400 с.

Суринов А.Е., Луппов А.Б. Неравенство по доходам в России. Измерение на основе эквивалентного дохода. Экономический журнал ВШЭ, 2020. № 4. С. 539–571. DOI: 10.17323/1813-8691-2020-24-4-539-571.

Тикунов В.С. Моделирование в социально-экономической картографии. М.: Издательство Московского университета, 1985. 280 с.

Тикунов В.С. Моделирование в картографии: учебник для студентов, обучающихся по направлению «География», специальность «Картография». М.: Издательство Московского университета, 1997. 403 с.

Тимонин С.А. Математико-картографическое и геоинформационное моделирование демографических процессов в регионах Российской Федерации. Вестник Московского университета. Серия 5: География, 2010. № 5. С. 11–18.

Тулохонов А.К., Бешенцев А.Н., Лубсанов А.А. Создание геоинформационных ресурсов на основе ретроспективных топографических карт. Вычислительные технологии, 2007. Т. 12. № S3. С. 100–107.

Янгирова Е.И., Искаков М.Р. Оценка человеческого развития в Российской Федерации. Уровень жизни населения регионов России, 2022. № 2. С. 147–150.

REFERENCES

Biryukov I.G. Differentiation of Russian regions by the level of human development. The World of the Science and Education, 2016. No. 1(5). P. 79–96 (in Russian).

Gorbunova O.N. HDI: Calculation methodologies, indicators and indicators. Socio-economic Phenomena and Processes, 2013. No. 3(49). P. 49–53 (in Russian).

Igonin A.I., Tikunov V.S. Mathematical cartographic modeling and mapping of the demographic situation in the regions of Europe and Russia. Science. Innovations. Technologies, 2019. No. 3. P. 115–130 (in Russian).

Ikonnikova O.V. Development of the theory of human capital: Socio-historical and economic aspects. Problems of Modern Economics, 2012. No. 4. P. 443–446 (in Russian).

Kolosnitsyna M.G. Factors of life expectancy growth: Cluster analysis by countries of the World. Demographic Review, 2019. V. 6. No. 1. P. 124–150 (in Russian).

Kosmin A.D., Kuznetsova O.P., Kosmina E.A. A brief overview of approaches to measuring human development. Russian Entrepreneurship, 2017. No. 10. P. 1615–1636 (in Russian). DOI: 10.18334/rp.18.10.37968.

Lomakina T.Y. Conceptual approaches to the formation of the educational trajectory of the individual in the system of continuing education. Domestic and Foreign Pedagogy, 2013. No. 6(15). P. 260 (in Russian).

Salishchev K.A. Cartography: Textbook. 3rd ed. Moscow: MSU, 1990. 400 p. (in Russian).

Surinov A.E., Luppov A.B. Income inequality in Russia. Measurement based on equivalent income. HSE Economic Journal, 2020. No. 4. P. 539–571 (in Russian). DOI: 10.17323/1813-8691-2020-24-4-539-571.

Tikunov V.S. Modeling in socio-economic cartography. Moscow: Moscow University Press, 1985. 280 p. (in Russian).

Tikunov V.S. Modeling in cartography: A textbook for students studying in the direction of "Geography", spec. "Cartography". Moscow: Moscow University Press, 1997. 403 p. (in Russian).

Timonin S.A. Mathematical-cartographic and geoinformation modeling of demographic processes in the regions of the Russian Federation. Moscow University Bulletin. Series 5: Geography, 2010. No. 5. P. 11–18 (in Russian).

Tulokhonov A.K., Beshentsev A.N., Lubsanov A.A. Creation of geoinformation resources based on retrospective topographic maps. Computational Technologies, 2007. V. 12. No. S3. P. 100–107 (in Russian).

Yangirova E.I., Iskakov M.R. Assessment of human development in the Russian Federation. Living Standards of the Population in the Regions of Russia, 2022. No. 2. P. 147–150 (in Russian).

УДК: 551.582.2 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-73-87**

Т.П. Варшанина[1], **Е.П. Свиридова**[2], **В.Ю. Пьянков**[3]

ФАКТОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДАННЫХ ГИС «ПАСПОРТ КЛИМАТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕСПУБЛИКИ АДЫГЕЯ»

АННОТАЦИЯ

Исследование направлено на определение оптимальной структуры данных системы регионального мониторинга и прогнозирования изменения климата и связанных с этим погодно-климатических рисков для социально-экономической инфраструктуры Республики Адыгеи. Базовыми пространственными единицами мониторинга определены ландшафтно-климатические районы, выделенные по сочетанию факторов, корректирующих зональный режим хода метеорологических процессов на Северо-Западном Кавказе в условиях горно-равнинной Адыгеи. Относительно ландшафтно-климатических районов выявлены различия как в изменении климатических параметров в многолетнем и в годовом ходе, так и в повторяемости и степени выраженности опасных и неблагоприятных гидрометеорологических процессов. Предварительные исследования изменения климата в Адыгее и результаты реанализа выявили устойчивый тренд потепления климата, особенно интенсивное за последние 20 лет (1,2 °С/10 лет), обусловленное повышением температуры в холодную половину года при слабом изменении температуры теплого периода. Резкое повышение температуры воздуха за последние два десятилетия выдвигает на первый план проблему современного изменения климата и его последствий. Получены результаты, доказывающие когерентность хода параметров энергетического поля приземной атмосферы (градиентного поля температуры) с ходом параметров выраженности гидрометеорологического явления в точке прогнозирования. Предлагается в моделях прогнозировании гидрометеорологических явлений и процессов различной заблаговременности в качестве предиктора использовать величину регионального градиента температуры, отражающую динамику термического поля региона. Успешное долгосрочное прогнозирование погодно-климатических явлений обеспечит выполнение тех функций, которым предназначен «Паспорт климатической безопасности».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: климатическая безопасность региона, ландшафтно-климатическое районирование, тренды климатических изменений, структура данных ГИС «Паспорта климатической безопасности»

[1] Адыгейский государственный университет, НИИ комплексных проблем АГУ, Центр интеллектуальных геоинформационных технологий, ул. Гагарина, д. 13, Майкоп, Россия, 385000, *e-mail:* **vtp01@mail.ru; gic-info@yandex.ru**

[2] Адыгейский государственный университет, НИИ комплексных проблем АГУ, Центра интеллектуальных геоинформационных технологий, ул. Гагарина, д. 13, Майкоп, Россия, 385000, *e-mail:* **gic-info@yandex.ru**

[3] Адыгейский государственный университет, НИИ комплексных проблем АГУ, Центра интеллектуальных геоинформационных технологий, ул. Гагарина, д. 13, Майкоп, Россия, 385000, *e-mail:* **gic-info@yandex.ru**

Tatyana P. Varshanina[1], **Elena P. Sviridova**[2], **Vladislav Yu. Piankov**[3]

CARTOGRAPHIC AND FACTUAL SUBSTANTIATION OF THE DATA STRUCTURE OF THE GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM «CLIMATE SAFETY PASSPORT OF THE REPUBLIC OF ADYGEA»

ABSTRACT

The study is aimed at determining the optimal data structure of the regional monitoring and forecasting system of climate change and related weather and climate risks for the socio-economic infrastructure of the Republic of Adygea. The basic spatial units of monitoring identified landscape and climatic regions, allocated according to a combination of factors correcting the zonal mode of meteorological processes in the North-West Caucasus under the conditions of the mountain-plain Adygea. With regard to landscape and climatic areas, differences have been identified in both the variation of climatic parameters in the multi-year and annual course, and in the recurrence and severity of hazardous and adverse hydrometeorological processes. Preliminary studies of climate change in Adygea and the results of reanalysis have revealed a steady trend of warming of the climate, especially intensive in the last 20 years (1.2 °C/10 years), caused by the increase of temperature in the cold half of the year, at a low temperature change of the warm period. The dramatic increase in air temperature over the past two decades highlights the challenge of current climate change and its impacts. The results proving coherence of the course of parameters of the energetic field of the ground atmosphere (gradient field of temperature) with the course of parameters of intensity of the hydrometeorological phenomenon at the forecasting point have been obtained. It is proposed to use the regional temperature gradient value reflecting the dynamics of the thermal field of the region as a predictor in models of forecasting hydrometeorological phenomena and processes of different advance. Successful long-term forecasting of weather-climatic phenomena will provide the fulfillment of those functions, which are intended «Climate Safety Passport».

KEYWORDS: climatic security of the region, landscape climatic zoning, climate change trends, climate prediction, the structure of the geographic information system «Climate Safety Passport»

ВВЕДЕНИЕ

В современных представлениях обеспечение климатической безопасности заключается в прогнозировании изменений климата, связанных с ним неблагоприятных и опасных ситуаций и в упреждающем реагировании на предстоящие угрозы, обеспечивающем или возможную адаптацию к изменениям, или минимизацию их последствий.

Для выбора вариантов и способов адаптации хозяйства и человека к прогнозируемым изменениям климата на региональном уровне необходимы исследования закономерности преломления макроклиматического фона и его изменений в физико-географических условиях региона, а на локальном уровне — в термодинамических условиях ландшафтов.

1 Adyghe State University, Research Institute of Complex Problems of ASU, Center of Intellectual Geoinformation Technologies, Russian Federation, 13, Gagarina str., Maykop, 385000, Russia, *e-mail:* **vtp01@mail.ru; gic-info@yandex.ru**

2 Adyghe State University, Research Institute of Complex Problems of ASU, Center of Intellectual Geoinformation Technologies, Russian Federation, 13, Gagarina str., Maykop, 385000, Russia, *e-mail:* **gic-info@yandex.ru**

3 Adyghe State University, Research Institute of Complex Problems of ASU, Center of Intellectual Geoinformation Technologies, Russian Federation, 13, Gagarina str., Maykop, 385000, Russia, *e-mail:* **gic-info@yandex.ru**

В связи с этим первым этапом процесса создания ГИС климатического паспорта горно-равнинной Адыгеи является систематизация фактологических данных климатических условий и показателей, обусловливающих формирование ландшафтно-климатических зон в условиях региона. Этот этап предшествует последующей разработке структуры данных пространственно-дифференцированного автоматизированного мониторинга и прогнозирования изменчивости и изменений климата и их последствий для адаптации к ним жизни населения и хозяйственной деятельности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе приведены результаты анализа данных гидрометеорологических наблюдений 29 метеостанций и постов Северо-Западного Кавказа за период с 1906 по 1999 гг. методами статистической обработки данных метеорологических наблюдений для пространственного анализа [*Хромов*, *Петросянц*, 2001; *Аргучинцева*, 2007; *Груза*, *Ранькова*, 2012; *Дегтярев* и др., 2015].

Климатическое районирование Северо-Западного Кавказа произведено в соответствии с масштабом пространственно-дифференцирующей роли средоформирующих факторов на нескольких уровнях генерализации [*Варшанина*, *Митусов*, 2005].

Территориальные объекты макроклиматической системы идентифицированы в результате изучения закономерности распределения фоновых климатических характеристик и величины/направления вектора их градиентов. Оценивались параметры годовой амплитуды и годового хода температуры воздуха, атмосферного давления, направления и скорости ветра, количества штилей, форм облаков.

Критериями оценки влияния морских и континентальных воздушных масс выступили:

1. степень континентальности климата (оценивалась по годовой амплитуде температуры);
2. типы годового хода температуры и осадков;
3. годовой ход относительной влажности воздуха;
4. режима ветра (преобладающее направление, скорость).

На макроуровне на Северо-Западном Кавказе важным дифференцирующим фактором выступает атмосферная циркуляция. Определение пространственных единиц преобладающего влияния циркуляции, характерной для южных районов ЕТР и Черноморского побережья Кавказа, производилось путем выделения:

- зон преобладающего влияния континентального и морского воздуха (по типам годового хода метеоэлементов, барометрическому режиму, направлению/величине градиентов температуры и осадков);
- зон их совместного влияния (по аномалиям годового хода метеоэлементов, направлению/величине градиентов температуры и осадков).

Пространственные единицы климата на региональном уровне идентифицированы по однотипным величине/направлению градиентов основных климатоформирующих факторов: температуры и осадков. Поля гидротермических градиентов, построенные по среднемноголетним данным, отражают пространственную дифференциацию климатических процессов Западного Кавказа.

В качестве пространственной единицы субрегионального климата принята однородная по комплексу характеристик, интерпретирующих средоформирующие климатические параметры территории, на которой в мезомасштабе сохраняется единое

соотношение среднегодовых направлений градиентов температуры и осадков. Границы субрегиональных пространственных единиц климата выделены по резкому изменению величины/направления градиентов и по линиям их сходимости/расходимости.

По характеру модификации климата в рельефе выделены ареалы с преобладающими: а) зональностью/секторностью, б) трансформацией под воздействием подстилающей поверхности. В первом случае климат обусловлен преимущественно свойствами приходящих воздушных масс и особенностью циркуляции на макроуровне. Во втором — развиты процессы, обусловленные трансформацией воздушных масс в рельефе, а циркуляция атмосферы задает только общие черты климата.

Недостаточность данных инструментальных наблюдений для климатического районирования горной части республики потребовала привлечения косвенных сведений о характере почвенного покрова на водораздельных пространствах, растительности, положении снеговой линии, густоте речной сети, стоке и т. п.

Тенденции изменчивости макроклимата исследовались за период с 1906 по 1999 гг. в результате вычисления трендов климатических величин, отражающих изменения режима циркуляции на Западном Кавказе. Пространственные закономерности трендов метеоэлементов на Северо-Западном Кавказе и в Адыгее выявлялись с применением линейного тренда, оцениваемого методом наименьших квадратов.

Использованы также результаты анализа общих тенденций изменения климата в Республике Адыгее методом реанализа за период с 1900 по 2015 гг. [*Solomon* et al., 2007; *Kostianoy* et al., 2017]. Источником информации в этом исследовании служили среднемесячные и среднесуточные данные, рассчитанные по регулярной сетке 1x1° [*Compo* et al., 2011; *Slivinski* et al., 2019] с разрешением, недостаточным для вычисления пространственно-дифференцированных трендов изменения климата на уровне ландшафтно-климатических районов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

К основным факторам, корректирующим зональный режим хода метеорологических процессов в горно-равнинной Адыгее, относятся: экранирующая роль Большого Кавказа в переносе воздушных масс, процесс предвосхождения воздушных масс перед горным сооружением, влияние Черноморской депрессии, флуктуация положения бореального климатологического фронта, процессы циркуляции и динамической трансформации воздушных масс и перераспределение метеоэлементов в рельефе.

В результате взаимодействия перечисленных факторов создается сложное пространственно-временное климатическое поле. В этих условиях выявление пространственных единиц климата — климатических ниш ландшафтов — в первую очередь связано с выделением границ территорий с выраженным влиянием континентального, морского воздуха и высотной поясности.

Выделение на Западном Кавказе зон преобладающего влияния континентального и морского воздуха производилось по типам годового хода метеоэлементов и направлению/величине градиентов температуры и осадков. Выраженность влияния морских или континентальных воздушных масс оценивалось по критериям степени континентальности климата, типам годового хода температуры и осадков, относительной влажности воздуха, режима ветра [*Варшанина*, *Митусов*, 2005; *Kostianoy*, *Serykh*, 2020]. В результате на Северо-Западном Кавказе и территории Адыгеи выделены зоны преобладания фактора циркуляции и фактора динамической трансформации воздушных масс (рис. 1).

В этих зонах в Адыгее выявлены два сектора (I.1 и I.3) преимущественного влияния умеренно-континентального, морского воздуха и сектор (I.2) их совместного влияния.

В секторе I.1 горизонтальные и вертикальные градиенты основных метеорологических элементов невелики, т. к. равнинная деятельная поверхность определяет относительно слабую трансформацию движущихся воздушных масс. В зоне циркуляции в соответствие с увеличением абсолютной высоты с северо-северо-запада на юго-юго-восток и нарастания влияния подстилающей поверхности выделено 3 высотных пояса: равнинный, предгорный и низкогорный. Разделяющие их климаторазделы фиксируются по резкому изменению величины/направления градиентов температуры/осадков (рис. 2).

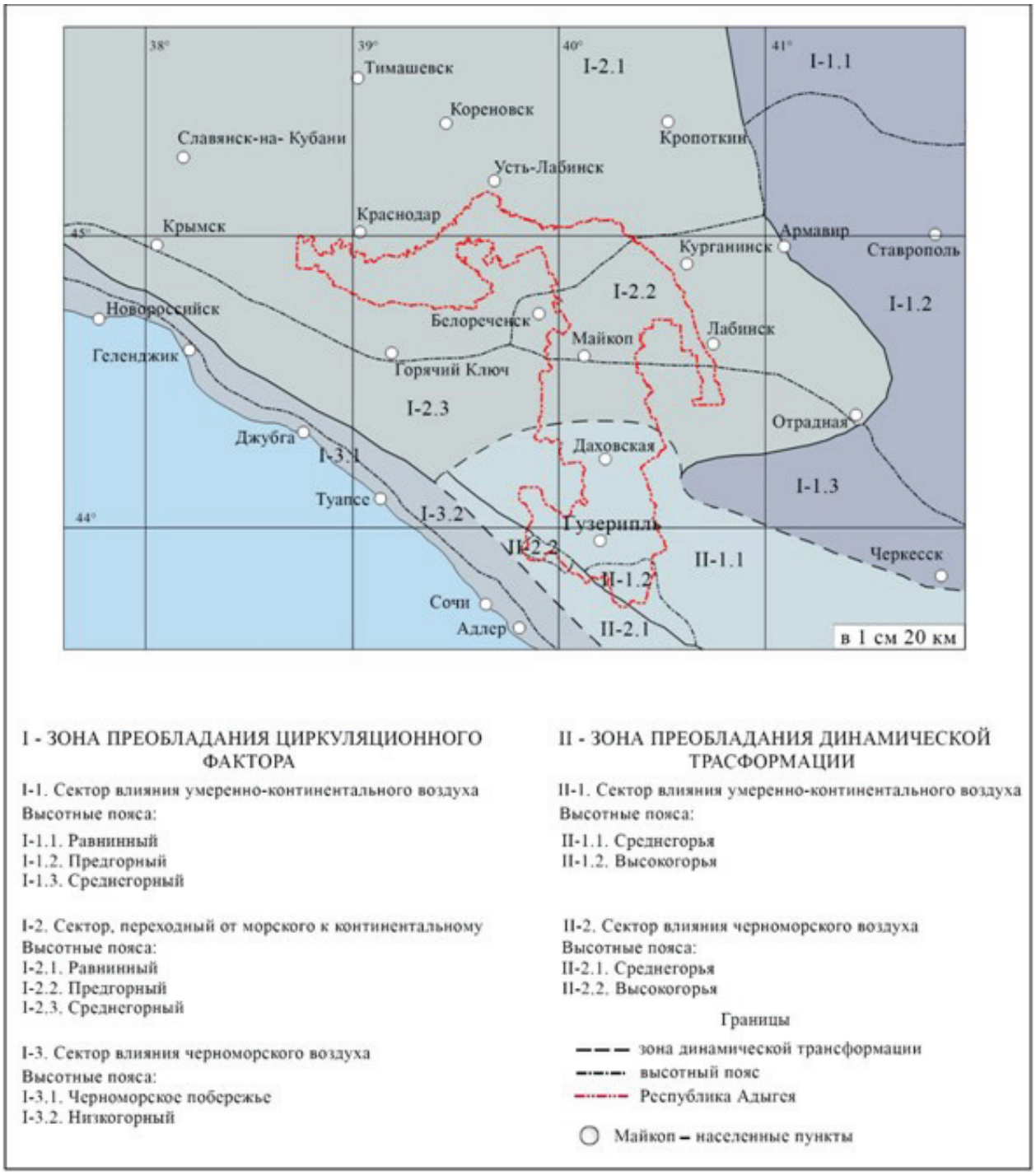


Рис. 1. Климатическое зонирование Краснодарского края и Республики Адыгея
Fig. 1. Climatic zoning of the Krasnodar Territory and the Republic of Adygea

Рис. 2. Климаторазделы высотных поясов территории Адыгеи
Fig. 2. Climatological sections of high-altitude zones of the territory of Adygea

Климат этой зоны определяется атмосферной циркуляцией, сложившейся над прилегающими равнинами, но и доступен непосредственному воздействию воздушных масс с Черного моря, которые движутся перпендикулярно направлению мощного потока восходящих перед горным сооружением континентальных воздушных масс, вовлекаясь затем в процесс поднятия по горным ступеням.

В среднегорном ярусе (высота более 1000 м н.у.м.) усиливается влияние восхождения воздушных масс, обострения фронтов, прослеживается контрастность климатов противоположных экспозиций, но заметным оказывается и воздействие циркуляционных процессов над прилегающими равнинами.

В высокогорном ярусе процесс динамической трансформации воздушных масс становится основным. Циркуляция атмосферы над равнинами на его климат существенного влияния не оказывает.

На локальном уровне климатических ниш ландшафтов характерные индивидуальные черты климат приобретает с одной стороны под влиянием литологии, перераспределения фоновых климатических параметров в рельефе, мехсостава почвообразующих пород, растительности, антропогенной измененности. С другой стороны, мезоклиматические различия ландшафтов отражаются на составе растительных сообществ и на рельеф на уровне морфоскульптур. Например, в северо-восточной равнинной части республики с более сухим климатом и выпадением осадков в летнее время преимущественно в виде ливней развита овражно-балочная сеть. В западной части равнины с более влажным климатом формируется долинно-балочный рельеф.

Важным мезоклиматическим фактором формирования ландшафта является его ветровая экспозиция. Для ландшафтов равнинной и низкогорной части республики определяющей является экспозиция относительно западного воздушного потока, как основного влагонесущего. В среднегорьях основным влагонесущим является северный поток, а в высокогорьях — северный, южный и западный потоки.

Ведущим климатическим фактором в горной части республики является температура воздуха, определяющая высотно-поясное распределение компонентов ландшафта. Климатические характеристики ландшафтов в горном поясе позволяют уточнить и детализировать ареалы распространения древесных пород. Так, термическая граница произрастания дуба скального соответствует продолжительности периода с температурой выше 10° в течение 4 месяцев. Нижняя граница распространения бука соответствует коэффициенту увлажнения, равному 1, а верхняя граница — январской изотерме -3°. Произрастание бука в среднегорных лесах Адыгеи свидетельствует о количестве дней с максимальной температурой воздуха свыше 7° более 220 в году. Существование реликтовых сосновых лесов свидетельствует о том, что период с температурой воздуха свыше 0° длится более чем 275 дней в году [*Гребенщиков*, 1974].

Произведено ландшафтно-климатическое районирование территории с различным уровнем детализации по единицам регионального геопространства, различающимся комплексом характеристик, интерпретирующих средоформирующие климатические параметры (рис. 3). В результате выделено 9 ландшафтно-климатических мезорайонов, в которых определено 17 районов, в некоторых из них выявлены подрайоны. Дальнейшим шагом дискретизации возможно микроклиматическое районирование.

Ландшафтно-климатические пространственные единицы характеризуются в соответствии с положением в классификации. Например, Северско-Габукайский мезорайон отличается переходным от морского к континентальному климатом с преобладанием свойств морского, северо-восточным направлением в зимний период и юго-восточным направлением летом градиента температуры. Градиент осадков направлен на юг во все сезоны года. Среднегодовая температура воздуха — 10,6–10,7 °С.

Продолжительность сезона с отрицательной температурой — менее двух месяцев. Количество осадков — 640 мм. В годовом ходе осадков два примерно равных по величине максимума: зимний (декабрь) и летний (июнь), и два минимума: основной осенний (сентябрь) и дополнительный весенний (апрель). Среднегодовая скорость ветра — 2,8–3,5 м/с. Преобладают ветры северо-восточного и восточного направлений. Повторяемость восточных ветров в весенне-летний период значительно снижается. В формировании климата большую роль играют вторжения умеренного морского воздуха в зимнее время, связанные с активизацией Черноморской депрессии.

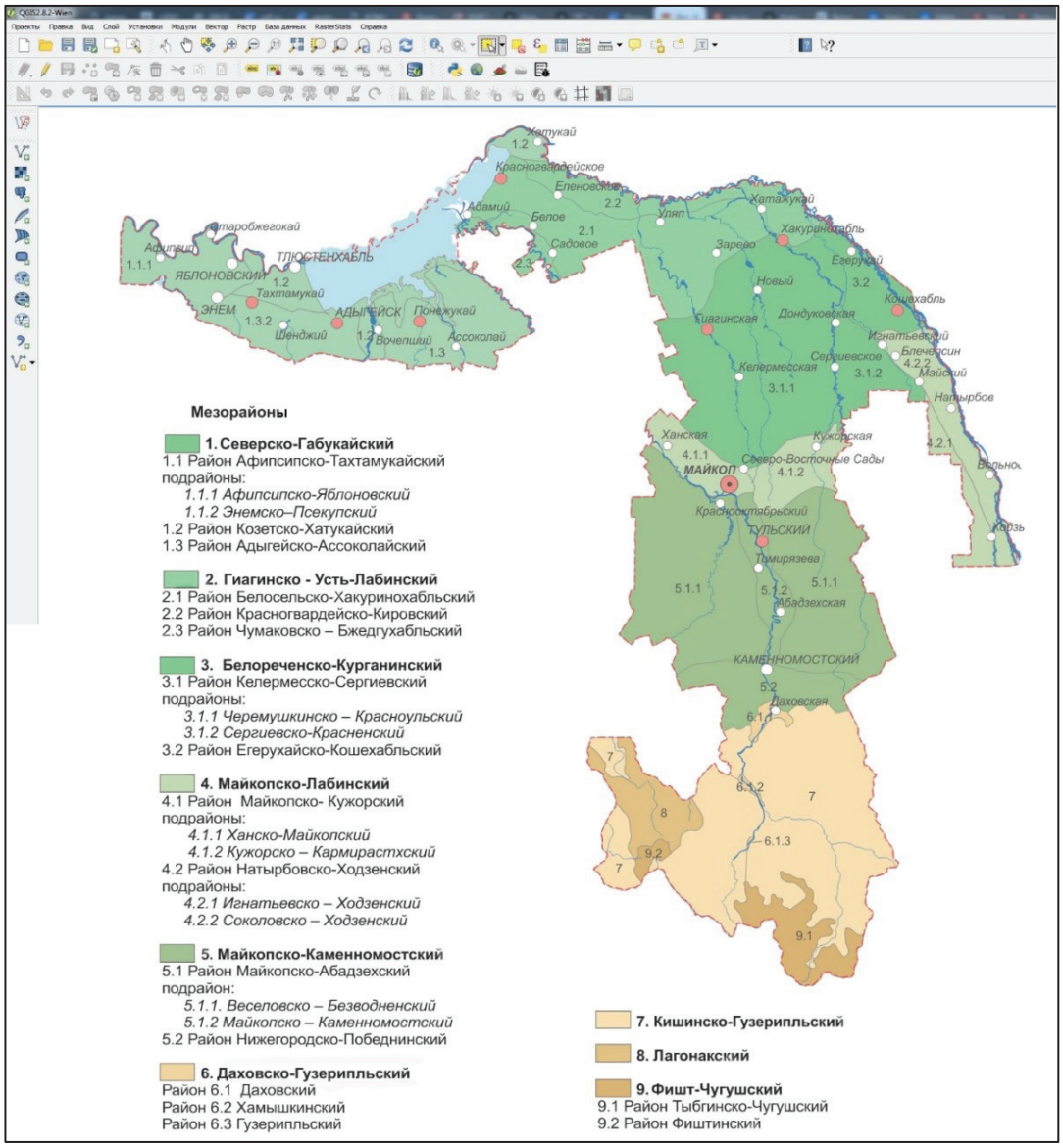


Рис. 3. Ландшафтно-климатическое районирование Адыгеи
Fig. 3. Landscape and climatic zoning of Adygea

Входящий в мезорайон Афипсипско-Тахтамукайский район расположен в долине р. Кубани. Характеризуется наиболее высокой среднегодовой температурой воздуха в республике (10,7°). Сумма температур выше 0° составляет 4034–4071°. Продолжительность периода с температурой воздуха выше 0° составляет 303 дня. Годовая сумма осадков — 643 мм. За период со среднесуточной температурой воздуха выше 0° выпадает 540 мм осадков. В ветровом режиме преобладают ветры северо-восточного направления. Отличается слабой способностью к перераспределению климатических параметров в рельефе и относительной трансформацией приходящих воздушных масс. Подстилающая поверхность способствует трансформации малоподвижных воздушных масс, главным образом посредством лучистого теплообмена земной поверхности и атмосферы и увлажнения нижних слоев воздуха.

Стратегия столь детального районирования определяется масштабом задач, поставленных в проекте ГИС «Паспорт климатической безопасности региона».

Ключевыми из этих задач для конкретного региона являются оценка и мониторинг устойчивых трендов и флуктуаций изменения климата, его негативных последствий с учетом физико-географических особенностей и социально-экономических условий. Задача выявления природных, хозяйственных объектов и районов, потенциально уязвимых с точки зрения трендов погодно-климатических изменений, связывается с пространственно-временным распределением в ландшафтно-климатических районах повторяемости и степени выраженности неблагоприятных и опасных климатических явлений.

В Адыгее к неблагоприятным погодно-климатическим воздействиям относятся суховейно-засушливые погоды, поздние заморозки, выпадение града и экстремальные осадки, сильный ветер, паводочные явления [Атлас…, 2005]. Предварительные исследования выявили в ландшафтно-климатических районах их пространственно-дифференцированные распределение и повторяемость. Например — локализация, интенсивность и характер протекания паводков имеют связь с ландшафтно-климатическими особенностями бассейнов рек. Изучены типы метеорологических ситуаций, при которых формируются паводки (табл. 1). На примере малых рек Адыгеи выявлены закономерности генетической связи полей температуры и осадков [*Варшанина* и др., 2007]. Термическое поле приземной атмосферы принято за ее энергетическое поле, т. к. оно обусловливает формирование барических систем, атмосферных фронтов и циркуляцию воздушных масс. Проблема вычисления нелинейной связи между ходом параметров регионального градиента температуры и степенью выраженности гидрометеорологического процесса решается с помощью трехуровневой нейросетевой модели. Разработанная модель апробирована в точечном краткосрочном постпрогнозе времени наступления и высоты паводка на 4 малых реках Адыгеи и р. Адагум (южный макросклон Б. Кавказа) [*Варшанина* и др., 2010; *Варшанина*, *Хунагов*, 2022]. Иллюстрацией когерентности хода параметров градиента температуры приземной атмосферы и выраженности гидрометеорологического явления в точке прогнозирования служит рис. 3. Отображение годового хода градиента температуры через его результирующее значение за каждый месяц года и построение роз годового хода результирующего ежемесячного градиента температуры в точке прогнозирования позволяет на визуальном уровне выделить паводочные годы (рис. 4). Выявленная закономерность открывает возможность долгосрочного прогнозирования изменений климатических величин на конкретный пункт с применением нейросетевых технологий. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при прогнозировании гидрометеорологических явлений и процессов в качестве предиктора возможно использование величины, отражающей динамику термического поля региона.

Исследование трендов климатических изменений традиционно находится в поле интересов климатологов [*Гребенщиков*, 1974; *Борзенкова* и др., 1976; *Кобышева*, *Наровлянский*, 1978; *Исаев*, 1988; *Борзенкова*, 1992; *Панов*, *Спиридонова*, 2019; *Monier* et al., 2013; *Pasqui*, *Giuseppe*, 2019]. В данном исследовании по метеоданным за период с 1961 по 1988 гг. на территории от возвышенных равнин (г. Майкоп) до среднегорий (пос. Гузерипль) выявлены различия по высотным ступеням в изменении климатических параметров не только в многолетнем, но и в годовом ходе [Атлас…, 2005; *Варшанина*, *Митусов*, 2005].

Наиболее значительные изменения температуры и осадков происходили в зимние месяцы. В этот сезон в среднем многолетнем наблюдалось снижение среднемесячного атмосферного давления, что свидетельствует об усилении влияния на климат региона циклонической деятельности, в первую очередь Черноморской депрессии. Наибольшим изменениям подвергся режим температуры и осадков на равнине, меньшие изменения произошли в горной части республики.

Табл. 1. Условия формирования паводков на реках Адыгеи (за период 1936–1999 гг.)
Table 1. Conditions of formation of floods on Adygea Rivers (for the period 1936–1999)

Период, месяцы	**Гидрометеорологические условия сезона**	**Условия формирование паводков**	**Граничные условия**
XII–III	Максимум осадков ноябрь – декабрь, $t_{cc} \geq 0$ °C, снежный покров, ледовые явления на реках. На равнине	1. Обильные жидкие осадки, интенсивное снеготаянье 2. Обильное снеготаяние при резком потеплении 3. Ледовые заторы на реках	$t_{cc} < 0$ °C, $\nabla t < 0.1°$ / 100 км или > 3.5° / 100 км
IV–VI	$t_{cc} = 9$ .. 20° на равнине и в низкогорьях, интенсивное снеготаянье в горах, летний (май – июнь) максимум осадков. Влажность почв близка к годовому максимуму	1. Обильные жидкие осадки 2. Снеготаянье в средне- и высокогорьях	$t_{cc} < 9$ °C или > 20 °C, $\nabla t < 0.1°$ / 100 км или > 2,0° / 100 км
VII–IX	$t_{cc} = 15$ .. 22° на равнине и в низкогорьях. Влажность почв минимальная в году	Обильные жидкие осадки	$t_{cc} < 20°$ C и > 25 °C, $\nabla t < 0.5°$ / 100 км или > 0,4° / 100 км
X–XI	Осенне-зимний максимум осадков (XI–XII) $t_{cc} = 3$ .. 15° на равнине и в низкогорьях	Обильные жидкие осадки	$t_{cc} < 6$ °C или > 11,5 °C, $\nabla t < 0.7°$ / 100 км или > 2° / 100 км

Отмеченное повышение среднегодовой температуры воздуха в регионе было обусловлено прежде всего возрастанием температуры холодного периода, особенно в месяцы с переходом через 0°. Возрастание температуры воздуха в теплый период происходило только в равнинной части и было выражено значительно слабее. В месяцы, переходные от лета к осени и от осени к зиме, отмечалось снижение среднемесячной температуры воздуха. Выраженность тенденции к понижению температуры теплого периода нарастало по высотным ступеням.

Изменение климата в Республике Адыгея исследовано также методом реанализа, в период с 1900 по 2015 гг. коллективом авторов [*Kostianoy* et al., 2020]. Отмечено, что изменение климата в Республике Адыгея характеризовалось устойчивым медленным потеплением с 1900 г. по 1998 г. с линейным трендом 0,020 °C/10 лет и интенсивным потеплением в последующий период до 2015 г. (1,2 °C/10 лет).

Результаты реанализа в целом для территории Адыгеи подтверждают сделанный ранее вывод о том, что потепление в Адыгее обусловлено повышением температуры в холодную половину года при слабом изменении температуры теплого периода. Резкое повышение температуры воздуха за последние два десятилетия выдвигает на первый план проблему современного изменения климата и его последствий.

Выяснено, что интенсивность потепления на территории равнинной Адыгеи в десятки раз выше, чем на соседних территориях Краснодарского края, Абхазии, акватории Черного моря [*Kostianoy*, 2020]. Это приводит к увеличению на территории республики градиентов температуры приземной атмосферы, что неизбежно скажется на повторяемости и выраженности опасных климатических процессов.

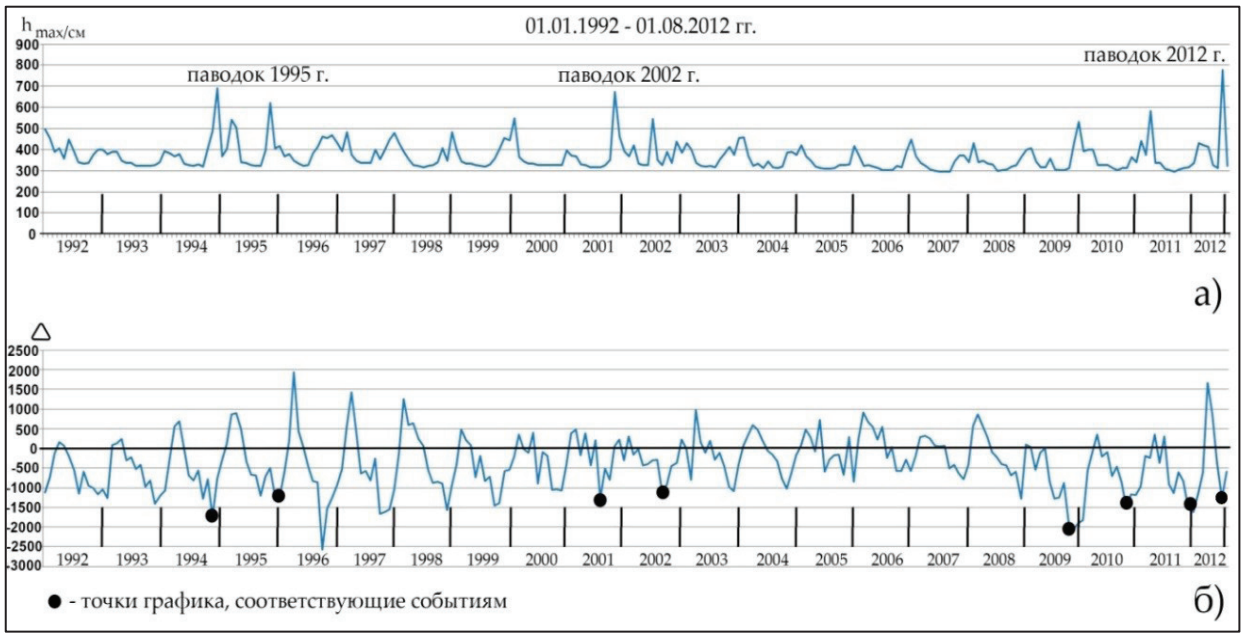


Рис. 3. Гидропост Адагум, г. Крымск. Графическое отображение в прямоугольной системе координат хода ежемесячного результирующего градиента температуры в точке прогнозирования в сопоставлении с ежемесячными максимальными уровнями воды: а) уровни воды; б) градиент температуры
Fig. 3. Adagum hydropost, Krymsk. Graphical representation of the monthly resulting temperature gradient at the projection point in the rectangular coordinate system compared to the monthly maximum water levels: a) water levels; b) temperature gradient

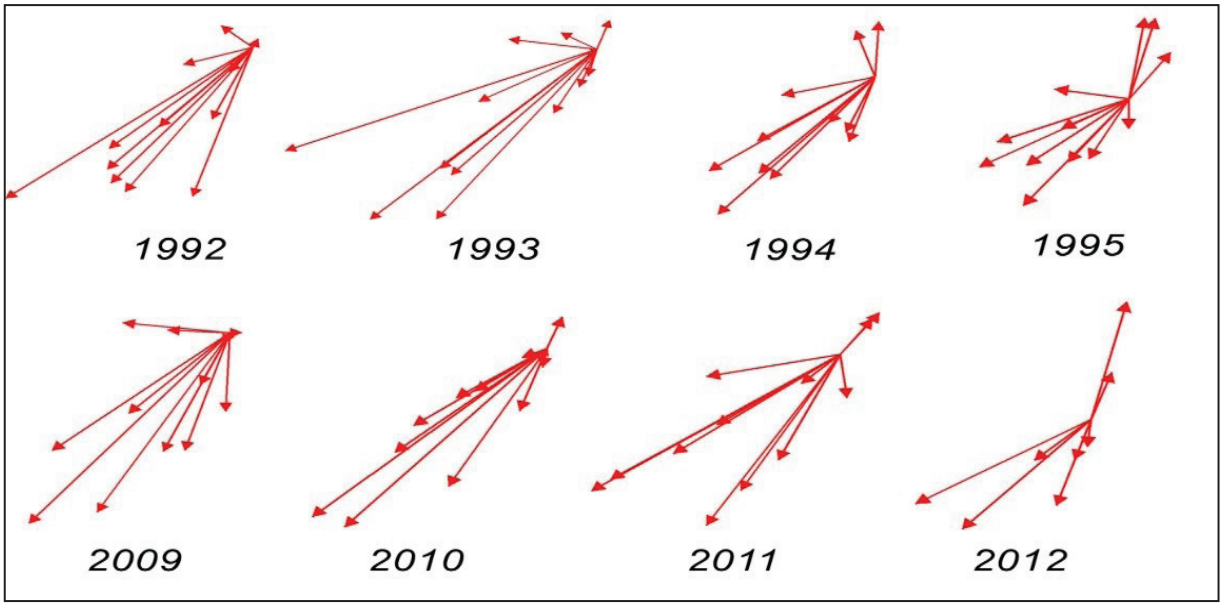


Рис. 4. Розы результирующих ежемесячных градиентов температуры в точке гидропост р. Адагум. Катастрофические паводки в 1995 и 2012 гг.
Fig. 4. Roses of the resulting monthly temperature gradients at the point of the Adagum River gauging station. Catastrophic floods in 1995 and 2012

ВЫВОДЫ

Произведенные фактологические исследования и их картографическое отображение позволяют определить оптимальную структуру данных ГИС «Паспорт климатической безопасности Адыгеи».

По пространственно-дифференцированному сочетанию факторов, корректирующих зональный режим хода метеорологических процессов на Северо-Западном Кавказе, в горно-равнинной Адыгее определено положение ландшафтно-климатических районов.

Относительно ландшафтно-климатических районов выявлены различия как в изменении климатических параметров в многолетнем и в годовом ходе, так и в повторяемости и степени выраженности опасных и неблагоприятных гидрометеорологических процессов.

Базовыми пространственными единицами ГИС определены идентифицированные ландшафтно-климатические районы. Относительно этих пространственных единиц накапливаются данные по повторяемости и выраженности опасных и неблагоприятных гидрометеорологических процессов в координированных точках их проявления. Нейросетевым модулем ГИС [*Варшанина* и др., 2010] по этим данным производится прогнозирование неблагоприятных погодно-климатических процессов в точке их проявления различной заблаговременности (краткосрочное, на сезон, на год). Данные закономерной согласованности хода параметров градиентного поля приземной температуры с ходом параметров выраженности прогнозируемого погодно-климатического явления на долгих периодах позволят производить долгосрочное прогнозирование и упреждающе реагировать на предстоящие вызовы климатической системы региона, обеспечивая выполнение тех функций, которым предназначена ГИС «Паспорт климатической безопасности Адыгеи».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аргучинцева А.А. Методы статистической обработки и анализа гидрометеорологических наблюдений. Иркутск: Иркутский государственный университет, 2007. 105 с.

Атлас Республики Адыгея. Майкоп – М.: Ассоциированный картографический центр, 2005. 79 с.

Борзенкова И.И. Изменение климата в кайнозое. СПб: Гидрометеоиздат, 1992. 247 с.

Борзенкова И.И., Винников К.Я., Спирина Л.П., Стехновский Д.И. Изменение температуры воздуха Северного полушария за период с 1881–1975 гг. Метеорология и гидрология, 1976. № 7. С. 27–35.

Варшанина Т.П., Митусов Д.В. Климатические ресурсы ландшафтов Республики Адыгея. Майкоп: Издательство Адыгейского госуниверситета, 2005. 237 с.

Варшанина Т.П., Митусов Д.В, Плисенко О.А., Стародуб И.В. Нейросетевая модель прогноза паводков на малых реках Адыгеи. Известия РАН. Серия географическая, 2007. № 6. С. 87–93.

Варшанина Т.П., Плисенко О.А., Стародуб И.В. Способ прогнозирования времени наступления и уровня паводка. Патент РФ № 2480825, 2010. 15 с.

Варшанина Т.П., Хунагов Р.Д., Коробков В.Н. Информативность геоинформационной вычислительной визуализации процессов формирования природных объектов. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 508–522. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-508-522.

Гребенщиков О.С. Опыт климатической характеристики основных растительных формаций Кавказа. Ботанический журнал, 1974. Т. 59. № 2. С. 161–173.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 194 с.

Дегтярев А.С., Драбенко В.А. Статистические методы обработки метеорологической информации. СПб: Андреевский издательский дом, 2015. 225 с.

Исаев А.А. Статистика в метеорологии и климатологии. М.: Издательство Московского университета, 1988. 248 с.

Кобышева Н.В., Наровлянский Г.Я. Климатологическая обработка метеорологической информации. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 296 с.

Панов Б.Н., Спиридонова Е.О. Климатические изменения поля приземного атмосферного давления в Азово-Черноморском регионе (1960–2017). Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки, 2019. DOI: 10.23683/0321-3005-2019-2-66-73.

Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. М.: Издательство Московского университета, 2001. 528 с.

Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D., Matsui N., Allan R.J., Yin X., Gleason B.E., Vose R.S., Rutledge G., Bessemoulin P., Brönnimann S., Brunet M., Crouthamel R.I., Grant A.N., Groisman P.Y., Jones P.D., Kruk M., Kruger A.C., Marshall G.J., Maugeri M., Mok H.Y., Nordli O., Ross I.F., Trigo R.M., Wang X.L., Woodruff S.D., Worley S.J. The twentieth century reanalysis project. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011. No. 137 (654). P. 1–28. DOI: 10.1002/qj.776.

Kostianoy A.G., Serykh I.V., Ekba Ya.A., Kravchenko P.N. Climate variability of extreme air temperature events in the Eastern Black Sea. Ecologica Montenegrina, 2017. V. 14. P. 21–29.

Kostianoy A.G., Serykh I.V., Lebedev S.A, Kostianaia E.A., Varshanina T.P. Regional climate change in the Republic of Adygea. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2020. P. 311–358.

Kostianoy A.G., Serykh I.V., Lebedev S.A., Kostianaia E.A., Varshanina T.P. General characteristics of the climate in the Republic of Adygea. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2020. P. 289–310.

Monier E., Sokolov A.P., Schlosser C.A., Gao X., Scott J. Possible climate change over Northern Eurasia. Austin Convention Center, 2013. 9 p.

Pasqui M., Giuseppe E. Climate change, future warming, and adaptation in Europe. Rome: Institute of Biometeorology — National Research Council (CNR–IBIMET), 2019. DOI: 10.1093/af/vfy036.

Slivinski L., Compo G., *Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D.* Towards a more reliable historical reanalysis: Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2019. DOI: 10.1002/qj.3598.

Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K., Tignor M., Miller H. Technical Summary. Climate Change: The Physical Science Basis. Cambridge, UK–New York, USA, 2007. 91 p.

REFERENCES

Arguchintseva A.A. Methods of statistical processing and analysis of hydrometeorological observations. Irkutsk: Irkutsk State University, 2007. 105 p. (in Russian).

Atlas of the Republic of Adygea. Maykop – Moscow: Associated cartographic center, 2005. 79 p. (in Russian).

Borzenkova I.I. Climate change in Cenozoic. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992. 247 p. (in Russian).

Borzenkova I.I., Vinnikov K.Y., Spirina L.P., Stehnovsky D.I. Change in air temperature of the Northern hemisphere from 1881 to 1975. Russian Meteorology and Hydrology, 1976. No. 7. P. 27–35 (in Russian).

Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D., Matsui N., Allan R.J., Yin X., Gleason B.E., Vose R.S., Rutledge G., Bessemoulin P., Brönnimann S., Brunet M., Crouthamel R.I., Grant A.N., Groisman P.Y., Jones P.D., Kruk M., Kruger A.C., Marshall G.J., Maugeri M., Mok H.Y., Nordli O., Ross I.F., Trigo R.M., Wang X.L., Woodruff S.D., Worley S.J. The twentieth century reanalysis project. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011. No. 137 (654). P. 1–28. DOI: 10.1002/qj.776.

Degtyarev A.S., Drabenko V.A. Statistical methods of processing meteorological information. Saint-Petersburg: Andreevsky publishing house, 2015. 225 p. (in Russian).

Grebenshikov O.S. Experience of climatic characteristics of the main plant formations of the Caucasus. Botanical Journal, 1974. V. 59. No. 2. P. 161–173 (in Russian).

Gruza G.V., Rankova E.Y. Observed and expected climate changes in Russia: Air temperature. Obninsk: Federal state educational institution, 2012. 194 p. (in Russian).

Isaev A.A. Statistics in meteorology and climatology. Moscow: Moscow University Press, 1988. 248 p. (in Russian).

Khromov S.P., Petrosyants M.A. Meteorology and climatology. Moscow: Moscow University Press, 2001. 528 p. (in Russian).

Kobysheva N.V., Narovlyanskii G.Y. Climatological processing of meteorological information. Hydrometeorological publishing house, 1978. 296 p. (in Russian).

Kostianoy A.G., Serykh I.V., Ekba Ya.A., Kravchenko P.N. Climate variability of extreme air temperature events in the Eastern Black Sea. Ecologica Montenegrina, 2017. V. 14. P. 21–29.

Kostianoy A.G., Serykh I.V., Lebedev S.A, Kostianaia E.A., Varshanina T.P. Regional climate change in the Republic of Adygea. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2020. P. 311–358.

Kostianoy A.G., Serykh I.V., Lebedev S.A., Kostianaia E.A., Varshanina T.P. General Characteristics of the Climate in the Republic of Adygea. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2020. P. 289–310.

Monier E., Sokolov A.P., Schlosser C.A., Gao X., Scott J. Possible climate change over Northern Eurasia. Austin Convention Center, 2013. 9 p.

Panov B.N., Spiridonova E.O. Climatic changes of the surface atmospheric pressure field in the Azov-Black Sea region (1960–2017). Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskii region. Natural science (News of higher educational institutions. North Caucasus region. Series: Natural Sciences), 2019 (in Russian). DOI: 10.23683/0321-3005-2019-2-66-73.

Pasqui M., Giuseppe E. Climate change, future warming, and adaptation in Europe. Rome: Institute of Biometeorology — National Research Council (CNR–IBIMET), 2019. DOI: 10.1093/af/vfy036.

Slivinski L., Compo G., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D. Towards a more reliable historical reanalysis: Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2019. DOI: 10.1002/qj.3598.

Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K., Tignor M., Miller H. Technical Summary. Climate Change: The Physical Science Basis. Cambridge, UK–New York, USA, 2007. 91 p.

Varshanina T.P., Khunagov R.D., Korobov V.N. Informativity of geoinformational computing visualization of the processes of formation of natural objects. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2022. V. 28. Part 1. P. 508–522 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-508-522.

Varshanina T.P., Mitusov D.V. Climatological resources of landscapes of the Republic of Adygea. Maykop: Publishing House of Adyghe State University, 2005. 237 p. (in Russian).

Varshanina T.P., Mitusov D.V., Plisenko O.A., Starodub I.V. Neuronetwork model of flood forecasts on small rivers of Adygea. Izvestia RAN. Seriya Geograficheskaya (News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series), 2007. No. 6. P. 87–93.

Varshanina T.P., Plisenko O.A., Starodub I.V. Method of forecasting the time of occurrence and level of flood. RF patent No. 2480825, 2010. 15 p.

DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-88-103

УДК: 528.94+528.88

С.В. Пьянков[1], **Е.Ж. Гармаев**[2], **Р.К. Абдуллин**[1],
А.Н. Шихов[1], **А.А. Аюржанаев**[2], **В.Н. Черных**[2],
Т.В. Судницына[1]

ГИС ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ БАССЕЙНА Р. СЕЛЕНГИ: СТРУКТУРА, ИНФОРМАЦИОННОЕ НАПОЛНЕНИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

АННОТАЦИЯ

Территория трансграничного бассейна р. Селенги — главного притока Байкала — характеризуется широким распространением опасных явлений климатической, гидрологической и геоморфологической природы. Для интеграции, отображения и анализа разнородных данных об этих явлениях, а также предоставления данных научному сообществу была разработана веб-ГИС «Гидроэкологическая безопасность бассейна р. Селенги». Структура веб-ГИС включает картографические слои и базы данных, которые характеризуют среднемноголетние и экстремальные климатические и гидрологические условия в бассейне р. Селенги, опасные природные процессы гидролого-геоморфологической природы, а также их негативное воздействие на ландшафты, населенные пункты и инфраструктуру. Для информационного наполнения веб-ГИС использовались как внешние базы данных и сервисы (многолетние ряды наблюдений метеостанций и гидропостов, данные проекта WorldClim, реанализ ERA5-Land), так и материалы, полученные в результате исследований авторов, которые ранее не публиковались. Программная реализация ГИС основана на открытых технологиях. Особенностью созданного веб-сервиса в сравнении с ранее опубликованными бассейновыми ГИС является развитый климатический блок, который позволяет оценивать различные проявления современного изменения климата в пределах бассейна р. Селенги. Также на сервисе впервые опубликованы данные о некоторых опасных природных процессах (таких, как сели или наледи). Перспективы развития и совершенствования веб-ГИС связаны с публикацией новых картографических слоев и баз данных, созданных авторами, с разработкой оценочных карт опасности и риска различных видов опасных гидрологических явлений, а также климатических характеристик на базе современного реанализа ERA5 и прогнозов будущего климата на XXI в. по различным сценариям.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: веб-ГИС, бассейн р. Селенги, опасные гидрологические явления, изменения климата, картографирование

[1] Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, д. 15, Пермь, Россия, 614990,
e-mail: **pyankovsv@gmail.com**

[2] Байкальский институт природопользования СО РАН, ул. Сахьяновой, д. 6, г. Улан-Удэ, Республика Бурятия, Россия, 670047,
e-mail: **garend1@yandex.ru**

Sergey V. Pyankov[1], **Endon Zh. Garmaev**[2], **Rinat K. Abdullin**[1], **Andrey N. Shikhov**[1], **Alexander A. Aurzhanaev**[2], **Vladimir N. Chernykh**[2], **Tatyana V. Sudnitsyna**[1]

GIS OF HYDROLOGICAL AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF THE SELENGA RIVER BASIN: STRUCTURE, CONTENT AND FUNCTIONALITY

ABSTRACT

The transboundary basin of the Selenga river (the main tributary of Lake Baikal) is characterized by widespread and frequent hazardous events of climatic, hydrological and geomorphological nature. To integrate, display and analyze various data on these events, as well as provide them to the scientific community, a web GIS "Hydrological and environmental safety of the Selenga river basin" has been developed. The structure of the web GIS includes layers and databases that characterize the average long-term and extreme climatic and hydrological conditions in the basin, hazardous processes of hydrological and geomorphological nature, as well as their negative impact on landscapes, settlements and infrastructure. Both external databases and services (long-term weather and hydrological data series, WorldClim 2.0 database, ERA5-Land reanalysis and other) and previously unpublished result of the authors' studies were used for web GIS content. The web-GIS development is based on open source software and libraries. A feature of the web GIS in comparison with previously published analogues for other river's basins is an information rich climate section, which allows to assess various manifestations of the observed climate change in the Selenga river basin. Also, the data on several potentially hazardous natural processes like mudflows or aufeis formation are published on the service for the first time. Prospects for the development and improvement of the web GIS are associated with the publication of new GIS layers and databases compiled by the authors, with the development of hazard and risk assessment maps for various types of hazardous hydrological events. In addition, climatic characteristics based on modern ERA5 reanalysis and future climate projections for the 21st century are planned to be published.

KEYWORDS: web-GIS, Selenga river basin, hazardous hydrological events, climate change, mapping

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивость экосистемы крупнейшего пресноводного озера планеты — Байкала во многом определяется режимом крупнейшей реки, впадающей в него — Селенги, которая дает до 50 % водного и более 50 % химического стока в озеро [*Гармаев*, *Христофоров*, 2010]. Современное потепление климата оказывает существенное влияние на гидрологические процессы в бассейне Селенги [*Фролова* и др., 2017]. Как и в других регионах России, на фоне потепления здесь отмечается снижение объема стока весеннего половодья и некоторое увеличение стока в зимний период [*Sinyukovich*, *Chernyshov*, 2019]. Также в Байкальском регионе (как и по всей России) растет вклад ливневых осадков в общее количество осадков, что может привести к повышению риска наводнений, вызванных ливневыми паводками [*Chernokulsky* et al., 2019].

В период с 1996 по 2018 гг. в бассейне р. Селенги отмечался дефицит осадков, что привело к значительному снижению уровня воды в Байкале [*Фролова* и др., 2017; *Sinyukovich*, *Chernyshov*, 2019]. В последние годы, наоборот, отмечается существенное увеличение количества осадков и притока воды в Байкале [*Чернышов*, 2022]. В связи с этим

[1] Perm State University, 15, Bukireva str., Perm, 614990, Russia, *e-mail*: **gis@psu.ru**

[2] Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 6, Sakhyanovoy str., Ulan-Ude, Republic of Buryatiya, 670047, Russia, *e-mail:* **garend1@yandex.ru**

в бассейне Селенги после 2018 г. произошло увеличение частоты наводнений и связанных с ними эрозионных и оползневых процессов, которые в большинстве случаев связаны с интенсивными осадками в летний период [*Pyankov* et al., 2022]. Под угрозой наводнений в бассейне р. Селенги находятся свыше 100 населенных пунктов, в т. ч. г. Улан-Удэ, а также 236.3 тыс. га сельскохозяйственных угодий *[Борисова*, 2010; *Kichigina*, 2018]. Помимо наводнений, в бассейне р. Селенги распространены и другие опасные гидролого-геоморфологические процессы и явления, такие как наледи, эрозия почв и оврагоообразование [*Tsydypov* et al., 2020], сели и оползни [*Bazhenova* et al., 2020].

Особенностью бассейна р. Селенги также является трансграничное положение (⅔ площади бассейна р. Селенги находится на территории Монголии). Для монгольской части бассейна сложнее получить доступ к многолетним рядам данных наземных метеорологических и гидрологических наблюдений, а плотность сети наблюдений существенно ниже, чем в российской части бассейна [*Garmaev* et al., 2022]. Интерес к монгольской части бассейна обусловлен еще и обсуждением проектов строительства ГЭС на крупных притоках Селенги, реализация которых может оказать существенное влияние на сток [*Фролова* и др., 2017; *Чернышов*, 2022].

Значимость бассейна р. Селенги как основного источника поступления воды в Байкал, а также недостаточная изученность многих природных процессов, влияющих на формирование водного, твердого и химического стока, обусловила необходимость создания бассейновой ГИС «Гидроэкологическая безопасность в бассейне р. Селенги» [*Pyankov* et al., 2022]. ГИС была разработана в 2022 г. и опубликована как картографический веб-сервис[1]. Основным ее назначением является обеспечение интеграции, отображения и анализа разнородных данных о гидрологических и климатических процессах в бассейне р. Селенги, а также предоставление этих данных научному сообществу. Конечной же целью создания ГИС является поддержка принятия научно-обоснованных решений в области обеспечения гидроэкологической безопасности.

Следует отметить, что в России накоплен значительный опыт создания бассейновых ГИС разного целевого назначения и территориального охвата. Первые такие ГИС обеспечивали систематизацию данных многолетних наблюдений и расчет пространственного распределения различных гидрометеорологических параметров [*Калинин*, *Пьянков*, 2010]. В последующие годы было разработано множество бассейновых ГИС разного функционального назначения (от визуализации и анализа данных оперативного мониторинга и прогноза наводнений до оценки ландшафтных характеристик, эрозии почв и твердого стока в бассейнах рек). Некоторые из них опубликованы как картографические веб-сервисы в открытом или ограниченном доступе, в частности ГИС Центра Регистра и Кадастра[2], которая может служить источником оперативных данных наблюдений гидрологических постов. Среди наиболее значимых бассейновых ГИС, обеспечивающих визуализацию гидрологических прогнозов, можно выделить ГИС-Амур и ГИС-Волга, разработанные ФГБУ НИЦ «Планета» [*Frolov* et al., 2016; *Borsch* et al., 2022]; систему прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани, разработанную Гидрометцентром России [*Борщ* и др., 2015]; а также ГИС для визуализации открытых автоматизированных прогнозов уровней и расходов воды, разработанную в рамках проекта OpenForecast [*Ayzel* et al., 2020]. Наиболее значимой ГИС, в которой анализируется формирование твердого стока рек, является веб-ГИС «Речные бассейны Европейской части России» [*Ермолаев* и др., 2017].

---

1 ГИС «Гидроэкологическая безопасность в бассейне р. Селенги». Электронный ресурс: http://selenga.psu.ru/ (дата обращения 09.03.2023).

2 Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. Электронный ресурс: http://gis.vodinfo.ru/ (дата обращения 09.03.2023).

Особенностью созданной ГИС для бассейна р. Селенги в сравнении с перечисленными сервисами является публикация значительного объема данных о климатических характеристиках и их изменениях, а также о некоторых потенциально опасных процессах (таких, как сели или наледи).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Структура базы данных и основные источники информации

Структура бассейновой ГИС традиционно включает базовую и тематическую информацию [*Калинин*, *Пьянков*, 2010; *Ермолаев* и др., 2017]. Базовые данные включают в себя основные топографические слои по данным OpenStreetMap (реки и водоемы, основные дороги и населенные пункты), цифровую модель рельефа (ЦМР) на основе матрицы высот SRTM с пространственным разрешением 90 м, и несколько полученных на ее основе морфометрических параметров (уклон, экспозиция, кривизна). Границы речных бассейнов были извлечены из данных SRTM с использованием инструментов «Гидрология» пакета ArcGIS. Лесистость бассейна оценивалась на основе данных Global Forest Change [*Hansen* et al., 2013]. Гидрометеорологическая наблюдательная сеть включает 74 метеостанции (из них 36 расположены за пределами бассейна) и 87 гидрологических постов, из них 44 в России и 43 — в Монголии (рис. 1).

Тематические данные характеризуют климатические и гидрологические условия в бассейне р. Селенги, опасные природные процессы гидролого-геоморфологической природы, а также их негативное воздействие на ландшафты, населенные пункты и инфраструктуру. Для информационного наполнения ГИС использовались различные источники данных — как внешние базы данных и сервисы, так и материалы, полученные в результате исследований авторов.

Климатические данные в ГИС включают растровые слои средних многолетних и экстремальных климатических характеристик. Эти же характеристики подготовлены и для отдельных метеостанций (доступны для просмотра в виде графиков). Средние многолетние значения температуры воздуха, количества осадков, солнечной радиации, парциального давления водяного пара и скорости ветра получены по данным WorldClim 2.0[1]. В данном проекте доступны два набора климатических данных — Historical Climate Data за 1970–2000 гг. [*Fick*, *Hijmans*, 2017] и Historical Monthly Weather Data за 1961–2018 гг. [*Harris* et al., 2014], с пространственным разрешением 1` и 5` соответственно. В ГИС опубликованы растры, характеризующие пространственное распределение температуры воздуха и осадков, рассчитанное по скользящим 30-летним периодам (от 1961–1990 до 1990–2018 гг.).

Картографирование экстремальных характеристик температуры воздуха и осадков и их многолетней изменчивости основано на стандартных индексах, предложенных группой экспертов по обнаружению и индексам изменения климата (ETCCDI) [*Alexander* et al., 2006]. Эти индексы и их модификации позволяют оценивать повторяемость, интенсивность и продолжительность климатических экстремумов и широко используются для мониторинга изменения климата [*Bulygina* et al., 2007]. Характеристики климатических экстремумов в бассейне р. Селенги рассчитаны по метеостанциям на основе набора данных GHCN-Daily[2] за период 1961–2020 гг. Перечень рассчитанных индексов приведен в таблице 1.

---

1 WorldClim. Maps, graphs, tables, and data of the global climate. Электронный ресурс: https://worldclim.org/ (дата обращения 09.03.2023).

2 NOAA National Center for Environmental Information. Электронный ресурс: https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/search?datasetid=GHCND (дата обращения 09.03.2023).

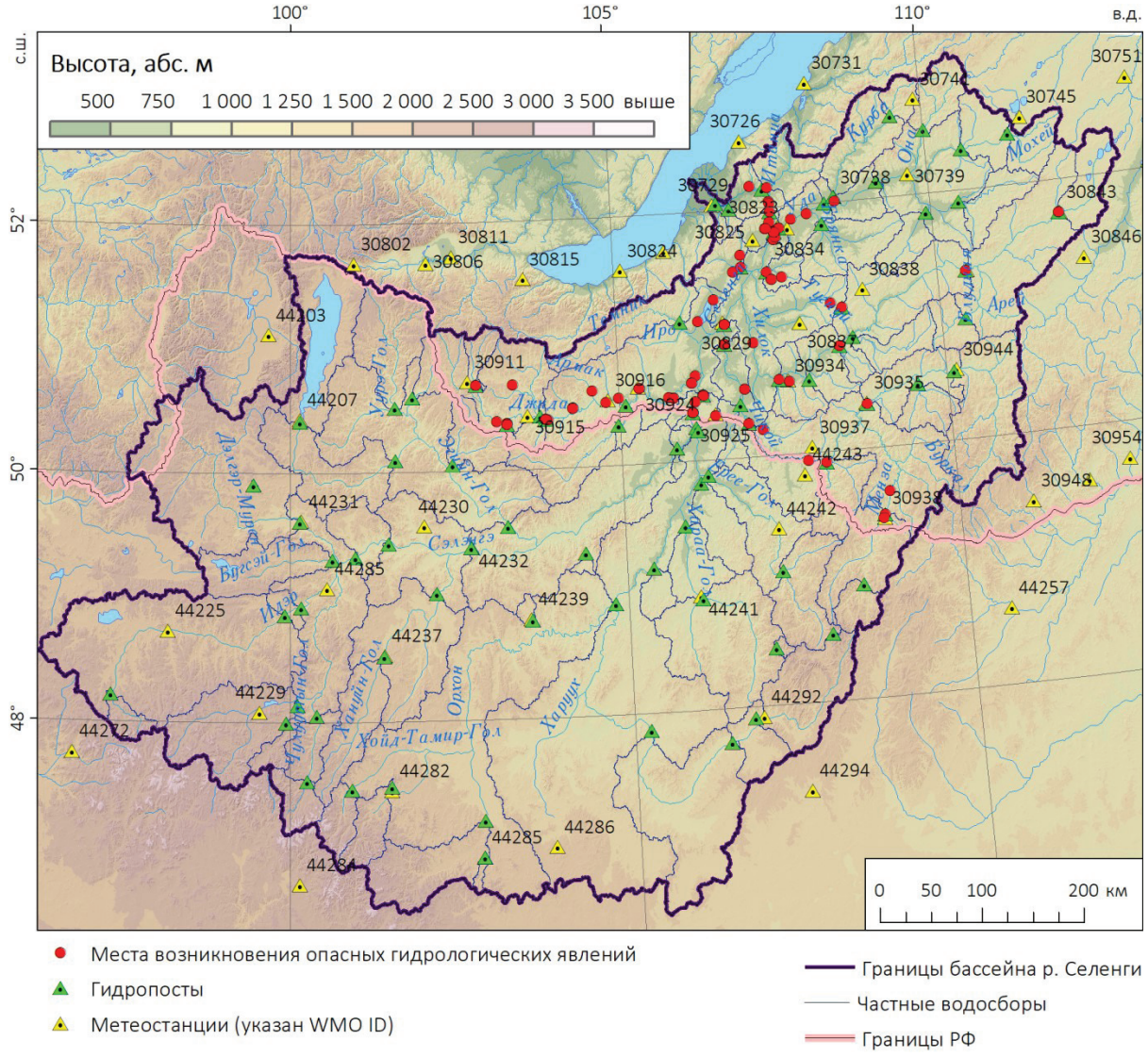


Рис. 1. Обзорная карта бассейна р. Селенги. Показаны пункты гидрометеорологической сети наблюдений и места возникновения опасных гидрологических явлений
Fig. 1. Overview map of the Selenga river basin. Hydrometeorological observation network and points reports of hazardous hydrological events are shown

Построение карт характеристик климатических экстремумов основано на интерполяции данных с метеостанций. Для большинства экстремальных характеристик интерполяция выполнена методом сплайна с учетом линейной зависимости от соответствующих значений среднемноголетней климатической характеристики, полученных по данным WorldClim. При интерполяции экстремальных характеристик температуры воздуха в качестве независимой переменной использовались соответствующие средние многолетние значения температуры воздуха, а при интерполяции экстремальных характеристик осадков — соответствующие средние многолетние характеристики осадков [*Garmaev* et al., 2022]. Выбор данной методики обусловлен тем, что в данных WorldClim уже учтены основные факторы подстилающей поверхности, определяющие пространственное распределение как средних, так и экстремальных характеристик температуры воздуха и осадков (высота местности, расстояние до ближайшего крупного водоема и пр.).

Табл. 1. Характеристики экстремумов температуры воздуха и осадков, рассчитанные по данным метеостанций
Table 1. Characteristics of temperature and precipitation extremes calculated based on weather stations data

Краткое наимено-вание*	**Полное наименование (англ.)**	**Характеристика индекса**
Индексы экстремальности для температуры воздуха		
SU	Number of summer days	Среднегодовое число дней с максимальной температурой воздуха 25 °C и выше
–	–	Среднегодовое число дней с минимальной температурой воздуха –30 °C и ниже
TXx	Maximum value of daily maximum temperature	Среднегодовой максимум температуры воздуха, °C
TNn	Minimum value of daily minimum temperature	Среднегодовой минимум температуры воздуха, °C
–	–	1-й процентиль (1p) минимальной температуры воздуха в зимний сезон, °C
–	–	99-й процентиль (99p) максимальной температуры воздуха в летние месяцы, °C
Индексы экстремальности для осадков		
Rx1day	Maximum 1-day precipitation	Среднегодовой суточный максимум осадков, мм
Rx5day	Maximum consecutive 5-day precipitation	Среднегодовой максимум осадков, за 5 сут, мм
R20mm	Annual count of days when PRCP ≥ 20mm	Число дней с суточной суммой осадков ≥ 20 мм
CDD	Maximum number of consecutive days with RR < 1mm	Число последовательных сухих дней (с суточной суммой осадков < 1 мм)
–	–	99p суточной суммы осадков, мм
R99pTOT	Contribution to total precipitation from extremely wet days	Вклад очень сильных осадков в годовую сумму осадков, %

Карты экстремальных характеристик осадков построены также по данным реанализа ERA5-Land, которые отличаются наиболее высоким пространственным разрешением (9 км) среди всех доступных данных реанализов [*Muñoz-Sabater* et al., 2021]. Применение данных реанализа потенциально позволяет устранить недостатки, которые возникают при интерполяции данных станционных наблюдений в условиях сложного рельефа и редкой наблюдательной сети. На основе данных ERA5-Land были рассчитаны основные характеристики экстремумов осадков, перечисленные в табл. 1. Для расчета данные ERA5 были загружены для области, полностью включающей бассейн р. Селенги, суммированы по суткам, затем на основе полученного массива с помощью скриптов на языке программирования Python были выполнены расчеты. Результаты получены в формате Geotiff и сопоставлены с результатами интерполяции по данным метеостанций, представленными в работе [*Garmaev* et al., 2022].

Карты режимных гидрологических характеристик построены на основе двух массивов данных. По данным гидропостов в пределах российской и монгольской части бассейна, не имеющих существенных разрывов в рядах наблюдений за период с 1971 по 2020 гг. (всего 45 постов) построены карты основных характеристик стока. К ним относятся годовой слой стока, модуль максимального стока весеннего половодья, модуль минимального стока за период открытого русла и минимального зимнего стока, а также средние даты начала и окончания половодья. Для построения карт характеристик ледового режима рек доступны данные только по российской части бассейна из информационной системы АИС ГМВО[1] (за 2008–2020 гг., с 38 гидропостов). На их основе построены карты средней и максимальной толщины ледового покрова на реках, продолжительности залегания ледового покрова, дат его установления и разрушения.

Для построения карт гидрологических характеристик производилась их интерполяция из точек-центроидов бассейнов, с учетом зависимостей от ландшафтных или климатических факторов (средней высоты, среднего уклона и среднего количества осадков по данным Worldclim). Для большинства переменных наиболее выраженной оказалась зависимость от уклона местности.

В ГИС также разработаны инструменты построения интерактивных графиков ежесуточной динамики расхода и уровня воды за период 2008–2020 гг. (в соответствии с доступными данными на АИС ГМВО). Для каждой точки графиков возможна идентификация значений уровня или расхода воды.

База данных о случаях опасных гидрологических явлений (ОГЯ) собрана и опубликована для российской части бассейна р. Селенги за период с 2001 г. по настоящее время. Для сбора информации об опасных явлениях использовались ряды наблюдений гидрологических постов, а также сообщения очевидцев и СМИ, подтвержденные фото и видео событий или связанных с ними повреждений. Всего в базу данных включено 112 отчетов о случаях ОГЯ, которые относятся к 60 различным населенным пунктам и 4 местоположениям, расположенным за пределами населенных пунктов. Для каждого отчета определены причины возникновения явления (дождевой паводок, сель, весеннее половодье, образование наледи, ледового затора или зажора) и дано краткое описание явления. Также при наличии данных определены характеристики ущерба (число поврежденных домов, пострадавших и эвакуированных граждан, величина экономического ущерба). Приведены гиперссылки на информацию, опубликованную об этих явлениях в СМИ, включая фотографии и видеозаписи явлений и их последствий. На основе созданной базы данных построена комплексная карта ОГЯ в российской части бассейна р. Селенги (рис. 2).

Прочие характеристики опасных процессов гидролого-геоморфологической природы, опубликованные в ГИС, включают данные о наледях, овражно-балочной сети, селеопасных участках и зонах затопления речных пойм по спутниковым данным. Так, для российской части бассейна р. Селенги создана картографическая база данных о наледях [*Черных* и др., 2022]. На ее основе была рассчитана наледность частных бассейнов. Также выделены 136 потенциально опасных наледей, расположенных в пределах населенных пунктов или в непосредственной близости от них. Эти наледи при интенсивном развитии могут вызывать подтопление зданий и дорожного полотна, что зафиксировано в т. ч. и в созданной базе данных об ОГЯ в бассейне р. Селенги. Для каждой такой наледи указана площадь, название ближайшего населенного пункта, а также дата снимка Landsat-8, по которому наледь была идентифицирована.

Слои плотности овражно-балочной сети, а также типов селей и частоты их проявления созданы для отдельных речных бассейнов (т. е. в него включены частные

[1] Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. Электронный ресурс: https://gmvo.skniivh.ru/ (дата обращения 09.03.2023).

бассейны, в которых наблюдались эти явления). Зоны затопления по спутниковым данным выделены в основном по снимкам, полученным 29–31 августа 2021 г., когда на р. Селенге проходил мощный дождевой паводок, вызванный сильными дождями на западе монгольской части бассейна (для гидропоста Наушки паводок соответствовал примерно 5 % обеспеченности).

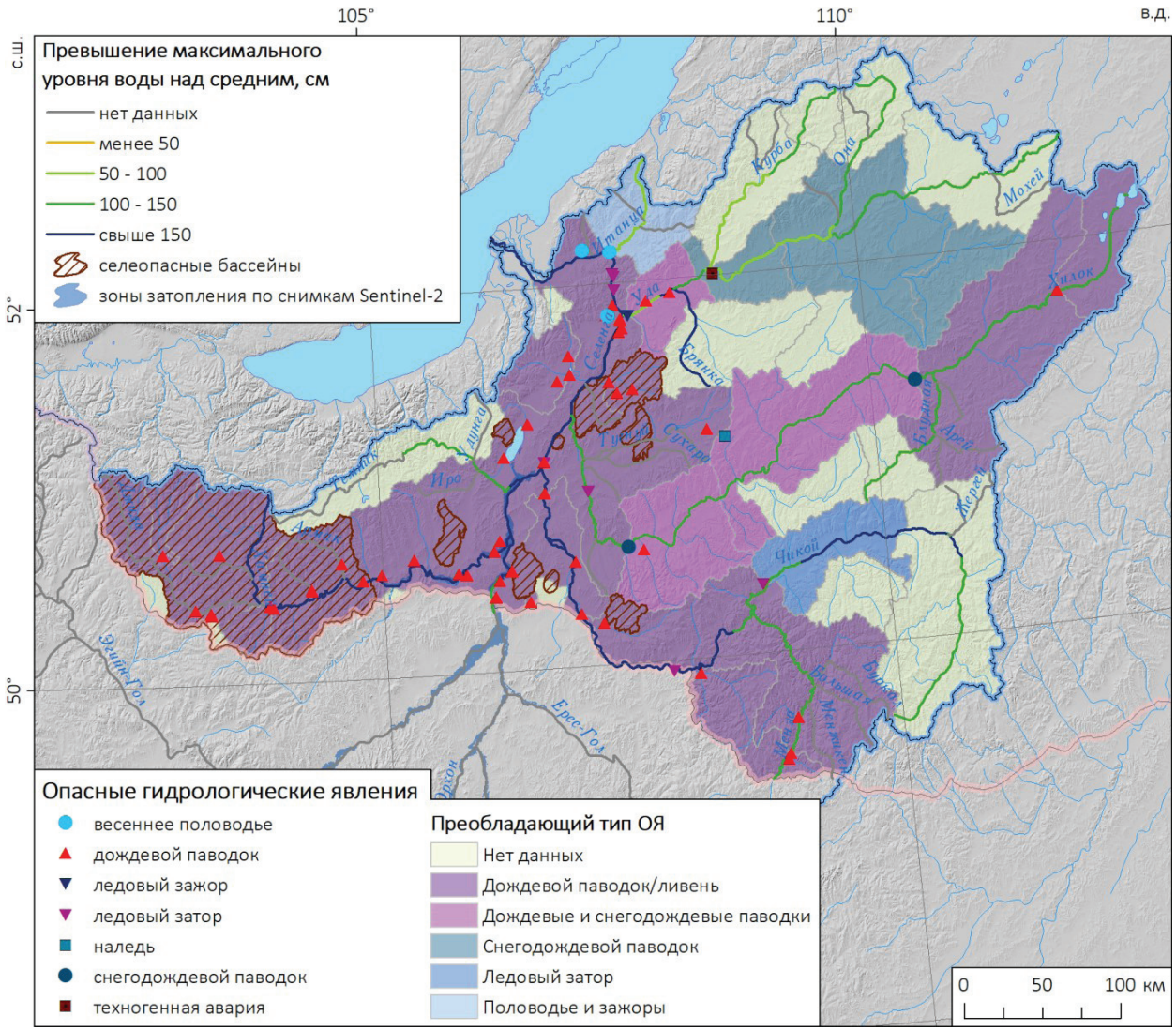


Рис. 2. Комплексная карта опасных гидрологических явлений в российской части бассейна р. Селенги
Fig. 2. A comprehensive map of hazardous hydrological events in the Russian part of the Selenga River basin

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности программной реализации, информационного наполнения и функциональности ГИС

Информационной основой веб-ГИС является картографическая база данных, для управления и редактирования которой используется свободная объектно-реляционная СУБД PostgreSQL с установленным расширением PostGIS. Данное расширение обеспечивает возможность хранения пространственных данных в реляционной базе

данных. При разработке интерфейса пользователя и функциональных возможностей картографического веб-сервиса используется стек технологий HTML5, CSS3, JavaScript. Для публикации пространственных данных используется открытый картографический сервер GeoServer, а для их отображения в веб-приложении — JavaScript-библиотека Leaflet. Вид стартовой страницы веб-ГИС представлен на рис. 3. Основные ее функциональные возможности включают просмотр на интерактивной карте различных тематических слоев в растровом и векторном представлении и их атрибутивных характеристик, а также некоторые дополнительные инструменты визуализации и анализа.

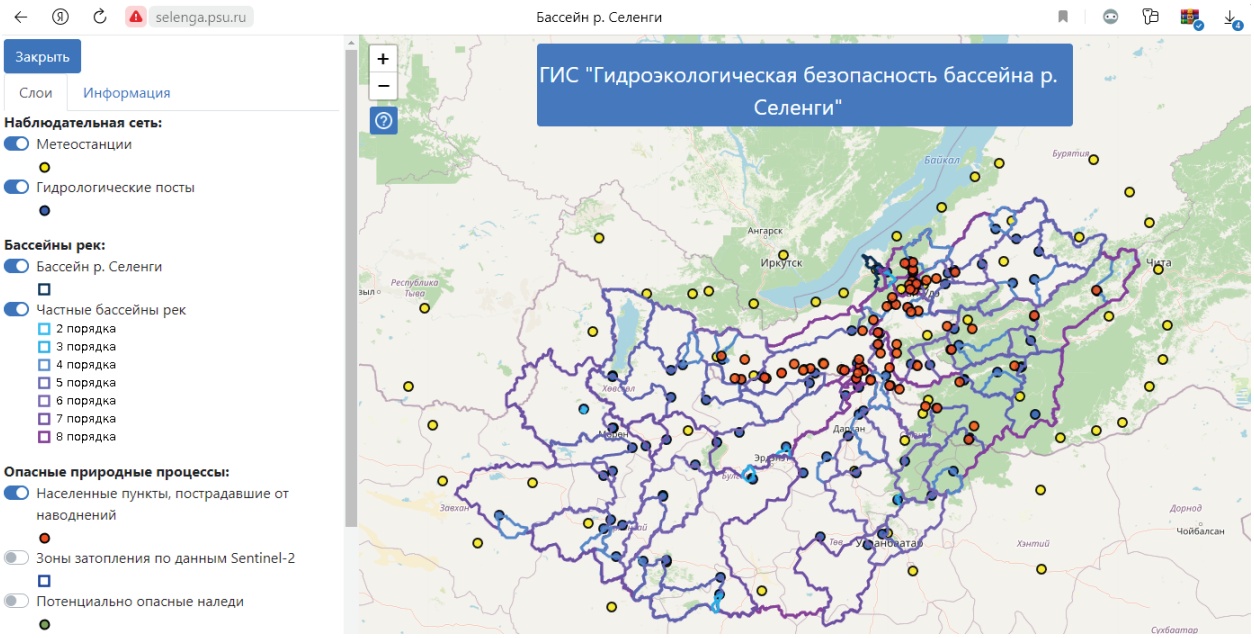


Рис. 3. Стартовая страница веб-ГИС «Гидроэкологическая безопасность бассейна р. Селенги»
Fig. 3. The main page of the web GIS "Hydrological and environmental safety of the Selenga River basin"

Так, пространственное распределение климатических и гидрологических параметров представлено в виде растров с пространственным разрешением 1000 м. Эти показатели разбиты на 5 групп: средние многолетние климатические характеристики по данным WorldClim, экстремальные климатические характеристики, расчетные характеристики снежного покрова, характеристики речного стока и ледовых явлений. Для климатических характеристик доступны данные за 4 скользящих 30-летних периода осреднения (с 1961 по 2020 гг.), что позволяет оценить их изменения на фоне современного потепления климата. Реализована возможность идентификации (просмотра значений) в ячейках растра. Для каждого растра подобрана оптимальная цветовая шкала и реализовано автоматическое построение легенды (рис. 4).

Реализовано также построение интерактивных графиков средних и экстремальных климатических характеристик по метеостанциям (рис. 5) и суточных значений расхода и уровня воды (рис. 6) по гидропостам. Климатические данные доступны за весь период наблюдений (например, по метеостанции Улан-Удэ — с 1900 г.), а гидрологические данные — за период с 2008 по 2020 г., в соответствии с доступностью архива АИС ГМВО.

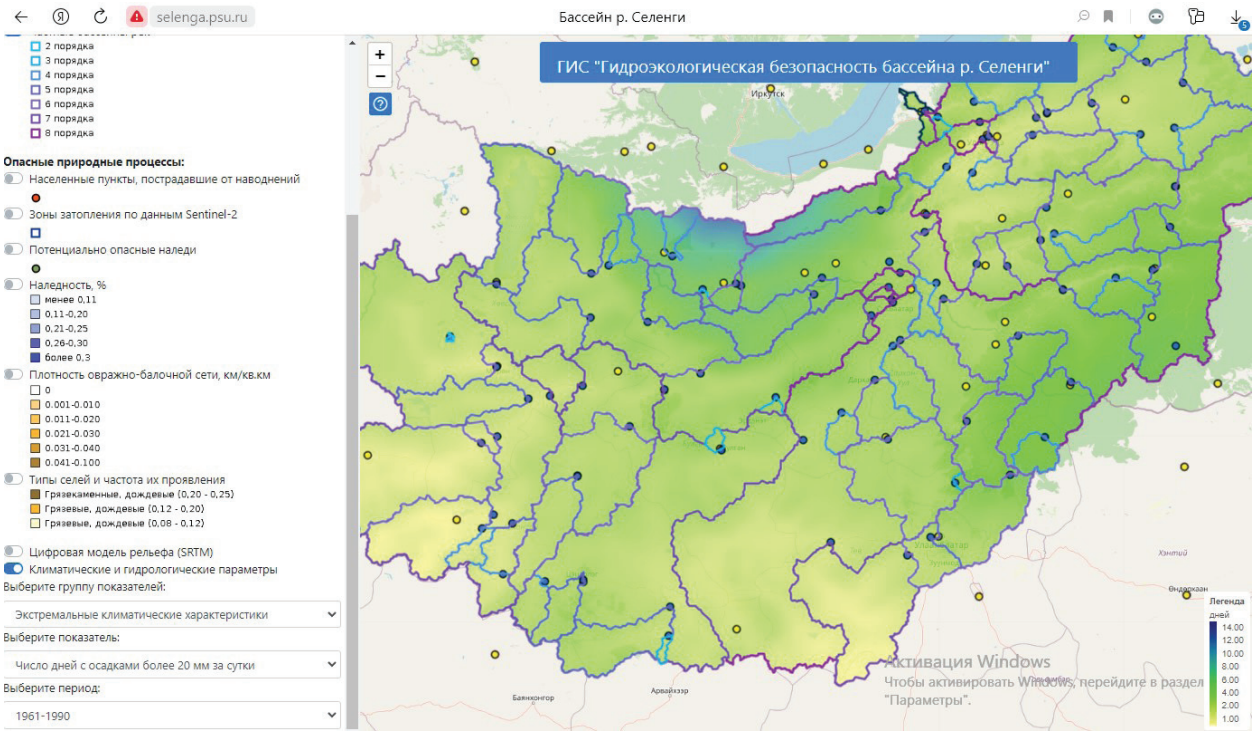


Рис. 4. Визуализация пространственного распределения экстремальных климатических характеристик
Fig. 4. Visualization of the spatial distribution of extreme climatic characteristics

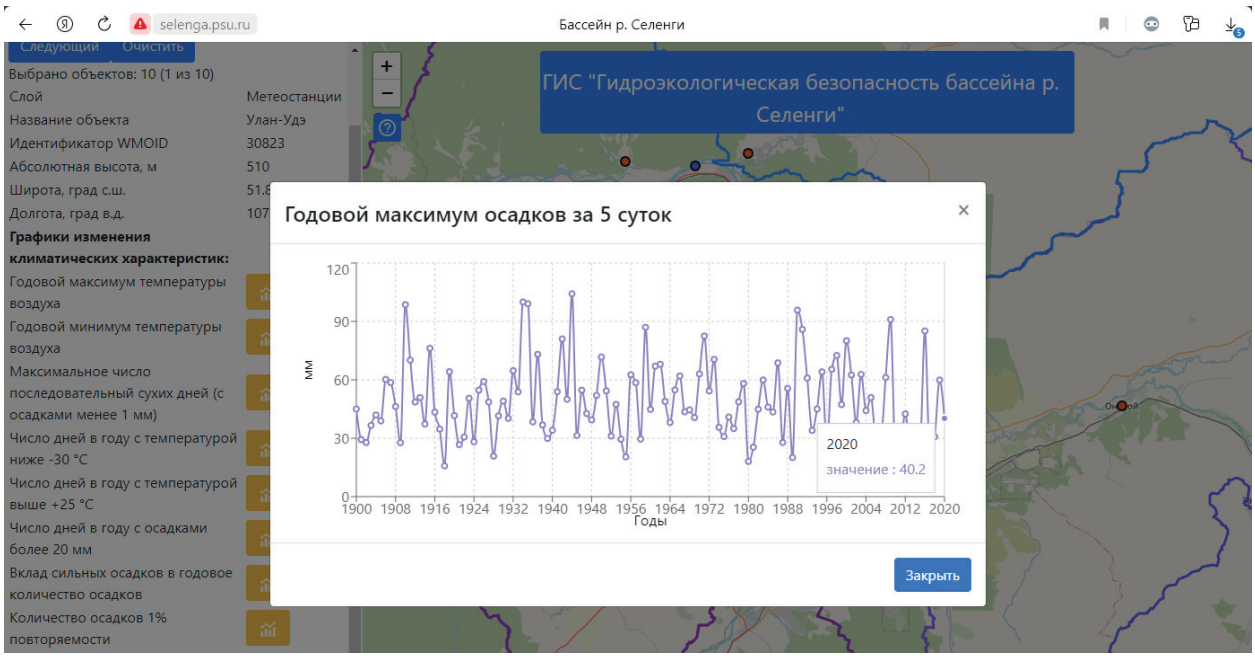


Рис. 5. Интерактивный график максимального годового количества осадков за 5 сут (Rx5day) за период 1900–2020 гг. по метеостанции Улан-Удэ
Fig. 5. Interactive graph of the highest five-day precipitation amount (RX5day) for the period 1900–2020 according to Ulan-Ude weather station

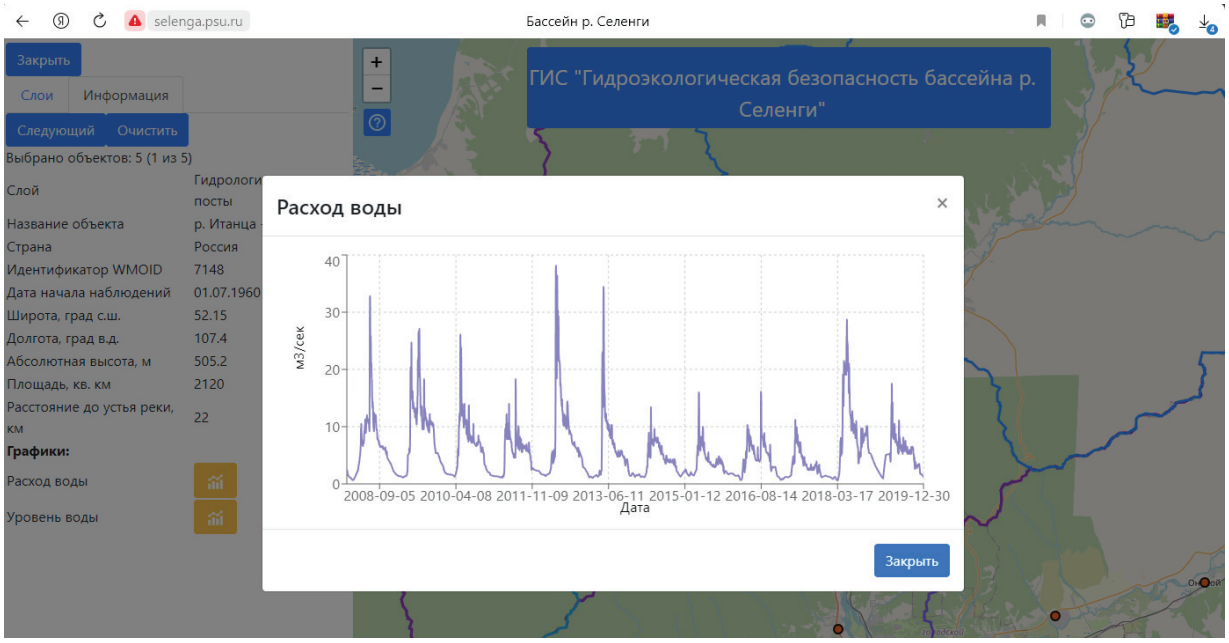


Рис. 6. Интерактивный график суточной динамики расхода воды на гидропосту р. Итанца — пос. Турунтаево за 2008–2019 гг.
Fig. 6. Interactive graph of daily water discharge at the gauging station Itanza River — Turuntaevo for 2008–2019

Установлено также, что реанализ ERA5 существенно недооценивает как среднегодовую сумму осадков, так и значения экстремальных характеристик. В среднем по бассейну годовая сумма осадков составляет 333 мм по данным наблюдений и 253 мм по данным реанализа. Максимальные различия (более чем в 2 р.) отмечены на севере бассейна вблизи южных склонов Хамар-Дабана. На западе монгольской части бассейна среднегодовое количество осадков по данным реанализа больше, чем по данным наблюдений, на 10–60 мм. Среднее число дней с осадками ≥20 мм (R20) в бассейне р. Селенги по данным наблюдений составляет 2,7, а по данным реанализа — 1,5, при этом пространственное распределение данного показателя по данным наблюдений и по данным реанализа существенно различается (рис. 7). Значения суточной суммы осадков 1 % повторяемости (R99p) по данным наблюдений в среднем по бассейну составляет 15,4 мм, а по данным реанализа — 8,2 мм. Несмотря на существенные различия между данными наблюдений и реанализа, нужно иметь в виду, что в связи с редкостью сети наблюдений (особенно в монгольской части бассейна) оценка пространственного распределения экстремальных осадков по данным реанализа может быть физически более обоснованной, чем по результатам интерполяции.

Характеристики опасных гидрологических явлений в бассейне р. Селенги на основе созданной базы данных детально рассмотрены в работе [*Pyankov* et al., 2022]. Из 112 случаев, внесенных в базу данных, 87 связаны с дождевыми паводками, также существенный вклад вносят ледовые заторы и зажоры (12 случаев). Более половины всех случаев, внесенных в базу данных (64 из 112), отмечалось в 2019–2021 гг., что обусловлено как объективными факторами (увеличением количества осадков в эти годы и частыми дождевыми паводками), так и повышением доступности информации. В наиболее засушливом 2015 г. не отмечалось вообще ни одного случая. Во внутригодовом распределении более трети всех случаев приходится на август, что соответствует периоду максимальной частоты возникновения дождевых паводков. Наиболее паводкоопасными

населенными пунктами являются г. Улан-Удэ, пос. Новоселенгинск и с. Наушки (все расположены на р. Селенге), где за период 2001–2021 гг. отмечалось по 7–8 случаев ОГЯ.

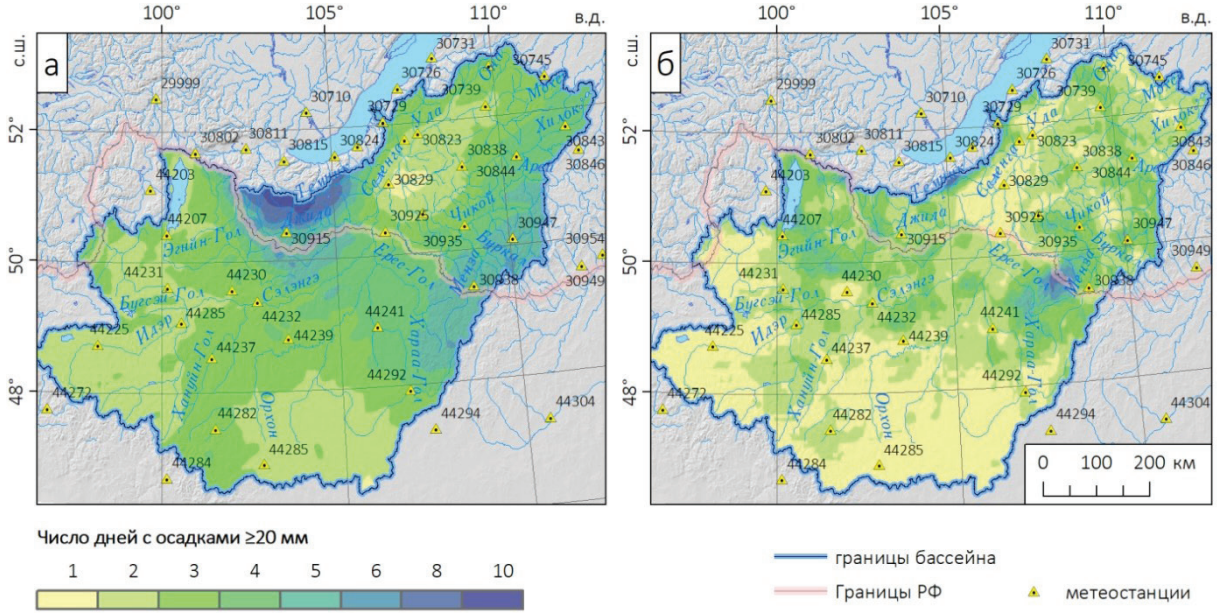


Рис. 7. Число дней с осадками ≥20 мм: а — по данным метеостанций, б — по данным ERA5

Fig. 7. Number of days with precipitation ≥20 mm (R20): a — according to weather stations data, b — according to the ERA5 data

ВЫВОДЫ

Веб-ГИС гидроэкологической безопасности в бассейне р. Селенги является первым подобным информационным ресурсом для Байкальского региона. Она уже сейчас обеспечивает пользователям достаточно широкие возможности анализа климатических и гидрологических характеристик, а также опасных процессов гидролого-геоморфологической природы. Веб-ГИС интегрирует разнородные данные, значительная часть которых ранее не публиковалась или была доступна только в табличном виде (без географической привязки). Таким образом, она может быть полезна для широкого круга специалистов, работающих в области изучения бассейна Байкала в целом.

Дальнейшие перспективы развития и совершенствования веб-ГИС связаны с публикацией ранее созданных и новых картографических слоев и баз данных в Байкальском институте природопользования СО РАН (в частности, в рамках продолжающихся исследований наледных процессов в бассейне Селенги). Блок климатических характеристик может быть дополнен за счет новых данных, полученных на основе современного реанализа ERA5 и прогнозов будущего климата на XXI в. по различным сценариям, а расширение наполнения гидрологического раздела возможно как за счет увеличения продолжительности рядов наблюдений, так и оценочного картографирования опасностей и рисков, связанных с разными видами ОГЯ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РНФ (грант № 20-17-00207).

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Scientific Foundation (Project No. 20-17-00207).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Борисова Т.А. Геоэкологическая оценка природно-антропогенного риска в бассейне р. Селенга. Автореферат диссертации… кандидата географических наук. Улан-Удэ, 2010. 23 с.

Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Система прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани. Гидрометеорологические исследования и прогнозы, 2015. Спец. вып. 356. 247 с.

Гармаев Е.Ж., Христофоров А.В. Водные ресурсы рек бассейна озера Байкал: основы их использования и охраны. Новосибирск: ГЕО, 2010. 227 с.

Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Мухарамова С.С., Харченко С.В., Веденеева Е.А. Картографическая модель речных бассейнов Европейской России. География и природные ресурсы, 2017. № 2. С. 27–36. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(27-36).

Калинин В.Г., Пьянков С.В. Применение геоинформационных технологий в гидрологических исследованиях: монография. Пермь: Алекс-Пресс, 2010. 2017 с.

Фролова Н.Л., Белякова П.А., Григорьев В.Ю., Сазонов А.А., Зотов Л.В. Многолетние колебания стока рек в бассейне Селенги. Водные ресурсы, 2017. Т. 44. № 3. С. 243–255. DOI: 10.7868/S0321059617030105.

Черных В.Н., Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Содномов Б.В., Шихов А.Н., Цыдыпов Б.З., Гармаев Е.Ж., Пьянков С.В. Картографирование наледей в трансграничном бассейне р. Чикой. Географический вестник, 2022. № 62 (3). С. 169–179. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-3-169-179.

Чернышов М.С. Природно-климатические и антропогенные факторы формирование уровенного режима озера Байкал. Автореферат диссертации… кандидата географических наук. Иркутск, 2022. 22 с.

Alexander L.V., Zhang X., Peterson T.C., Caesar J., Gleason B., Klein Tank A.M.G., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Rupa Kumar K., Revadekar J., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D.B., Burn J., Aguilar E., Brunet M., Taylor M., New M., Zhai P., Rusticucci M., Vazquez-Aguirre J.L. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. Journal of Geophysical Research, 2006. V. 111. D05109. DOI: 0.1029/2005JD006290.

Ayzel G., Varentsova N., Erina O., Sokolov D., Kurochkina L., Moreydo V. OpenForecast: The First Open-Source Operational Runoff Forecasting System in Russia. Water, 2019. V. 11. No. 1546. DOI: 10.3390/w11081546.

Bazhenova O.I., Bardash A.V., Makarov S.A., Opekunova M.Y., Tukhta S.A., Tyumentseva E.M. The functioning of erosion-channel systems of the river basins of the south of Eastern Siberia. Geosciences, 2020. V. 10. No. 176. DOI: 10.3390/geosciences10050176.

Borsch S., Simonov Y., Khristoforov A., Semenova N., Koliy V., Ryseva E., Krovotyntsev V., Derugina V. Russian rivers streamflow forecasting using hydrograph extrapolation method. Hydrology, 2022. V. 9. No. 1. DOI: 10.3390/hydrology9010001.

Bulygina O., Razuvaev V., Korshunova N., Groisman P. Climate variations and changes in extreme climate events in Russia. Environmental Research Letters, 2007. V. 2 (4). No. 045020. DOI: 10.1088/1748-9326/2/4/045020.

Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I., Semenov V. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades. Environmental Research Letters, 2019. V. 14 (4). No. 045001. DOI: 10.1088/1748-9326/aafb82.

Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology, 2017. V. 37. P. 4302–4315. DOI: 10.1002/joc.5086.

Frolov A.V., Asmus V.V., Borshch S.V., Vil'fand R.M., Zhabina I.I., Zatyagalova V.V., Krovotyntsev V.A., Kudryavtseva O.I., Leont'eva E.A., Simonov Y.A., Stepanov Y.A. GIS-Amur system of flood monitoring, forecasting, and early warning. Russian Meteorology and Hydrology, 2016. V. 41 (3). P. 157–169. DOI: 10.3103/S1068373916030018.

Garmaev E.Z., P'yankov S.V., Shikhov A.N., Ayurzhanaev A.A., Sodnomov B.V., Abdullin R.K., Tsydypov B.Z., Andreev S.G., Chernykh V.N. Mapping modern climate change in the Selenga River basin. Russian Meteorology and Hydrology, 2022. V. 47 (3). P. 113–122. DOI: 10.3103/S1068373922020054.

Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. Science, 2013. V. 342. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.

Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations — the CRU TS3.10 Dataset. International Journal of Climatology, 2014. V. 34. P. 623–642. DOI: 10.1002/joc.3711.

Kichigina N.V. Flood hazard on the rivers of the Baikal Region. Geography and Natural Resources, 2018. V. 39 (2). P. 120–129. DOI: 10.1134/S187537281802004X.

Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D.G., Piles M., Rodríguez-Fernández N.J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N. ERA5-land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. Earth System Science Data, 2021. V. 13 (9). P. 4349–4383. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.

Pyankov S., Shikhov A., Ayurzhanaev A., Chernykh V., Abdullin R., Shabalina T. Application of GIS technologies to assess hydrological and environmental safety of the Selenga River basin. Science and Global Challenges of the 21st Century — Science and Technology. Perm Forum 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, 2022. Springer, Cham. V. 342. DOI: 10.1007/978-3-030-89477-1_13.

Sinyukovich V.N., Chernyshov M.S. Water regime of Lake Baikal under conditions of climate change and anthropogenic influence. Quaternary International, 2019. V. 524. P. 93–101. DOI: 10.1016/j.quaint.2019.05.023.

Tsydypov B.Z., Sodnomov B.V., Chernykh V.N., Ilyin Y.M., Gurzhapov B.O., Ayurzhanaev A.A., Semenova M.V., Zharnikova M.A., Alymbaeva Z.B., Batotsyrenov E.A., Li F., Cheng H., Bazarzhapov T., Boldanov T., Dong S., Garmaev E.Z. Intensity assessment of erosion-accumulative processes in the Selenga middle mountains (case study of the gully network of the Nizhnyaya Bulanka depression, Western Transbaikalia). Geosciences (Switzerland), 2020. V. 10 (10). P. 1–15. DOI: 10.3390/geosciences10100387.

REFERENCES

Alexander L.V., Zhang X., Peterson T.C., Caesar J., Gleason B., Klein Tank A.M.G., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Rupa Kumar K., Revadekar J., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D.B., Burn J., Aguilar E., Brunet M., Taylor M., New M., Zhai P., Rusticucci M., Vazquez-Aguirre J.L. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. Journal of Geophysical Research, 2006. V. 111. D05109. DOI: 0.1029/2005JD006290.

Ayzel G., Varentsova N., Erina O., Sokolov D., Kurochkina L., Moreydo V. OpenForecast: The First Open-Source Operational Runoff Forecasting System in Russia. Water, 2019. V. 11. No. 1546. DOI: 10.3390/w11081546.

Bazhenova O.I., Bardash A.V., Makarov S.A., Opekunova M.Y., Tukhta S.A., Tyumentseva E.M. The functioning of erosion-channel systems of the river basins of the south of Eastern Siberia. Geosciences, 2020. V. 10. No. 176. DOI: 10.3390/geosciences10050176.

Borisova T.A. Geoecological assessment of natural and anthropogenic risk in the Selenga River basin. Abstract of PhD geogr. sci. thesis. Ulan-Ude, 2010. 23 p. (in Russian).

Borshch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Flood forecasting and early flood warning system on the rivers of the Black Sea Coast of the Caucasus and the Kuban Basin. Hydrometeorological Research and Forecasting, 2015. Special Iss. 356. 247 p. (in Russian).

Borsch S., Simonov Y., Khristoforov A., Semenova N., Koliy V., Ryseva E., Krovotyntsev V., Derugina V. Russian rivers streamflow forecasting using hydrograph extrapolation method. Hydrology, 2022. V. 9. No. 1. DOI: 10.3390/hydrology9010001.

Bulygina O., Razuvaev V., Korshunova N., Groisman P. Climate variations and changes in extreme climate events in Russia. Environmental Research Letters, 2007. V. 2 (4). No. 045020. DOI: 10.1088/1748-9326/2/4/045020.

Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I., Semenov V. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades. Environmental Research Letters, 2019. V. 14 (4). No. 045001. DOI: 10.1088/1748-9326/aafb82.

Chernykh V.N., Ayurzhanaev A.A., Zharnikova M.A., Sodnomov B.V., Shikhov A.N., Tsydypov B.Z., Garmaev E.Zh., Pyankov S.V. Mapping of aufeis in the transboundary basin of the Chikoy River. Geographical Bulletin, 2022. No. 62 (3). P. 169–179 (in Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2022-3-169-179.

Chernyshov M.S. Natural-climatic and anthropogenic factors formation of the level regime of Lake Baikal. Abstract of PhD geogr. sci. thesis. Irkutsk, 2022. 22 p. (in Russian).

Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology, 2017. V. 37. P. 4302–4315. DOI: 10.1002/joc.5086.

Frolov A.V., Asmus V.V., Borshch S.V., Vil'fand R.M., Zhabina I.I., Zatyagalova V.V., Krovotyntsev V.A., Kudryavtseva O.I., Leont'eva E.A., Simonov Y.A., Stepanov Y.A. GIS-Amur system of flood monitoring, forecasting, and early warning. Russian Meteorology and Hydrology, 2016. V. 41 (3). P. 157–169. DOI: 10.3103/S1068373916030018.

Frolova N.L., Belyakova P.A., Grigoriev V.Yu., Sazonov A.A., Zotov L.V. Long-term fluctuations in river flow in the Selenga basin. Water Resources, 2017. V. 44 (3). P. 243–255 (in Russian). DOI: 10.7868/S0321059617030105.

Garmaev E.Zh., Khristoforov A.V. Water resources of the rivers of the Baikal basin: the basics of their use and protection. Novosibirsk: GEO, 2010. 227 p. (in Russian).

Garmaev E.Zh., Pyankov S.V., Shikhov A.N., Ayurzhanaev A.A., Sodnomov B.V., Abdullin R.K., Tsydypov B.Z., Andreev S.G., Chernykh V.N. Mapping modern climate change in the Selenga River basin. Russian Meteorology and Hydrology, 2022. V. 47 (3). P. 113–122. DOI: 10.3103/S1068373922020054.

Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. Science, 2013. V. 342. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.

Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations — the CRU TS3.10 Dataset. International Journal of Climatology, 2014. V. 34. P. 623–642. DOI: 10.1002/joc.3711.

Kalinin V.G., Pyankov S.V. Application of GIS technologies in hydrological studies. Perm: Alex-Press, 2010. 2017 p. (in Russian).

Kichigina N.V. Flood hazard on the rivers of the Baikal Region. Geography and Natural Resources, 2018. V. 39 (2). P. 120–129. DOI: 10.1134/S187537281802004X.

Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D.G., Piles M., Rodríguez-Fernández N.J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N. ERA5-land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. Earth System Science Data, 2021. V. 13 (9). P. 4349–4383. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.

Pyankov S., Shikhov A., Ayurzhanaev A., Chernykh V., Abdullin R., Shabalina T. Application of GIS technologies to assess hydrological and environmental safety of the Selenga River basin. Science and Global Challenges of the 21st Century — Science and Technology. Perm Forum 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, 2022. V. 342. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-89477-1_13.

Sinyukovich V.N., Chernyshov M.S. Water regime of Lake Baikal under conditions of climate change and anthropogenic influence. Quaternary International, 2019. V. 524. P. 93–101. DOI: 10.1016/j.quaint.2019.05.023.

Tsydypov B.Z., Sodnomov B.V., Chernykh V.N., Ilyin Y.M., Gurzhapov B.O., Ayurzhanaev A.A., Semenova M.V., Zharnikova M.A., Alymbaeva Z.B., Batotsyrenov E.A., Li F., Cheng H., Bazarzhapov T., Boldanov T., Dong S., Garmaev E.Z. Intensity assessment of erosion-accumulative processes in the Selenga middle mountains (case study of the gully network of the Nizhnyaya Bulanka depression, Western Transbaikalia). Geosciences (Switzerland), 2020. V. 10 (10). P. 1–15. DOI: 10.3390/geosciences10100387.

Yermolaev O.P., Maltsev K.A., Mukharamova S.S., Kharchenko S.V., Vedeneeva E.A. Cartographic model of river basins in European Russia. Geography and Natural Resources, 2017. No. 2. P. 27–36 (in Russian). DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(27-36).

УДК: 528.9+911.2 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-104-122**

Т.И. Кузнецова[1]

МЕТОДОЛОГИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МЕЛКОМАСШТАБНОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ГЕОСИСТЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИМИ РИСКАМИ

АННОТАЦИЯ

В рамках тематического раздела «Экологическое состояние природной среды, природные экологические риски» электронного географического Атласа Северной и Северо-Восточной Азии разработана методология мелкомасштабного картографирования геосистем как процедуры подготовки научной информации о природном географическом объекте для обеспечения управления экологическими рисками. Научной основой исследования является теория пространственно-временной организации и методология конструктивного интеграционного картографирования геосистем. Природный экологический риск понимается как вероятность негативных изменений в структуре и функционировании геосистем в случае естественных или антропогенно-обусловленных явлений и процессов в среде обитания. Разработаны методы создания, структура, содержание единой информационно-картографической системы Монгольско-Сибирского региона геосистемного содержания м-ба 1: 5 000 000. Для этих целей были проанализированы географически и концептуально несогласованные карты геосистем регионов Сибири и Монголии. Выявлены закономерности пространственно-временной организации, региональные особенности функциональной дифференциации природных систем. По результатам исследования сделаны научные обобщения, касающиеся описания геосистем регионального ранга, их типизации, классификации, районирования. Раскрыт прогностический потенциал мелкомасштабных карт геосистем применительно к географическим исследованиям природных экологических рисков, основанный на процедуре анализа геосистем по типологическим функциональным, структурным, динамическим признакам. Характеристики природных факторов интенсивности функционирования, экологических функций геосистем послужили индикаторами в экологическом нормировании использования природных систем, позволили корректно обосновать природоохранные рекомендации по минимизации нежелательных последствий. Демонстрируется специализированная классификация-легенда и карта зонирования территории Монгольско-Сибирского региона, отражающие последовательность многоэтапных картографических исследований природного экологического риска и структурирование физико-географической информации. Созданные карты составляют базовый набор в структуре пространственных данных электронного Атласа, на их основе могут быть созданы новые карты геосистем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геоинформационное картографирование, экологические риски, управление, геосистемные признаки-индикаторы, Монгольско-Сибирский регион

[1] Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, д. 1, Иркутск, Россия, 664033, *e-mail:* **kuznetzovad@yandex.ru**

Tatiana I. Kuznetsova[1]

METHODOLOGY OF GEOINFORMATION SMALL-SCALE MAPPING OF GEOSYSTEMS FOR ENVIRONMENTAL RISK MANAGEMENT

ABSTRACT

Within the framework of the thematic section "Ecological state of the natural environment, natural environmental risks" of the electronic geographical Atlas of North and Northeast Asia, a methodology for small-scale mapping of geosystems has been developed as a procedure for preparing scientific information about a natural geographical object to ensure environmental risk management. The scientific basis of the research is the theory of spatial and temporal organization and the methodology of constructive integration mapping of geosystems. Natural ecological risk is understood as the probability of negative changes in the structure and functioning of geosystems in the case of natural or anthropogenic phenomena and processes in the habitat. The methods of creation, structure, and content of the unified information and cartographic system of the Mongolian-Siberian region of geosystem content of scale 1: 5 000 000 have been developed. For these purposes, geographically and conceptually inconsistent maps of the geosystems of the regions of Siberia and Mongolia were analyzed. The patterns of spatial and temporal organization, regional features of functional differentiation of natural systems are revealed. Based on the results of the study, scientific generalizations were made concerning the description of geosystems of regional rank, their typification, classification, and zoning. The prognostic potential of small-scale maps of geosystems in relation to geographical studies of natural environmental risks based on the procedure for analyzing geosystems by typological functional, structural, and dynamic features is revealed. The characteristics of natural factors of the intensity of functioning, ecological functions of geosystems served as indicators in the environmental regulation of the use of natural systems, allowed to correctly substantiate environmental recommendations to minimize undesirable consequences. A specialized classification is demonstrated — a legend and a zoning map of the territory of the Mongolian-Siberian region, reflecting the sequence of multi-stage cartographic studies of natural environmental risk and the structuring of physical and geographical information. The created maps make up the basic set in the structure of spatial data of the electronic Atlas, new maps of geosystems can be created on their basis.

KEYWORDS: geoinformation mapping, environmental risks, management, geosystem signs-indicators, Mongolian-Siberian region

ВВЕДЕНИЕ

Исследование выполнено в рамках программы создания электронного географического «Атласа территориального развития регионов Северной и Северо-Восточной Азии» с целью информационного обеспечения экологически ориентированной политики развития крупных регионов Евразийского материка. Для тематического раздела Атласа «Экологическое состояние природной среды, природные экологические риски» разработан блок карт природной среды геосистемного содержания для решения экологических, конструктивно-географических, природоохранных, управленческих задач. Целью предлагаемого исследования была разработка методологии мелкомасштабного картографирования геосистем как процедуры подготовки научной информации о природном географическом объекте для управления природными экологическими рисками (ЭР) в крупных регионах.

[1] V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 1, Ulan-Batorskaya str., Irkutsk, 664033, Russia, *e-mail:* **kuznetzovad@yandex.ru**

Научная концепция ЭР начала складываться на рубеже XX–XXI вв. в условиях активного воздействия человека на природу, когда парадигма географической среды стала сменяться парадигмой экологии выживания человека. В современной междисциплинарной теории о рисках понятию «природного экологического риска» придается значение вероятности негативных изменений в структуре и функционировании природных и природно-антропогенных систем в случае естественных или антропогенно обусловленных событий и процессов в среде обитания [Устойчивое…, 1998]. С точки зрения природной составляющей оценка ЭР — это оценка текущего состояния природной среды, географический прогноз его возможного изменения в результате спонтанного развития или антропогенного воздействия; управление природными ЭР подразумевает конкретные действия по предотвращению или уменьшению развития отрицательных экологических ситуаций в природной среде [Экологический…, 1998].

В настоящее время пространственный анализ природных ЭР проводится на основе картографических методов исследования организации геосистем по их экологически значимым характеристикам [*Кузнецова*, 2017]. Стремительные темпы развития геоинформационного картографирования, которые обусловлены нарастающими социально-экономическими потребностями общества в достоверной информации о состоянии природной среды, повысили требования к географическим наукам, в т. ч. к картографии. Существующий спрос на прогнозные исследования развития неблагоприятных процессов и явлений в природной среде обусловливает необходимость создания единой информационной базы об объекте исследования в виде региональных, государственных, межгосударственных информационно-картографических систем геосистемного содержания как особых систем инвентаризации, оценки, прогнозирования и целевого управления. Цифровые тематические карты природных систем, на основе которых могут создаваться новые производные карты, составляют базовый набор в инфраструктуре пространственных данных национальной системы Российской Федерации [*Карпик* и др., 2021; *Тарарин*, 2022].

В процессе использования ранее опубликованных традиционных или электронных концептуально несогласованных, территориально разрозненных карт геосистем часто возникает проблема пространственного и тематического согласования географической информации [*Berry*, 1987; *Lechthaler*, 2010; *Kuznetsova, Lopatkin*, 2019]. Решение этой проблемы с научной и практической точек зрения требует методологического единства картографической проработки геосистемной информации в широком тематическом и масштабном диапазонах. В этой связи картографирование геосистем оформилось в самостоятельное направление комплексного исследования и отображения структуры, функционирования, динамики природных структур всех уровней организации. На основе характеристик геосистем, их инвариантных структур, переменных, производных состояний, принадлежащих одной классификационной категории, проводятся интерпретационные картографические исследования, оценка текущих и потенциальных внутри- и межсистемных противоречий, которые приводят к смене состояния природных систем.

Полисистемная концепция организации геосистем, методология конструктивного интеграционного интерпретационного картографирования стали той научной основой, которая объединила экологический, антропоэкологический, эколого-географический аспекты геосистемных исследований природной среды в качестве ступеней единого аналитического процесса [Экологическое…, 1996; *Козин*, 2009]. Основным методическим приемом создания комплексных геоэкологических карт геосистем выступает последовательность операций многоэтапного геосистемного анализа, элементы которого выдаются один за другим серией сопряженных мелкомасштабных тематических карт,

«в совокупности обеспечивающих целостность отображаемых объектов как с точки зрения взаимообусловленных природных факторов, так и тенденций развития» [*Михеев*, 1987, с. 35]. Карты геосистем комплексного геоэкологического содержания получили широкое распространение в региональных атласах [Национальный…, 1990; Экологический…, 2015; Атлас…, 2021].

Актуальность предлагаемой работы определяется необходимостью дальнейшего развития конструктивного интеграционного картографического метода исследования геосистем как важнейшего инструмента определения потенциальных экологических возможностей обширных территорий. Требуется дальнейшее совершенствование методов картографического геоэкологического анализа геосистем, определение новых форм применения общенаучных классификационных принципов акад. В.Б. Сочавы, создание специализированных классификаций-легенд целевых карт геосистем, которые призваны отобразить геосистемы иерархического уровня, который в наибольшей степени отвечает целям, назначению, масштабу, особенностям региона исследования.

В процессе исследования решались следующие задачи:

1 – проанализировать карты геосистем регионов Сибири и Монголии, созданные с использованием принципов научной классификации геосистем акад. В.Б. Сочавы, выявить закономерности пространственно-временной организации, региональные особенности функциональной дифференциации геосистем, по результатам сделать картографические обобщения, касающиеся описания природных систем регионального иерархического ранга, их типизации, классификации;

2 – раскрыть прогностический потенциал мелкомасштабных карт геосистем регионального ранга применительно к географическим исследованиям природных экологических рисков в крупных регионах, основанный на процедуре анализа типологических классификационных признаков геосистем, многоэтапной геоэкологической интерпретации геосистемной информации;

3 – реализовать на практике разработанную методологию создания единой картографической системы карт природной среды Монгольско-Сибирского региона геосистемного геоэкологического содержания м-ба 1: 5 000 000 для информационного обеспечения управления природными ЭР.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Научной основой изучения и картографирования природных ЭР исследуемого региона является теория полисистемной пространственно-временной организации и конструктивного картографирования геосистем [*Михеев*, 1987]. Объекты картографирования — геосистемы рассматриваются как «географические пространства, где все компоненты природы находятся в тесной взаимосвязи друг с другом и как определенная целостность взаимодействуют с космической сферой и человеческим обществом» [*Сочава*, 2005, с. 292].

Исходя из комплексности содержания определения «геосистема», понятие «организация геосистем» используется нами в 3 аспектах: как состояние (состав) структурной и пространственно-иерархической упорядоченности геосистем в конкретный промежуток времени, как процесс упорядочения природных образований в результате спонтанного развития (самоорганизация, саморегулирование) и как упорядочивание в результате целевого использования (управление) [*Булатов*, 1977; *Коновалова*, 2012; *Бакланов*, 2019]. Основной идеологией картографирования организации геосистем является методология конструктивного интеграционного подхода к отображению комплекса характеристик природных систем как с точки зрения взаимообусловленных природных факторов, так и тенденций развития и использования.

Территория исследования — Монгольско-Сибирский регион рассматривается как целостное иерархически организованное географическое образование, принадлежащее двум государствам: Российской Федерации (в пределах Иркутской области, Республики Бурятия, Забайкальского края) и Монголии (в границах аймаков, расположенных в бассейне р. Селенги). Согласно «схеме физико-географического районирования» [*Сочава*, 2005, с. 17], эта территория является местом контакта 4 ландшафтных областей внетропической Азии: Среднесибирской таежно-плоскогорной, Южно-Сибирской горной, Байкало-Джугджурской горно-таежной, Северо-Монгольской полупустынно-степной.

Формирование географического знания о геосистемах исследуемой территории проводилось на основе данных геоинформационного регионально-типологического, иерархического, функционального, динамического, экологического, логико-ситуационного анализа. Важное значение имели опубликованные разномасштабные, географически разрозненные, концептуально несогласованные традиционные и электронные типологические карты геосистем регионов Сибири и Монголии, а также карты физико-географического районирования, экологического зонирования территории.

Все полученные данные были систематизированы, обобщены тематически и географически с целью описания природных систем регионального иерархического ранга, их типизации, классификации, районирования с использованием принципов классификации геосистем акад. В.Б. Сочавы.

В процессе создания интерпретационных картографических моделей геосистемного геоэкологического содержания применялись методы ландшафтной индикации геосистемной информации. Важное индикационное значение имели параметры природных факторов интенсивности функционирования геосистем (тепло-, влагообеспеченности, биологической продуктивности растительности), количественные значения которых были получены в результате анализа ландшафтно-экологических, антропоэкологических, эколого-географических, геоэкологических тематических карт [*Букс* и др., 1977; *Кузнецова* и др., 2009], карт географических атласов [Национальный…, 1990; Экологический…, 2015; Атлас…, 2021], опубликованных литературных источников [*Поликарпов* и др., 1986; *Михеев*, 1987; *Кузнецова*, 2022; *Kuznetsova* et al., 2011].

«Возможность количественного измерения интенсивности функционирования в свою очередь открывает путь к решению многих важнейших фундаментальных и прикладных задач физической географии, в частности таких, как определение устойчивости геосистем к внешним воздействиям» [*Исаченко*, 1990, с. 16]. Исследование экологической устойчивости геосистем как возможности восстанавливать свою структуру после внешнего воздействия проводится посредством выделения инвариантов, на основе которых приводятся в соответствие друг с другом коренные, переменные, производные состояния геосистем, возникающие в процессе спонтанной динамики или антропогенного воздействия. Характеристики инвариантов использованы как признаки-индикаторы экологического потенциала геосистем, который определяет все наблюдаемые в природе переменные состояния и те производные структуры, которые можно создать для оптимизации природной обстановки.

С использованием функциональных и структурно-динамических характеристик проведена качественная оценка, вариативный прогноз изменений состояния геосистем, разработаны экологические нормативы использования, рекомендации по минимизации нежелательных последствий антропогенного воздействия, осуществлено зонирование территории по степени изменчивости природной среды, или «предрасположенности к природному ЭР» [Экологический…, 1998, с. 5].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разработано тематическое содержание, методы, последовательность мелкомасштабного конструктивного интегрального картографирования геосистем Монгольско-Сибирского региона (рис. 1). Общая линия исследования соответствует основным этапам геосистемного анализа: инвентаризация геосистем; качественная экологическая оценка природных условий; прогноз их возможного изменения, анализ использования, антропогенного воздействия, нарушений структуры; разработка природоохранных рекомендации по использованию геосистем; полифункциональное зонирование территории.

Рис. 1. Этапы, методы создания картографической системы Монгольско-Сибирского региона

Fig. 1. Stages, methods of creating a cartographic system of the Mongolian-Siberian region

На первом этапе исследования был определен таксономический ранг геосистем, который наиболее полно отвечает пространственному охвату, масштабу, целям, задачам, способу картографирования (рис. 1, разд. I). С использованием принципов общенаучной классификации геосистем акад. В.Б. Сочавы, методов геосистемного анализа, картографической пространственной и тематической генерализации была разработана специализированная классификация-легенда карты «Геосистемы Монгольско-Сибирского региона» м-ба 1: 5 000 000. Она отражает характеристики 41 геома, которые принадлежат 4 физико-географическим областям Северной и Центральной Азии [*Кузнецова*, 2022]. Посредством этой карты отображены закономерности пространственно-временной организации природных систем исследуемой территории через подразделения многоступенчатой иерархической классификации геосистем:

- геомы,
- подгруппы геомов,
- группы геомов,
- подклассы геомов,
- классы геомов,
- типы природной среды
  и соответствующие им типологические характеристики.

Динамические категории геосистем были дифференцированы относительно основного — коренного (наиболее стабильного геома), который был определен методом структурно-динамического анализа в системе соотношений «область — геом», выполненного для функционально-геомерных рядов каждой из 4 ландшафтных областей исследуемого региона. Все прочие геомы одной физико-географической области отражают степень отклонения природных характеристик от нормы природных условий коренного геома и подразделяются на:

- мнимокоренные — стабильные;
- мнимокоренные экстраобластные — менее стабильные;
- серийные — условно стабильные;
- серийные факторальные — нестабильные;
- устойчиво длительнопроизводные разной степени антропогенной нарушенности — очень нестабильные.

В силу значительного объема содержание типологической классификации-легенды базовой карты «Геосистемы Монгольско-Сибирского региона» в данной работе не приводится.

На втором этапе исследования, согласно средовой концепции [Экологическое…, 1996; *Козин*, 2009], геосистемы рассмотрены как совокупности взаимодействующих, взаимообусловленных сред — экологической среды, ресурсной среды и среды жизнедеятельности человека. На основе анализа содержания инвентаризационной базовой карты геосистем сформировано множество элементов информации о природных условиях региона, созданы производные интерпретационные классификации-легенды карт геосистем ландшафтно-экологического, антропоэкологического, эколого-географического, комплексного геоэкологического содержания (рис. 1, разд. II). Эти карты в совокупности содержат характеристики свойств геосистем, которые имеют конструктивное значение: интенсивность функционирования, природные факторы функционирования (тепло-, влагообеспеченность, биологическая продуктивность растительности), категории саморегулирования, резистентная устойчивость (чувствительность), экологическая

устойчивость, изменчивость, экологические функции, экологический потенциал, степень благоприятности природных условий для жизнедеятельности людей и др.

На третьем этапе исследования (рис. 1, разд. III) была разработана методика и содержание комплексной карты «Геосистемы и их использование». В ее легенде наряду с типологическими характеристиками геосистем отражены: типы использования, характер антропогенного воздействия, степень антропогенной нарушенности, рекомендуемые режимы использования, природоохранные мероприятия, минимизирующие отрицательное воздействие. Рекомендуемые режимы использования и природоохранные мероприятия были разработаны с учетом следующих экологических принципов:

1 – сохранение естественных механизмов воспроизводства геосистем (удержание в состоянии, обеспечивающем сохранение свойства саморегулирования);
2 – сохранение всех функций геосистем (ландшафтных, экологических, целевых) не только в текущее время, но и в будущем;
3 – обязательная оценка реальных и потенциальных возможностей выполнения целевых функций, т. е. способность геосистемы к изменению;
4 – оценка возможных последствий, возникающих в результате антропогенного воздействия, оценка экологической стабильности геосистем, т. е. способности восстанавливать свою структуру после антропогенного воздействия;
5 – обязательное экологическое нормирование используемых геосистем с учетом их реального и потенциального состояния.

По существу, классификация карты «Геосистемы и их использование» представляет собой комплекс конструктивных характеристик геосистем, которые интегрированы в единую легенду, информационно обеспечивающую выявление разнообразных факторов природных рисков при единой группировке пространственных данных.

На четвертом этапе исследования (рис. 1, разд. IV) разрабатываются многочисленные прогнозные карты геосистем. Например, по результатам сопряженного анализа комплекса характеристик геосистем была создана карта «Водоохранные функции геосистем, возможные изменения режима увлажнения в результате нарушения растительности» (рис. 2, разд. V).

Проведено сопряженное комбинированное исследование ряда природных факторов (подписи к рис. 2, разд. I–IV), которые являются индикаторами всего разнообразия природных условий региона. С одной стороны, были исследованы параметры тепло- и влагообеспеченности, биологической продуктивности растительности, тип распространения многолетней мерзлоты (островная, сплошная), экологические функции геосистем. С другой — определены категории их саморегулирования, чувствительности, экологической устойчивости, антропогенной нарушенности.

Геосистема рассматривается как первичная среда для каждого своего компонента, которая обеспечивает их сохранение и воспроизводство, выполняя ряд внутриструктурных экологических функций: почвозащитную, лесозащитную, водозащитную. Наряду с этим, геосистемы как целостные образования выполняют ряд внешних структурных экологических функций: средорегулирующую, средоформирующую, средозащитную, техногенно-барьерную, которые обеспечивают сохранение и воспроизводство структуры самой геосистемы и смежных с ней структур.

По результатам комплексного исследования геосистем была определена экологическая природозащитная роль растительности, которая выполняет роль ведущего природного компонента, контролирующего развитие и интенсивность функциональных внутриструктурных процессов в геосистемах — стимулирует или сдерживает их. Нарушение растительного покрова (пожары, рубки, сооружения) увеличивает прогревание

мерзлых грунтов, изменяет гидротермический режим сезонноотаивающего слоя, нарушает процессы его тепло- и влагообмена с атмосферой и с нижележащей толщей грунтов, которые служат упором для воды, скапливающейся над ними. На плоских поверхностях эти явления способствуют заболачиванию местности, на склоновых поверхностях может резко увеличиваться поверхностный сток воды, что в дальнейшем способствует увеличению засушливости природных условий (подписи к рис. 2, разд. V).

По материалам сопряженного анализа созданных типологических карт геосистем было проведено полифункциональное картографическое зонирование территории как способ группировки геосистем одного ранга и идентичных природных условий (рис. 1, разд. V). В легенде карты «Зонирование территории по комплексу факторов природного экологического риска» (подписи к рис. 2) арабскими цифрами (1–8) представлены геоэкозоны Монгольско-Сибирского региона.

В первую группу «очень высокой степени природного ЭР с низкой теплообеспеченностью» (1) вошли североазиатские гольцово-верхнетаежные геосистемы, природные условия существования которых характеризуются как экстремальные и субэкстремальные. По климатическому режиму они относятся к группе холодных, избыточно влажных, местами влажных местоположений. По продуктивности — минимально- или низкопродуктивные. В экологическом плане эти геосистемы выполняют средоформирующую функцию регионального значения. Особенно велика их снего- и водосборная роль: обеспечивая трансформацию воды, регулирование поверхностного стока, перевод его во внутрипочвенный, эти геосистемы несут большие гидрологические нагрузки. Нарушение структуры этих природных систем может повлечь за собой изменение структуры смежных с ними ландшафтов. В общем плане они характеризуются очень низкой экологической стабильностью, длительным периодом восстановления. Часто нарушение растительного покрова приводит к заболачиванию геосистем плоских поверхностей. В целом — эти территории слабо заселены, поэтому отличаются низкой степенью антропогенной нарушенности структуры геосистем. Тем не менее, для них рекомендован строго защитный с предупреждающими природоохранными мерами в случае использования режим природопользования.

Во вторую группу «высокой степени природного ЭР» (2) отнесены североазиатские горно-таежные редуцированных условий развития, умеренно холодные, влажные, низко- или среднепродуктивные на многолетнемерзлых почвогрунтах геосистемы. Степень саморегулирования у них относительно низкая в силу значительного недостатка тепла, отсюда — высокая чувствительность к антропогенному воздействию. Все геосистемы этой группы выполняют водорегулирующую экологическую функцию, имеющую региональное значение, а также водоаккумулирующую (мерзлотную) функцию.

При нарушении растительного покрова усиливается прогревание почвогрунтов, возможно сильное заболачивание в результате таяния мерзлоты. Тип использования этих геосистем — комплексный лесохозяйственный. Для природных систем этой группы рекомендован эксплуатационно-защитный со специализированным использованием в виде выделения защитных, лесовосстановительных зон для предупреждения возможного изменения структуры геосистем режим природопользования.

К третьей группе «относительно высокой степени природного ЭР» (3) принадлежат североазиатские таежные геосистемы межгорных понижений и долин с ограниченными условиями развития, умеренно теплые, с температурными инверсиями, избыточно влажные, барьерно- или натечно-мерзлотного типа увлажнения, средне- и повышенно-продуктивные на многолетнемерзлых почвогрунтах. Они имеют большое мерзлотно-защитные, водорегулирующие значение, стабилизируя существующую гидрологическую

экологическую ситуацию, характеризуются высокой степенью чувствительности к антропогенному воздействию.

К этой же категории природного ЭР отнесены северомонгольско-южносибирские «псевдотаежные» лиственничные, умеренно теплые, недостаточно, влажные средне-продуктивные геосистемы, которые формируются в условиях резко континентального климата среднегорий Хангая и Прихубсугулья. Согласно классификации геосистем [*Михеев*, 1987], они принадлежат к переходному от южносибирского к центральноазиатскому подклассу горно-таежных лиственничных геосистем и характеризуются низкой устойчивостью к внешнему воздействию; в случае пожаров, сплошных рубок они часто заменяются геосистемами степного типа.

В эту же группу вошли североазиатские сосновые боровые умеренно теплые-теплые, недостаточно влажные, среднепродуктивные геосистемы, имеющие высокое почвозащитное, водорегулирующее значение. Уничтожение растительности при отсутствии ее целевого восстановления может повлечь за собой развитие эоловых процессов. Для всех этих геосистем рекомендуется защитно-эксплуатационный с покомпонентным использованием, последующим восстановлением используемых компонентов природы режим природопользования.

К «очень низкой категории природного ЭР» (4) относятся все североазиатские горно-таежные и таежные геосистемы условий ограниченного развития, умеренно теплые, умеренно влажные, повышенной продуктивности, с разным температурным режимом почвогрунтов. Североазиатские геосистемы байкалоджугджурского типа, среднесибирские северо- и среднетаежные распространены, как правило, на многолетнемерзлых почвогрунтах, геосистемы северомонгольско-южносибирского типа — на сезонномерзлых. Это наиболее организованные в структурном отношении геосистемы. Они выполняют средостабилизирующую экологическую функцию регионального значения. Будучи менее чувствительными к антропогенному воздействию, благодаря повышенной продуктивности они, как правило, быстро восстанавливают свою структуру после внешнего воздействия.

В условиях континентального климата растительность этих геосистем имеет очень большое значение, обеспечивая существование особого типа экологических условий. В случае лесосведения на территориях этих геосистем нарушается водный режим, который также определяется орографическими, литологическими условиями. Плоские или близкие к ним поверхности подвержены заболачиванию в случае сведения растительности, прогревания грунтов, таяния мерзлоты. Крутые склоны в случае лесных вырубок, увеличения поверхностного стока могут быть подвержены процессам аридизации. В хозяйственном плане — это территории комплексного лесопользования. Таежная растительность сильно повреждена вырубками, пожарами. Эти территории требуют проведения лесовосстановительных мероприятий, организации целевого использования с обязательным выделением природоохранных лесовосстановительных зон и сохранных зон для кедровых лесов.

К «низкой категории природного ЭР» (5) принадлежат североазиатские горно-таежные оптимальных условий развития, теплые, влажные и избыточно влажные, повышенно- и высокопродуктивные геосистемы. К ним относятся и т. н. высокотравные геосистемы, которые отличаются самой высокой в Сибири биологической продуктивностью растительности, с продолжительным по времени периодом восстановления после пожаров, вырубок. Фаза спелого кедра в этих темнохвойных лесах может восстановиться лишь к возрасту 200–220 лет [*Поликарпов* и др., 1996]. Если не обеспечивать их целевое восстановление, то они, как правило, не успевают дойти до кедровой спелости между периодически повторяющимися пожарами, поэтому у них часто меняется структура растительного компонента. Эти геосистемы выполняют важную

водорегулирующую, почвозащитную экологические функции. Для них рекомендуется эксплуатационно-защитный с восстановлением используемых компонентов природы, выделением природоохранных зон с кедровыми лесами режим природопользования.

В группу геосистем «с относительно низкой степенью природного ЭР» (6) вошли североазиатские подтаежные геосистемы с субоптимальными условиями развития: теплые, недостаточно влажные, иногда избыточно влажные по барьерно- или натечно-мерзлотному типу увлажнения, повышенно- или среднепродуктивные, на сезонномерзлых почвогрунтах. Все они относятся к наиболее освоенным, с разной степенью антропогенной нарушенности, часто в результате лесных пожаров, природным системам.

Геосистемы инсоляционных склонов в силу недостаточного увлажнения, особенно в условиях сведения растительности, подвержены развитию процессов аридизации. В наиболее засушливую часть года — поздней весной, в раннелетний период до стадии формирования травяного растительного покрова — эти геосистемы являются очень пожароопасными. Они выполняют водорегулирующую, почво-, влагозащитную, техногенно-барьерную экологические функции. Для них рекомендуется защитно-эксплуатационный с выделением природоохранных зон тип природопользования.

К категории «высокой степени природного ЭР с низкой степенью влагообеспеченности» (7) относятся геосистемы редуцированных условий развития теплые, сухие повышенно- или среднепродуктивные на сезонномерзлых почвогрунтах. К ним принадлежат центральноазиатские хангайского типа горностепные и степные: склоновые, предгорные равнинные, долинные; сухостепные геосистемы даурского типа — горностепные и степные, склоновые, подгорных равнин, долин, днищ котловин.

Сюда же были отнесены североазиатские подгорных равнин, долинные, часто засоленные, лугово-степные и остепненных лугов геосистемы южносибирского типа, которые формируются в условиях с ограниченным количеством весенне-летних осадков. Биологическая продуктивность этой группы геосистем меньше в сравнении с подтаежными геосистемами, они характеризуются относительно низкой степенью самоорганизации, высокой чувствительностью к внешнему воздействию; антропогенные нарушения структуры этих природных систем приводят к развитию процессов засоления, аридизации.

Все они выполняют почвозащитную, водорегулирующую экологические функции. Территории распространения этих геосистем плотно заселены, выполняют многочисленные хозяйственные целевые функции, поэтому они имеют большое техногенно-барьерное значение. Для них рекомендуется эксплуатационно-защитный с восстановлением используемых компонентов в целях предотвращения усиления процессов засоления, аридизации тип природопользования.

В группу «очень высокой степени природного ЭР с очень низкой степенью влагообеспеченности» (8) вошли геосистемы экстремальных условий развития очень теплые − жаркие, сухие − очень сухие, низкой или минимальной биологической продуктивности растительности, формирующиеся на сезонномерзлых почвогрунтах. К ним относятся центральноазиатские геосистемы среднехалхасско-монгольского типа горностепные, степные; денудационных останцов, склоновые, каменистые, пологосклоновые; высоких равнин.

К этой же категории относятся геосистемы переходного к пустынному типу (гобийские): низинные, бессточных депрессий, побережий озер. В большинстве своем они характеризуются высокой степенью антропогенной нарушенности в силу особенностей целевого использования, связанного со скотоводством, поэтому на месте коренных геосистем здесь, как правило, сформировались устойчиво длительнопроизводные антропогенные трансформации. Имея низкие показатели влагообеспеченности, эти геосистемы выполняют важную водорегулирующую, средостабилизирующую

экологические функции, обеспечивая сохранение существующего природного равновесия, нарушение которого может привести к еще большему усилению процессов аридизации.

Растительность степей на песчаных, каменистых поверхностях, в условиях сухих, очень сухих местообитаний выполняет важную почвозащитную функцию, закрепляя подвижные грунты, пески. Для всех этих геосистем рекомендуется защитный с предупреждающими природоохранными мерами в случае использования тип природопользования в целях предотвращения усиления процессов аридизации.

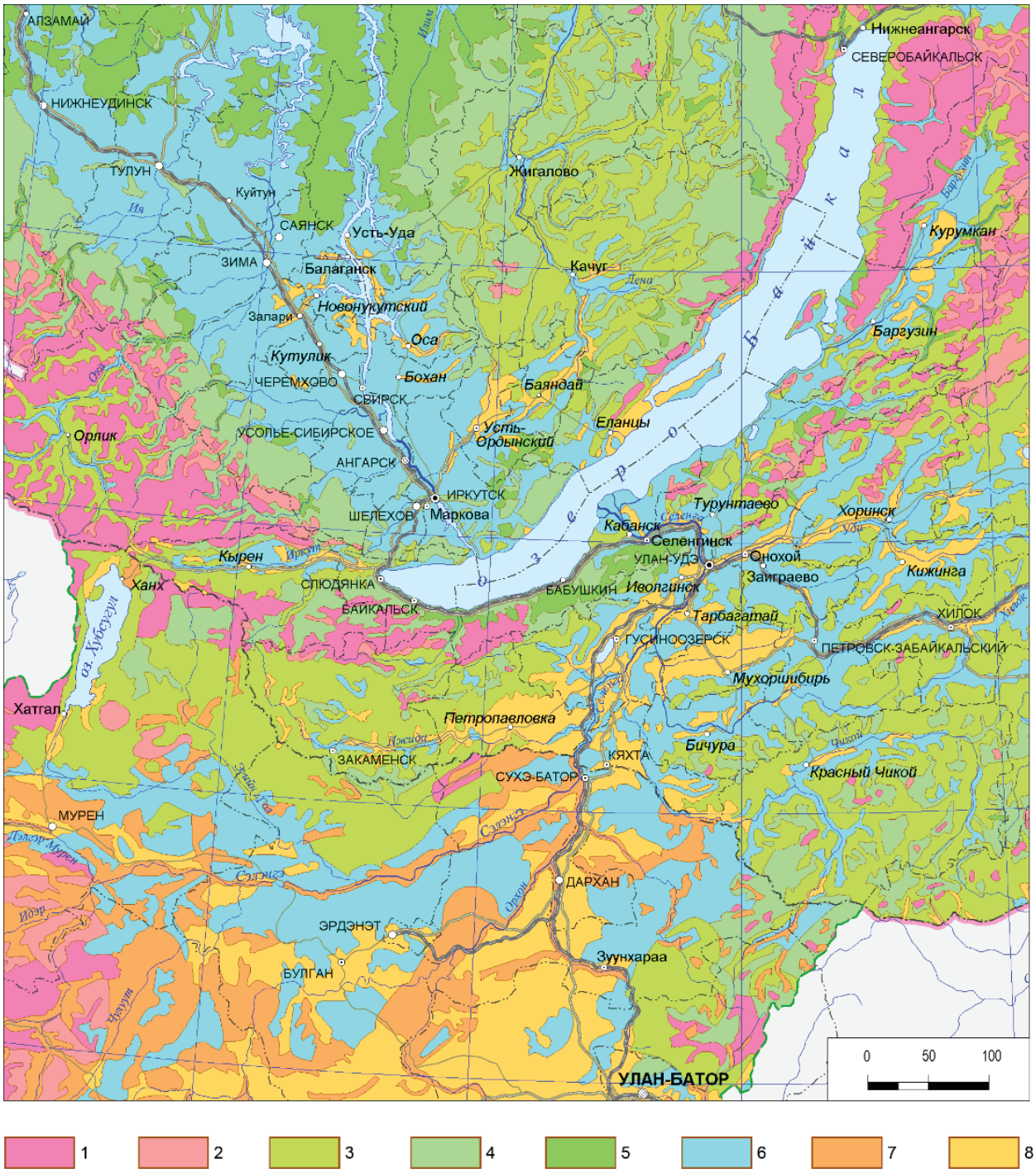


Рис. 2. Зонирование территории по комплексу факторов экологического риска
Fig. 2. Zoning of the territory according to the complex of environmental risk factors

Геоэкозоны Монгольско-Сибирского региона

А. Геосистемные признаки-индикаторы природного ЭР

I. Природные комплексы, условия развития:

Североазиатские арктобореальные

1. Гольцовые, подгольцовые кустарниковые и редколесные холодные*, избыточно влажные, влажные**, минимально, низкопродуктивные*** на многолетнемерзлых почвогрунтах;
2. Горно-таежные, таежные межгорных понижений и долин редуцированных условий развития умеренно холодные, влажные, низко- и среднепродуктивные на многолетнемерзлых почвогрунтах;
3. Горно-таежные, таежные межгорных понижений и долин ограниченных условий развития, умеренно теплые, влажные на сезонномерзлых почвогрунтах, избыточно влажные на многолетнемерзлых почвогрунтах, средне- и повышеннопродуктивные;
4. Горно-таежные, таежные подгорные и межгорных понижений, ограниченных условий развития, умеренно теплые, влажные на сезонномерзлых почвогрунтах, избыточно влажные на многолетнемерзлых почвогрунтах, средне- и повышеннопродуктивные;
5. Горно-таежные, таежные подгорные и межгорных понижений оптимальных условий развития, теплые, влажные и умеренно влажные на сезонномерзлых почвогрунтах, повышенно продуктивные; теплые, избыточно влажные на многолетнемерзлых почвогрунтах, повышенно- и среднепродуктивные; избыточно влажные на наветренных склонах, повышенно- и высокопродуктивные;

Североазиатские семиаридные

6. Подтаежные и лесостепные субоптимальных условий развития, теплые, недостаточно влажные, средне- и повышенно продуктивные на сезонномерзлых почвогрунтах, иногда избыточно влажные на многолетнемерзлых почвогрунтах;

Центральноазиатские аридные

7. Степные редуцированных условий развития, очень теплые, сухие средне- или низкопродуктивные, преимущественно на сезонномерзлых почвогрунтах;
8. Сухостепные, иногда полупустынные экстремальных условий развития, очень теплые и жаркие, сухие и очень сухие, низко- и минимально продуктивные, преимущественно на сезонномерзлых почвогрунтах.

Пояснения:

* — Теплообеспеченность (сумма биологически активных температур воздуха: сумма среднесуточных температур за период с температурами выше 10 °С): холодные (600–800 °С), умеренно холодные (800–1 200 °С), умеренно теплые (1 200–1 600 °С), теплые (1 600–2 000 °С), очень теплые (2 000–2 400 °С), жаркие (более 2 400 °С).

** — Влагообеспеченность (радиационный индекс сухости по М.И. Будыко): избыточно влажные (менее 0,5), влажные (0,5–1,0), умеренно влажные (1,0–1,5), недостаточно влажные (1,5–2,0), сухие (2,0–2,5), очень сухие (более 2,5).

*** — Биологическая продуктивность — годовой прирост, выраженный в весе сухой массы органического вещества надземной и подземной частей растений (ц/га сухой массы): минимальная (менее 20 ц/га), низкая (20–40 ц/га), средняя (40–60 ц/га), повышенная (60–80 ц/га), высокая (более 80 ц/га).

II. Категории саморегулирования:
1 – низкая (с очень большим недостатком тепла);
2 – относительно низкая (с большим недостатком тепла);
3 – средняя;
4 – повышенная;
5 – высокая (очень длительный период восстановления);
6 – относительно высокая;
7 – относительно низкая (с большим недостатком влаги);
8 – низкая (с очень большим недостатком влаги).

III. Категории чувствительности к антропогенному воздействию:
1 – очень высокая (с минимальной и низкой продуктивностью растительного покрова);
2 – высокая (с низкой и средней продуктивностью растительного покрова);
3 – относительно высокая (со средней и повышенной продуктивностью растительного покрова);
4 – относительно низкая (с повышенной продуктивностью растительного покрова);
5 – низкая (с повышенной и высокой продуктивностью растительного покрова);
6 – относительно высокая (со средней и повышенной продуктивностью растительного покрова);
7 – высокая (с низкой и средней продуктивностью растительного покрова);
8 – очень высокая (с минимальной и низкой продуктивностью растительного покрова).

IV. Категории антропогенной нарушенности:
1 – слабо нарушенные;
2 – малонарушенные;
3 – относительно малонарушенные;
4 – относительно нарушенные;
5 – нарушенные;
6 – преобразованные;
7 – очень сильно нарушенные;
8 – сильно нарушенные.

V. Водоохранные функции геосистем, возможные изменения режима увлажнения в результате нарушения растительности:
1 – водосборная, водорегулирующая геосферного значения, водоаккумулирующая (мерзлотная) — изменения проявляются комплексно, в т. ч. в смежных структурах;
2 – водорегулирующая регионального значения, водоаккумулирующая (мерзлотная) — возможно увеличение увлажнения;
3 – водорегулирующая сезонномерзлая, водозащитная — возможно увеличение увлажнения;
4 – водорегулирующая, водоаккумулирующая (мерзлотная) — возможно значительное увеличение увлажнения;
5 – водорегулирующая сезонномерзлая, водозащитная — возможно увеличение увлажнения;
6 – водозащитная, водорегулирующая сезонномерзлая, иногда водоаккумулирующая (мерзлотная) — возможно увеличение аридности условий;
7 – водозащитная, водорегулирующая сезонномерзлая — возможно значительное увеличение аридности условий;

8 – водозащитная, водорегулирующая сезонномерзлая, влагоформирующая за счет контрастности суточных температур — возможно очень значительное усиление аридности условий.

VI. Категории экологической стабильности:
1 – очень низкая;
2 – относительно низкая;
3 – средняя;
4 – повышенная;
5 – высокая (длительный период восстановления);
6 – относительно высокая;
7 – относительно низкая;
8 – низкая.

Б. Интегральная оценка природного экологического риска (ЭР)

VII. Категории природного ЭР:
1 – очень высокая с очень низкой степенью теплообеспеченности;
2 – высокая с низкой степенью теплообеспеченности;
3 – относительно высокая с относительно низкой степенью теплообеспеченности;
4 – очень низкая с оптимальным соотношением тепло- и влагообеспеченности;
5 – низкая с высокой степенью влагообеспеченности;
6 – относительно низкая с относительно низкой степенью влагообеспеченности;
7 – высокая с низкой степенью влагообеспеченности;
8 – очень высокая с очень низкой степенью влагообеспеченности.

В. Природные условия жизнедеятельности людей

VIII. Категории благоприятности:
1 – максимально неблагоприятные с очень значительным дефицитом тепла;
2 – очень неблагоприятные со значительным дефицитом тепла;
3 – малоблагоприятные с дефицитом тепла;
4 – относительно благоприятные с оптимальны сочетанием тепла и влаги;
5 – благоприятные с незначительным избытком влаги;
6 – относительно благоприятные с некоторым дефицитом влаги, иногда переувлажненные;
7 – малоблагоприятные с большим дефицитом влаги;
8 – максимально неблагоприятные с очень большим дефицитом влаги.

Г. Рекомендации по использованию геосистем

IX. Природоохранные режимы:
1 – строго защитный с предупреждающими природоохранными мерами в случае использования;
2 – эксплуатационно-защитный — специализированное использование с выделением защитных природоохранных зон с целью предупреждения возможного изменения структуры геосистем;
3 – защитно-эксплуатационный с объектно-покомпонентным использованием и последующим восстановлением используемых компонентов природы;
4 – эксплуатационный с выделением природоохранных восстановительных зон с кедровыми лесами;

5 – эксплуатационно-защитный с восстановлением используемых компонентов природы, выделением природоохранных зон с кедровыми лесами;
6 – защитно-эксплуатационный комбинированный с выделением природоохранных зон;
7 – эксплуатационно-защитный с восстановлением используемых компонентов в целях предотвращения усиления процессов аридизации;
8 – защитный с предупреждающими природоохранными мерами в случае использования в целях предотвращения усиления процессов аридизации.

Пояснение: Арабскими цифрами 1–8 обозначены территориальные группировки геосистем ранга геомов с идентичными природными условиями.

ВЫВОДЫ

Концепция пространственно-временной организации, методология конструктивного интеграционного картографирования позволили раскрыть прогностический потенциал карт геосистем регионального иерархического ранга применительно к географическим исследованиям природных экологических рисков в крупных регионах (подписи к рис. 2, разд. VII). Предложенные типологические характеристики геосистем выполняют роль признаков-индикаторов состояний, свойств, комплекса природных условий геосистем, их возможных изменений в результате естественного развития или антропогенного воздействия (подписи к рис. 2, разд. I–VI), обеспечивают экологическое нормирование использования, обоснование рекомендаций по минимизации нежелательных последствий (подписи к рис. 2, разд. VIII–IX).

Разработанная с использованием научной классификации геосистем акад. В.Б. Сочавы система интерпретационных классификационных построений имеет важное методическое значение как особая форма структурирования, модификации, интеграции физико-географической информации (подписи к рис. 2). Она обеспечивает наглядность представленного результата в виде мелкомасштабной целостной программно-целевой системы карт геосистем геоэкологического содержания. Представленный ряд картографических тематических и пространственных обобщений о географической среде Монгольско-Сибирского региона (рис. 2) дополнит уже существующие знания о природе Северной и Северо-Восточной Азии. Созданные карты составят базовый набор в региональной структуре пространственных данных электронного Атласа, на их основе могут быть созданы новые карты геосистем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет средств государственного задания
№ АААА-А21-121012190063-2.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was performed thanks to the financial support of the state task
No. АААААА-А21-121012190063-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас «Байкальский регион: общество и природа». М.: Паулсен, 2021. 320 с.

Бакланов П.Я. Территориальная организация и пространственное развитие: соотношение понятий и процессов. Геосистемы восточных районов России: особенности их структур и пространственного развития. Владивосток, 2019. С. 10–16.

Букс И.И., Байбородин В.Н., Тимирбаева Л.С. Эколого-фитоценотические комплексы Азиатской России. Карта м-ба 1: 7 500 000. Иркутск, 1977.

Булатов В.И. Функциональная организация и управление в антропогенных ландшафтах. Влияние человека на ландшафт. М.: Мысль, 1977. С. 44–53.

Исаченко А.Г. Интенсивность функционирования и продуктивность геосистем. Известия АН СССР. Серия географическая, 1990. № 5. С. 5–17.

Карпик А.П., Обиденко В.И., Побединский Г.Г. Исследование потребности федеральных органов исполнительной власти Российской Федерации в пространственных данных. Геодезия и картография, 2021. Т. 82. № 2. С. 49–63. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-968-2-49-63.

Козин В.В. Средовой подход в ландшафтной экологии. Вестник Тюменского государственного университета, 2009. № 3. С. 4–8.

Коновалова Т.И. Организация геосистем и ее картографирование. Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле», 2012. № 5. С. 150–162.

Кузнецова Т.И. Геосистемно-картографический анализ природных факторов экологического риска бассейна озера Байкал (в пределах России и Монголии). Безопасность жизнедеятельности, 2017. № 7. С. 50–56.

Кузнецова Т.И. Методология конструктивного подхода в геоинформационном картографировании географической среды. ИнтерКарто. ИнтерГИС**.** Материалы Международной конференции, 2022. Т. 28. № 1. С. 161–174. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-161-174.

Кузнецова Т.И., Батуев А.Р., Бардаш А.В. Природные ландшафты Байкальского региона и их использование. Карта м-ба 1: 5 000 000. Иркутск, 2009. Электронный ресурс: https://irkipedia.ru/content/landshafty-baykala (дата обращения 15.07.2023).

Михеев В.С. Ландшафтно-географическое обеспечение комплексных проблем Сибири. Новосибирск: Наука, 1987. 206 с.

Национальный атлас. Монгольская Народная Республика*.* Улан-Батор – М., 1990. 140 с.

Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1986. 215 с.

Сочава В.Б. Теоретическая и практическая география. Новосибирск: Наука, 2005. 288 с.

Тарарин А.М. Понятие и реализация базовых наборов пространственных данных в национальной системе пространственных данных Российской Федерации. Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ), 2022. Т. 27. № 2. С. 44–58. DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-2-44-58.

Устойчивое развитие и экологический риск: Терминологический словарь. Ханты-Мансийск, 1998. 32 с.

Экологический атлас бассейна оз. Байкал. Иркутск, 2015. 145 с.

Экологический риск: анализ, оценка, прогноз*.* Материалы конференции. Иркутск, 1998. 148 с.

Экологическое картографирование Сибири. Новосибирск: Наука, 1996. 279 с.

Berry J.K. Fundamental operations in computer-assisted map analysis. International Journal of Geographical Information Systems, 1987. V. 1. P. 119–136.

Kuznetsova T.I., Bychkov I.V., Batuev A.R., Plyusnin V.M., Ruzhnikov G.M., Khmel'nov A.E. Structural-typological characteristics and ecological potential of the Baikal region's geosystems. Geography and Natural Resourses, 2011. V. 32. No. 4. P. 315–322.

Kuznetsova T.I., Lopatkin D.A. Landscape and mapping support of regional geoecological analysis. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. V. 381. P. 12–53. DOI: 10.1088/1755-1315/381/1/012053.

Lechthaler M. Interactive and multimedia atlas information system as a cartographic geo-communication platform. Berlin: Springer, 2010. P. 384–402.

REFERENCES

Atlas “Baikal region: society and nature”. Moscow: Paulsen, 2021. 320 p. (in Russian).

Baklanov P.Ya. Territorial organization and spatial development: correlation of concepts and processes. Geosystems of the eastern regions of Russia: features of their structures and spatial development. Vladivostok, 2019. P. 10–16 (in Russian).

Berry J.K. Fundamental operations in computer-assisted map analysis. International Journal of Geographical Information Systems, 1987. V. 1. P. 119–136.

Buks I.I., Bayborodin V.N., Timirbayeva L.S. Ecological and phytocenotic complexes of Asian Russia. Map in scale 1: 7 500 000. Irkutsk, 1977 (in Russian).

Bulatov V.I. Functional organization and management in anthropogenic landscapes. Influence of man on landscape. Moscow: Mysl’, 1977. P. 44–53 (in Russian).

Ecological atlas of the Baikal region. Irkutsk, 2017. 145 p. (in Russian).

Ecological mapping of Siberia. Novosibirsk: Nauka, 1996. 279 p. (in Russian).

Environmental risk: analysis, assessment, forecast. Proceedings of the conference. Irkutsk, 1998. 148 p. (in Russian).

Isachenko A.G. Intensity of functioning and productivity of geosystems. Izvestia AN SSSR. Seriya Geograficheskaya (News of the USSR Academy of Sciences. Geographical series), 1990. No. 5. P. 5–17 (in Russian).

Karpik A.P., Obidenko V.I., Pobedinsky G.G. Study of the needs of federal executive bodies of the Russian Federation in spatial data. Geodesy and Cartography, 2021. V. 82. No. 2. P. 49–63. (in Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2021-968-2-49-63.

Konovalova T.I. Organization of geosystems and its mapping. The Bulletin of Irkutsk State University. Series “Earth Sciences”, 2012. No. 5. P. 150–162 (in Russian).

Kozin V.V. The environmental approach in landscape ecology. Tyumen State University Herald, 2009. No. 3. P. 4–8 (in Russian).

Kuznetsova T.I. Geosystem-cartographic analysis of natural factors of ecological risk of the Lake Baikal basin (within Russia and Mongolia). Bezopasnost’ Zhiznedeatel’nosti, 2017. No. 7. P. 50–56 (in Russian).

Kuznetsova T.I. Methodology of constructive approach in geoinformatic cartographic geographical environments. InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International conference, 2022. V. 28. No. 1. P. 161–174 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-161-174.

Kuznetsova T.I., Batuev A.R., Bardash A.V. Natural landscapes of the Baikal region and their use. Map in scale 1: 5 000 000. Irkutsk, 2009 (in Russian). Web resource: https://irkipedia.ru/content/landshafty-baykala (accessed 15.07.2023).

Kuznetsova T.I., Bychkov I.V., Batuev A.R., Plyusnin V.M., Ruzhnikov G.M., Khmel’nov A.E. Structural-typological characteristics and ecological potential of the Baikal region’s geosystems. Geography and Natural Resourses, 2011. V. 32. No. 4. P. 315–322.

Kuznetsova T.I., Lopatkin D.A. Landscape and mapping support of regional geoecological analysis. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. V. 381. P. 12–53. DOI: 10.1088/1755-1315/381/1/012053.

Lechthaler M. Interactive and multimedia atlas information system as a cartographic geo-communication platform. Berlin: Springer, 2010. P. 384–402.

Mikheev V.S. Landscape-geographical support of complex problems of Siberia. Novosibirsk: Nauka, 1987. 206 p. (in Russian).

National Atlas. The Mongolian People's Republic. Ulaanbaatar – Moscow, 1990. 140 p. (in Russian).

Polikarpov N.P., Tchebakova N.M., Nazimova D.I. Climate and mountain forests of Southern Siberia. Novosibirsk: Nauka, 1986. 215 p. (in Russian).

Sochava V.B. Theoretical and Applied Geography. Novosibirsk: Nauka, 2005. 288 p. (in Russian).

Sustainable development and environmental risk: Terminological dictionary. Khanty-Mansiysk, 1998. 32 p. (in Russian).

Tararin A.M. The concept and implementation of basic sets of spatial data in the national system of spatial data of the Russian Federation. Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT), 2022. V. 27. No. 2. P. 44–58 (in Russian). DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-2-44-58.

УДК: 528.9+004.75 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-123-142**

А.А. Ямашкин[1], **С.А. Ямашкин**[2]

УПРАВЛЕНИЕ МЕТАГЕОСИСТЕМАМИ РЕГИОНА НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ, АНАЛИЗА И МОНИТОРИНГА РИСКОВ

АННОТАЦИЯ

В статье представлено решение проблемы внедрения инфраструктур пространственных данных (ИПД) и геопортальных систем как инструмента решения задач интеграции, каталогизации, обработки, анализа, распространения и визуализации геопространственной информации с целью обеспечения поддержки принятия управленческих решений в области оптимизации функционирования экосистем и развития цифровой экономики Российской Федерации. Представлена характеристика процесса внедрения ИПД для управления метагеосистемами на основе процессов идентификации, анализа и мониторинга рисков. Показано, что процесс управления рисками может быть интегрирован в задачи итерационного проектирования, разработки, внедрения и использования ИПД в качестве входного этапа для стадии анализа требований к ИПД. Результаты оценки силы рисковых событий позволяют подойти к решению задачи формирования совокупности контролируемых рисков управления природно-социально-производственными системами. Результаты этапа оценки рисков становятся отправной точкой в решении задачи проектирования функциональных и качественных требований к инфраструктуре пространственных данных как инструмента управления территориально-распределенными системами. Решение задачи оптимизации процессов консолидации и использования пространственных данных для управления природно-социально-производственными системами должно ориентироваться на следующие критерии: достижение целевых эффектов ИПД, ресурсоемкости и сложности (организационной, операционной, алгоритмической, компетентностной, временной) процессов поддержки (построения, модификации, практического использования) при решении задач управления. Показано, что важной особенностью подхода по управлению природно-социально-производственными системами, ориентированного на анализ и мониторинг рисков, является необходимость в ориентации на гибкую организацию процесса разработки геоинформационных систем. Решение проблемы эффективного итерационного функционального и качественного усиления ИПД возможно на основе соблюдения принципов SOLID, определяющих целесообразность реализации основных принципов объектно-ориентированного программирования и проектирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метагеосистемы, природно-социально-производственные системы, управление рисками, устойчивое развитие, геоинформационные системы

[1] Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, Институт геоинформационных технологий и географии, ул. Большевистская, д. 68, Саранск, Россия, 430005, *e-mail:* **yamashkin56@mail.ru**

[2] Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, Институт электроники и светотехники, ул. Большевистская, д. 68, Саранск, Россия, 430005, *e-mail:* **yamashkinsa@mail.ru**

Anatoly A. Yamashkin[1], **Stanislav A. Yamashkin**[2]

REGIONAL METAGEOSYSTEM MANAGEMENT BASED ON RISK IDENTIFICATION, ANALYSIS AND MONITORING

ABSTRACT

The article presents a solution to the problem of introducing spatial data infrastructures (SDI) and geoportal systems as a tool for solving the problem of integration, distribution and visualization of geospatial information. The role of geoportals is proved as a tool to support managerial decision-making in the field of ensuring the conditions for sustainable development. It is proposed to organize the SDI implementation process on the basis of identification, analysis and monitoring of risks. The risk management process can be integrated into the process of iterative implementation and use of the SDI as an input to the requirements analysis stage. The results of assessing the strength of risk events make it possible to form a set of controllable risks in the management of territorial systems. In this case, the results of the risk assessment stage become the starting point in solving the problem of designing functional and qualitative requirements for the infrastructure of spatial data as a tool for managing spatially distributed systems. The solution of the problem of optimizing the processes of using spatial data for solving management problems should be focused on achieving the target effects of SDI, while assessing and controlling the resource intensity and complexity of management processes. It is shown that an important feature of the approach is the focus on flexible organization of the process of developing geoinformation systems. The solution to the problem of effective iterative development of SDI is possible based on the observance of the SOLID principles, which determine the expediency of implementing the basic principles of object-oriented programming and design.

KEYWORDS: metageosystems, natural-social-production systems, risk management, sustainable development, geographic information systems

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных планетарных эколого-социально-экономических проблем имеет метахрональный характер проявления на региональном и локальном уровнях. К важнейшим вызовам относится осознание необходимости углубленного исследования пространственно-временной структуры геосистем [*Николаев*, 1978], многоцелевое использование природных ресурсов, развитие спектров экономически выгодных видов деятельности, прогнозирование социально-экономических процессов, природных и природно-техногенных чрезвычайных экологических ситуаций, организация активного участия общества в природоохранной деятельности [*Тикунов*, 2021].

В качестве основных объектов исследований выступают метагеосистемы, пространственно определенные совокупности природных, социальных и производственных систем, функционирующие в силу наличия связей между ними [*Черкашин*, 2019].

Главными задачами при этом выступают:

1) определение средо- и ресурсовосстанавливающих функций геосистем;
2) выявление причин обострения экологических, социальных и экономических проблем;

[1] National Research Mordovia State University, Institute of Geoinformation Technologies and Geography, 68, Bolshevistskaya str., Saransk, 430005, Russia, *e-mail:* **yamashkin56@mail.ru**

[2] National Research Mordovia State University, Institute of Electronics and Lighting Engineering, 68, Bolshevistskaya str., Saransk, 430005, Russia, *e-mail:* **yamashkinsa@mail.ru**

3) установление тенденций развития эколого-социально-экономических ситуаций и прогнозирование (оценка) возможных последствий;
4) ландшафтное планирование процессов хозяйственного освоения.

Важной задачей в процессе управления территорией является четкое видение конечного результата функционирования метагеосистем как иерархически организованных природных, социальных и производственных систем. В деталях этот вопрос решается в процессе исследования комплекса проблем и рисков, имеющих место на территории на стадии прогнозирования развития. Однако общее, принципиальное (экспертное) представление об этом должно быть уже на начальной стадии элементарного управленческого цикла при постановке задач управления и подготовке задания на их решение. Проблема развития территорий, особенно актуализированная разработками в рамках общемировой концепции устойчивого развития общества, занимает одно из ведущих мест в системе географических исследований. География социально-экономического развития территорий или эволюционная социально-экономическая география осуществляет активную разработку методики описания процесса развития территориальных систем, поиск критериев количественной оценки его темпов и определение стратегии управления им. Особенно активно в данном направлении отечественные и зарубежные экономисты и экономико-географы работают в рамках эволюционного страноведения.

Необходимость анализа функционирования, динамики и развития метагеосистем существует в разных областях науки и практики. Прежде всего это проектировщики и управляющие структуры, деятельность которых связана с разработкой и использованием прединвестиционной, градостроительной, проектной документации, организацией и ведением экологического мониторинга за состоянием окружающей среды, прогнозированием чрезвычайных природных и природно-техногенных чрезвычайных экологических ситуаций. Географические информационные системы (ГИС) представляют собой эффективный инструмент управления территориально-распределенными системами разного масштаба. Согласно национальному стандарту Российской Федерации ГОСТ Р 52438-2005, географические информационные системы могут быть определены как информационные системы, предназначенные для хранения, обработки, поиска, распространения, передачи и представления пространственной информации, данных, ассоциированных с географическим положением объекта по отношению к земной поверхности[1].

В настоящее время проблемно-ориентированные ГИС создаются как в рамках административно-территориальных единиц, так и в границах природных регионов. Современная практика показывает, что облачные ГИС-технологии становятся гибкими и универсальными средствами для решения многих задач природопользования, обеспечивая сбор, обработку, хранение и визуализацию пространственной информации на основе геопортальных технологий о состоянии природных, социальных и производственных систем и их взаимодействии [*Lee*, 2017]. Их практическая востребованность заключается прежде всего в оперативности представления информации и точной пространственной привязке данных [*Heaton*, 2019; *Gkonos*, 2019]. ГИС представляют собой гибкий инструмент непрерывного накопления и оперативного представления обширной, многомерной информации о территориях [*Артоболевский*, 2009].

В соответствии с национальным стандартом ГОСТ Р 58570-2019, разработанным ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД», в решении задачи обеспечения поиска,

[1] Географические информационные системы. Термины и определения: ГОСТ Р 52438-2005. введ. 01.07.2006.

доступа и удобства использования пространственной информации ключевую роль играют инфраструктуры пространственных данных (ИПД), определяемые как «информационно-телекоммуникационные системы, обеспечивающие доступ граждан, хозяйствующих субъектов, органов государственной и муниципальной власти к распределенным ресурсам пространственных данных, а также распространение и обмен данными»[1]. Определение ИПД может быть расширено на основе требования стандарта ГОСТ Р 55062-2012 к интероперабельности как способности информационных систем и их компонентов к обмену и использованию информацией: обозначенное свойство значимо только в том случае, если взаимодействие между системами реализуется на техническом, семантическом и организационном уровнях[2]. Технический уровень определяет способ и формат передачи информации, семантический формирует основы содержательного (смыслового) использования данных, организационный сфокусирован на прагматических аспектах, нацеленных на повышении эффективности решения задач управления. Учитывая данное положение, ИПД следует определить как совокупность организационных и инфокоммуникационных средств, обеспечивающих с использованием пространственных данных управление организационными системами различного уровня: локального, регионального, национального, межнационального. Организационная интероперабельность ИПД нацелена на удовлетворение запроса на эффективное использование пространственных данных при решении проектных задач.

Достижение высокой организационной интероперабельности ИПД возможно в случае обеспечения достижения свойства проблемной ориентации систем данного класса. Внедряемые ИПД должны представлять собой инструмент поддержки принятия решений, связанных с управлением территориально-распределенными системами: прогнозирование и оценка последствий чрезвычайных ситуаций, управление хозяйством и производством, эффективное представление экономического, природного, социального потенциала. Требование проблемной ориентации ИПД позволяет системам данного класса быть эффективными, одновременно накладывая отпечаток на процессы проектирования, разработки, внедрения и использования.

Пространственные данные, консолидированные в ИПД из внешних источников и синтезируемые на основе методов и алгоритмов анализа, становятся полезными только в случае их доступности необходимому кругу людей. Обеспечение возможности распространения и визуализации пространственной информации при этом решается посредством геопортальных систем (геопорталов), играющих роль точки доступа к сервисам ИПД и предоставляющих человеко-машинный интерфейс, функционирующий на основе веб-технологий. При этом важно, чтобы геопорталы решали конкретные проектные задачи оптимизации процессов управления территориально-распределенными системами. Экономическое обоснование целесообразности внедрения ИПД и геопорталов может быть сформировано но основе запроса на необходимость минимизации рисков (максимизации использования позитивных возможностей), возникающих при использовании природно-социально-производственных систем.

Цель исследования — решение проблемы повышения эффективности процессов проектирования, разработки, внедрения и использования ИПД и геопортальных систем на основе использования процессов планирования, идентификации, анализа, мониторинга и управления рисками с целью повышения эффективности решения задач управления в

---

1 Инфраструктура пространственных данных. Общие требования: ГОСТ Р 58570-2019. введ. 01.06.2020.

2 Информационные технологии. Системы промышленной автоматизации и их интеграция. Интероперабельность. Основные положения: ГОСТ Р 55062-2012. введ. 01.09.2013.

организационных системах, деятельность которых связана управлением территориально-распределенными системами.

Для достижения поставленной цели были поставлены и последовательно решены следующие задачи:

1) Определение принципов систематизации и классификации природно-социально-производственных систем как объекта управления в организационных системах, деятельность которых выстроена вокруг территориально-распределенных ресурсов;
2) Исследование процесса внедрения инфраструктур пространственных данных как инструмента управления метагеосистемами на основе идентификации, анализа и мониторинга рисков различного типа;
3) Разработка методики интеграции процесса управления рисками в процесс итерационного внедрения и использования ИПД с целью формирования эффективных инфраструктурных решений для управления природно-социально-производственными системами;
4) Разработка и внедрение геопортальных систем как инструментов управления пространственно-распределенными ресурсами и объектами, спроектированными с точки зрения решения задач управления рисками.

Инфраструктуры пространственных данных (ИПД), спроектированные на основе процессов анализа рисков, представляют собой инструмент решения задачи интеграции, каталогизации, распространения и визуализации геопространственной информации с целью обеспечения поддержки принятия управленческих решений в области оптимизации функционирования экосистем и развития цифровой экономики Российской Федерации. Геопортальные системы при этом выступают точкой доступа с распределенным базам геопространственных данных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

ИПД как инструмент управления данными о природно-социально-производственных системах

Повышение эффективности процессов проектирования, разработки, внедрения и использования ИПД должно быть основано на решении задачи систематизации пространственных данных. Структура исследований иерархически организованных природно-социально-производственных систем (метагеосистем) основывается на принципах:

1) *территориальности* — исследование природно-ресурсного потенциала и закономерностей природной дифференциации, определяющих общие закономерности хозяйственного освоения и развития экологических, социальных и экономических процессов;
2) *системности* — сопряженное исследование всех аспектов функционирования метагеосистем с учетом взаимосвязи всех элементов, определяющих особенности эколого-социально-экономического развития; взаимообусловленное объединение структурных элементов и связей разноуровневых природных, социальных и производственных систем, взаимная увязка и согласованность всех процессов и явлений;
3) *экологичности* — оптимизация взаимодействия природных, социальных и производственных систем на основе соблюдения экологического равновесия.

К разряду ключевых элементов процесса управления территориальными системами также следует отнести проблему его теоретического и практического обеспечения. При этом необходимо выделять две группы обеспечения: обеспечение процесса исследования

решаемых проблем и обеспечение самих практических действий по регулированию территориальных систем. Содержание этих групп во многом совпадает, но имеются и различия. Общим является информационное обеспечение, хотя в чистом виде оно больше проявляется именно в исследовании. На стадии практической реализации управленческого действия собственно информационное обеспечение дополняется внедрением инноваций, которые представляют собой средоточие информационного воздействия в виде научно обоснованных предложений по улучшению практической деятельности общества. Управление в целом поддерживается кадровым, финансовым, материальным, научно-методическим и нормативно-правовым обеспечением, соответствующих частей управленческого процесса. Многообразие непреходящих ценностей человечества можно свести к трем позициям.

Первую категорию составляют *условия безопасности жизнедеятельности человека*, т. е. все то, что можно условно назвать эколого-социально-экономической основой жизнеобеспечения.

Второй группой условий, относящихся к непреходящим ценностям человечества, следует считать факторы, обеспечивающие *стабильность материальной и духовной деятельности общества*, т. е. *устойчивое развитие*. Конкретно развитие общества проявляется в развитии территории, на которой это общество имеет место быть. Поэтому, говоря об устойчивом развитии общества, мы одновременно ведем речь об устойчивом развитии территории, и наоборот. Деятельность по обеспечению устойчивого развития общества (территории) по активности проявления носит развивающий характер.

Третья группа — результирующая: действия по обеспечению безопасности жизнедеятельности человека, в свою очередь дающие основание для реализации деятельности по обеспечению устойчивого развития общества, в конечном счете обеспечивают (должны обеспечивать) *высокое качество жизни населения*. Качество жизни человека и есть тот критерий, по которому следует оценивать качество всей деятельности общества, в т. ч., конечно, и государства.

Учитывая тот факт, что перечисленные группы факторов, создающих непреходящие ценности человечества, всегда территориально обусловлены, можно говорить о ведущей роли географических исследований в общем процессе познания и регулирования данного феномена. Поскольку во всех случаях эти действия реализуются комплексно и полноохватно, то следует признать, что теория геопространственных основ обеспечения безопасности жизнедеятельности человека, устойчивого развития общества и качества жизни населения есть научное направление единой (интегральной, прикладной) географии. В связи с этим природно-социально-производственные системы можно определить как системы обеспечения безопасности, стабильности и качества жизни населения. В глобальном масштабе системами данного класса становятся государства и союзы государств, как системы безопасности, организованные для выживания народов в рамках определенных географических территорий.

Территориальные системы безопасности от угроз гуманитарного характера. На начальном этапе территориально-институциональные ценности выявляются субъектом управления исходя из общей установки местного социума, предъявляющего требования к безопасности своей жизнедеятельности и опирающегося на знания стратегии устойчивого развития общества в настоящее время и в перспективе. На втором осуществляется целенаправленное изучение ситуации, уточняются проекты управленческих решений и после корректировки принимаются в окончательном варианте. Целеполагание соответственно также подразделяется на две стадии. Первая посвящена общей оценке перспектив развития территории. На второй осуществляется диагностика территориальных систем, в результате которой выявляются и ранжируются задачи, которые необходимо

решить. Затем составляется дерево целей, проводится формализация и алгоритмизация данных задач и осуществляется программная реализация составленных алгоритмов.

Территориальные системы безопасности от угроз природного (естественного) характера. В группу угроз безопасности естественного характера входят угрозы сугубо природного происхождения, т. е. стихийные катаклизмы и опасности природно-антропогенного характера. Конечно, многие из опасных естественных процессов связаны и с деятельностью человека и часто провоцируются антропогенными действиями, однако основа этих процессов остается ярко выраженной естественной, а не техногенной. Опасности природного характера индивидуальны для каждой местности. Одно и то же состояние природной среды в одних случаях может приводить к чрезвычайности ситуации, а в других будет относиться к норме. Экологические проблемы чрезвычайно разнообразны, но наиболее важными для человечества являются такие глобальные и региональные экологические явления, как сведение лесов и опустынивание степей и саванн, деградация черноземов путем ветровой и водной эрозии, потепление климата в результате загрязнения атмосферы, озоновые дыры, возникающие в результате повышенного выброса в атмосферу мощных окислителей типа фреонов, загрязнение природной среды и селитебных территорий бытовыми и производственными отходами, в т. ч. химически, физически и микробиологически опасными. Важным этапом разработки ИПД является выработка комплекса мероприятий по решению приоритетных региональных экологических проблем. Анализ и оценка развития геоэкологических ситуаций является основой для выделения региональных приоритетных проблем природопользования и охраны окружающей среды.

Территориальные системы безопасности от угроз техногенного характера. В группу техногенных вызовов входят все виды угроз, связанных с нарушениями научно-обоснованных правил и норм эксплуатации техники и оборудования, реализации производственно-технологических процессов, строительства и эксплуатации инженерных объектов. Нарушения научно-обоснованных правил и норм эксплуатации техники и оборудования широко распространены во всех сферах производственной деятельности, прежде всего в промышленности, строительстве, сельском хозяйстве и на транспорте, при всех правовых формах организации производства, а также в быту. Предотвращение данных опасностей на производстве осуществляется в рамках правил охраны труда и техники безопасности соответствующими службами, имеющимися на всех предприятиях. Это направление является основным в школьных курсах основ безопасности жизнедеятельности. ИПД должны быть ориентированы на повышение эффективности комплекса мероприятий, направленных на устранение проблемных ситуаций, характеризующихся опасными и особо опасными уровнями концентрации загрязняющих веществ и антропогенных техногенных нагрузок на природную среду, выработку рекомендаций по достижению нормативного уровня качества среды по ряду отдельных факторов ее загрязнения, составление плана работ по предотвращению негативной динамики изменения состояния окружающей среды и стабилизации сложившейся экологической ситуации.

В качестве базовой информационной основы для выработки комплекса мероприятий по решению приоритетных региональных экологических проблем используются планировочные экологически ориентированные средства, предусмотренные технико-экономическими обоснованиями предприятий, генеральными планами городов и районов, схемами районной планировки и другими имеющимися планировочными документами развития регионов. Разработанный комплекс мероприятий должен подразделяться по очередности их проведения, с выделением долгосрочных, среднесрочных и краткосрочных мероприятий для решения приоритетных экологических проблем региона с указанием механизма их реализации и финансирования.

ИПД как система управления рисками

Цифровые инфраструктуры пространственных данных (ИПД) выступают эффективным инструментом решения задачи интеграции, каталогизации, распространения и визуализации геопространственной информации с целью обеспечения поддержки принятия управленческих решений в области оптимизации функционирования метагеосистем в направлении развития цифровой экономики Российской Федерации [*Yamashkin*, 2020]. Отталкиваясь от данного выше определения природно-социально-производственных систем как систем обеспечения безопасности, стабильности и качества жизни населения, можно сделать вывод о том, что задача управления в организационных системах, деятельность которых выстроена вокруг управления пространственно-распределенными ресурсами и объектами посредством ИПД должна быть основана на решении проблемы планирования, идентификации, анализа, мониторинга и управления рисками.

Методы анализа рисков в организационных и сложных технических системах определены стандартами ГОСТ Р 51901-2002 (Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем), ISO 31000 (Менеджмент рисков), ГОСТ Р ИСО 31000-2019 (Менеджмент риска. Принципы и руководство). Ключевая функция стандартов направлена на поддержку деятельности по формированию и защите «ценностей организаций путем менеджмента риска, принятия решений, постановки и достижения целей, повышения эффективности деятельности»[1].

Эффективность управления организационными системами на основе анализа рисков [*Faraji*, 2022] может быть повышена за счет проведения следующих работ:

- системная идентификация рисков, включающая формирование реестра рисков, качественная и количественная оценка потенциальных угроз и возможностей;
- определение стратегий в области управления рисками разного типа на основе формирования реестра контрмер, выполняющих функцию снижения вероятности возникновения рисков и степени их влияния, достижения предпочтительных условий функционирования организационных систем;
- выявление причинно-следственных связей в процессах возникновения рисковых событий с целью усиления понимания назначения, структуры, функциональных и качественных особенностей инструментов управления в организационных системах.

Информационные системы, основанные на использовании пространственных данных, востребованы в организационных системах, деятельность которых связана с использованием и управлением пространственно-распределенными ресурсами: в органах регионального и муниципального управления, службах МЧС, производственных предприятиях и холдингах, логистических компаниях. Для этих организаций задача мониторинга и управления рисками имеет свои характерные особенности. Проектируемые и внедряемые инфраструктуры пространственных данных должны представлять собой информационные системы, являющиеся инструментом идентификации, анализа и мониторинга рисков, возникающих в организационных системах, деятельность которых направлена на управление природно-социально-производственными системами (рис. 1).

Обоснование ключевых процессов проектирования, разработки, внедрения и практического использования инфраструктур пространственных данных должно быть основано на решении задачи идентификации и анализа рисков, возникающих при использовании территориально распределенных природно-социально-производственных систем. В этом случае внедряемые технологии способны показать экономическую

[1] Менеджмент риска. Принципы и руководство: ГОСТ Р ИСО 31000-2019. введ. 01.03.2020.

эффективность и стать инструментом снижения влияния негативных природных, техногенных и гуманитарных процессов. Сокращение влияния и минимизация последствий опасных рисков возможны при реализации как процесса мониторинга состояния природно-социально-производственных систем как объекта управления, так и реализации функций удаленного управления, в т. ч. на основе технологий интернета вещей.

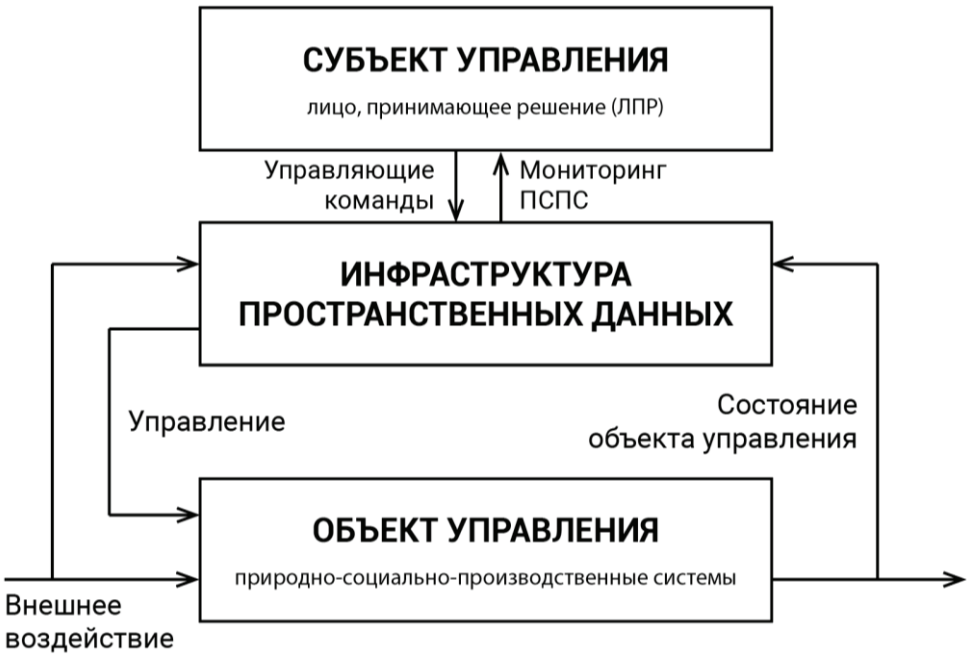


Рис. 1. Природно-социально-производственная системы как объект управления
Fig. 1. Natural-social-production system as an object of control

Процесс управления рисками [*Räsänen*, 2020] может быть интегрирован в процесс итерационного внедрения и использования ИПД в качестве входного этапа для стадии анализа требований к ИПД (рис. 2). В свою очередь, разработанные или улучшенные версии инфраструктуры пространственных данных становятся инструментом мониторинга и управления рисками в организационных системах, деятельность которых связана с использованием пространственно-распределенных ресурсов.

Этап планирования управления рисками (РП) представляет собой процесс, опирающийся на решение задач подготовки исходных данных для анализа и управления рисками, анализ структуры и свойств природно-социально-производственной системы как объекта управления.

В ходе оценки рисков (этап РО), происходит их идентификация (этап РО1, включающий отбор основных угроз, имеющих значение в рамках проекта, анализ причинно-следственных связей их возникновения и проведение классификации), количественный и качественный анализ (этап Р02, опирающийся на оценку вероятности возникновения рисков, негативного и позитивного влияния последствий рисковых событий, степени и направления связности), оценка опасности и проектирование контрмер (этап РО3, предполагающий ранжирование рисков по важности, планирование методов и ресурсов реализации контрмер, направленных на сокращение опасных и приоритетных рисков управления природно-социально-производственными системами).

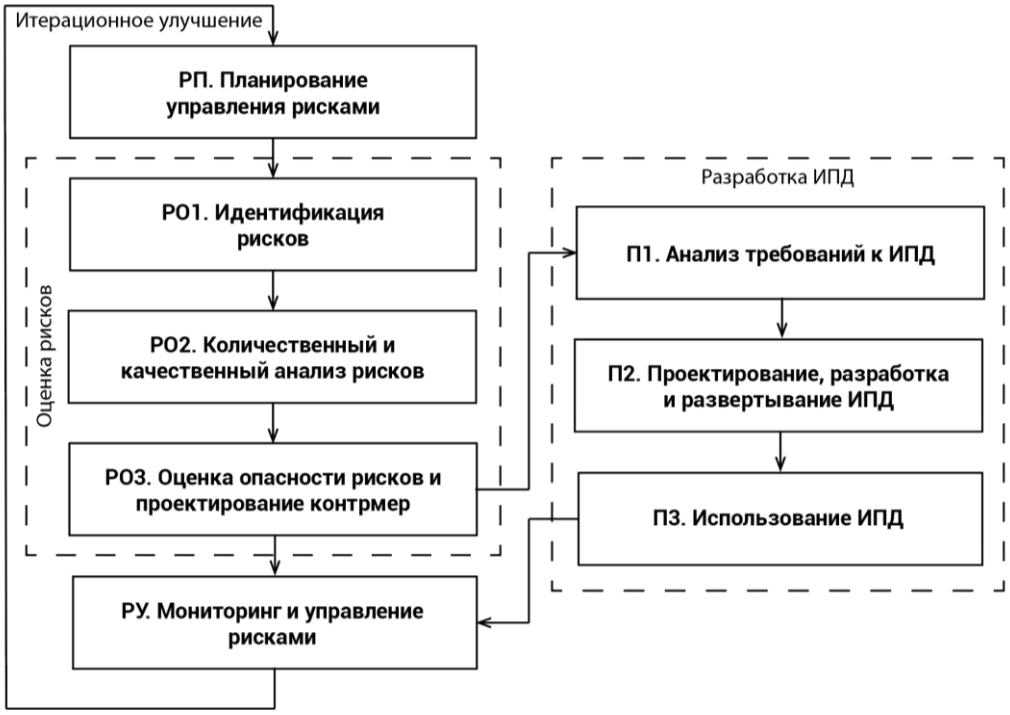


Рис. 2. Интеграция процесса управления рисками в процесс внедрения ИПД
Fig. 2. Integration of the risk management process into the process of implementation of SDI

Итоговые артефакты этапа оценки рисков управления природно-социально-производственными системами становятся основой для планирования методологической и ресурсной базы реализации контрмер для минимизации последствий и сокращения вероятности возникновения угроз, повышения положительного эффекта и частоты возникающих позитивных возможностей. Результаты этапа становятся также отправной точкой для распределения и фиксирования ответственности специалистов, участвующих в управлении организационной деятельностью в области эксплуатации природно-социально-производственных систем.

Решение задачи идентификации, анализа и мониторинга рисков должно рассматриваться в плоскости оценки влияния негативных и позитивных рисковых событий на критерии эффективности ИПД в области управления природно-социально-производственными системами с учетом наличия зависимостей между возникновением рисков. Степень причинно-следственной связи возникновения рисковых событий можно определить как байесовскую вероятность появления одного риска как последствия другого на определенном этапе функционирования природно-социально-производственных систем.

Система причинно-следственных связей возникновения рисковых событий может быть структурирована в виде дерева (рис. 3). На стадии идентификации рисковые события могут быть сегментированы по этапам, которые могут как иметь привязку ко времени, так и определяться на основе иерархических моделей от общего к частному.

На представленном рисунке объектами с прерывистой линией обозначены терминальные элементы, рисковые события, непосредственно влияющие на показатели эффективности управления природно-социально-производственными системами и не являющиеся причиной возникновения значимых рисков следующего уровня иерархии. Сплошной линией очерчены узлы дерева причинно-следственных связей, имеющие потомков и представляющие собой рисковые события, способные как непосредственно влиять на критерии эффективности, так и становиться причиной возникновения новых

рисков. Каждое ребро дерева, связывающее две вершины дерева причинно-следственных связей, характеризуется весом $r(R_i, R_j)$ — вероятность появления одного риска как последствия другого. Управляя риском R_i, минимизируя негативные последствия его возникновения в природно-социально-производственных системах, можно избежать или снизить вероятность появления риска R_j. При этом эффективное решение задачи управления корневыми рисками минимизирует потенциальное негативное влияние всех рисков системы.

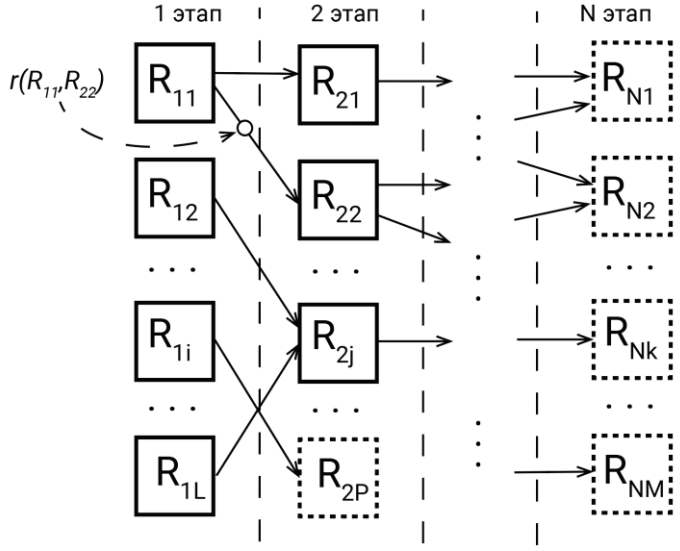


Рис. 3. Дерево причинно-следственных связей между рисками
Fig. 3. Tree of cause-and-effect relationships between risks

Дадим определение силы P_{R_i} i-го риска в виде формулы (1):

$$P_{R_i} = M_{R_i} + \sum_{j=1}^{n} r(R_i, R_j) \cdot P_{R_j} \quad (1),$$

где M_{R_i} — мера влияния i-го риска на критерии эффективности управления природно-социально-производственными системами;
$r(R_i, R_j)$ — оценка вероятности появления j-го риска как последствия i-го риска;
P_{R_j} — сила j-го риска, представляющего собой следствие i-го риска.

При условии оценки силы терминальных рисков, не имеющих потомков, представленная выше формула сведется к равенству силы риска и меры его непосредственного влияния. Сила же рисковых событий, отображаемых в виде корневых элементов дерева причинно-следственных связей, может быть рассчитана рекурсивно, начиная с листьев.

Результаты оценки силы рисковых событий позволяют подойти к решению задачи формирования квазиоптимальной совокупности контролируемых рисков управления природно-социально-производственными системами. Для решения этой задачи модель характеристик эффективности управления территориальными системами может быть

представлена в виде дерева, корневой узел которого определяет некий обобщенный критерий эффективности, определяющий основную цель внедрения ИПД.

Второй уровень иерархии показателей эффективности управления определяет вариант системной группировки параметров, диктуемый особенностями решаемой задачи. В качестве базового подхода предлагается сегментировать показатели по направлению функционирования территориальных систем безопасности — защиты от угроз гуманитарного, природного (естественного), техногенного характеров. Элементы третьего и последующих уровней определяют структурированную систему показателей эффективности управления природно-социально-производственными системами.

Построение квазиоптимальной совокупности контролируемых рисков управления целесообразно начать с определения степеней влияния дочерних показателей эффективности на обобщенный родительский критерий с последующим ранжированием элементов и выделением значимой совокупности. Следующим шагом становится формирование системы экспертных оценок степени и характера влияния последствий возникновения потенциальных рисков на показатели эффективности процесса управления природно-социально-производственными системами.

Наконец, необходимо учесть ограничения: ресурсоемкость и сложность процессов проектирования, разработки, внедрения и поддержки ИПД (или ее новой версии) как инструмента управления рисками (минимизацией негативных последствий и повышением эффективности использования возможностей). В том случае, если оценка потенциальных затрат на внедрение новых инструментов управления пространственными данными и системами представляет собой величину меньшую, чем затраты на управление рисками без внедрения нового решения, инициирование нового этапа внедрения геоинформационных технологий становится экономически обоснованным.

Другой важной особенностью подхода к управлению природно-социально-производственными системами, ориентированного на анализ и мониторинг рисков, является необходимость в ориентации на гибкую организацию процесса разработки информационных систем (agile software development) [*Al-Saqqa*, 2020]. Она направлена на минимизацию рисков посредством сведения цепочки процессов проектирования, разработки и внедрения ИПД к серии коротких циклов (итераций), артефактом каждого из которых становится пусть ограниченное с точки зрения функционала и качества, но тем не менее завершенное программно-аппаратное решение, ориентированное на решение прикладных задач в области минимизации рисков. С каждой новой итерацией при этом реализуется развитие функциональных возможностей ИПД, усиление ее качественных характеристик (надежность, отказоустойчивость, эргономичность), а главное — возможность более точного и своевременного мониторинга и управления природно-социально-производственными системами. Следование процессу итерационной гибкой разработки позволяет, в отличие от применения водопадной модели жизненного цикла, снизить риски резкого повышения ресурсоемкости внедрения новых (в т. ч. потенциально ненужных) технологий управления природно-социально-производственными системами.

Анализ опыта разработки информационным систем доказывает целесообразность ориентации на принципы объектно-ориентированного анализа, проектирования и программирования [*Aniche*, 2019] как набора инженерных подходов к разработке аппаратно-программных комплексов, формируемых на основе системы взаимодействующих объектов, инкапсулирующих в себе данные и методы и взаимодействующих на основе интерфейсов.

Решение проблемы эффективного итерационного функционального и качественного усиления ИПД возможно на основе соблюдения принципов SOLID [*Happe*, 2017] — 5 основных принципов объектно-ориентированного программирования и проектирования:

1) единственной ответственности (single responsibility principle), в рамках реализации которого для каждого системного компонента ИПД должно быть определено единственное назначение, а ресурсы, необходимые для его функционирования, должны быть подчинены только этой задаче;
2) открытости/закрытости (open-closed principle), при условии реализации которого ИПД становится выстроенной таким образом, что ее ключевые компоненты становятся открытыми для расширения, при этом необходимость серьезной модификации существующих систем сведена к минимуму;
3) подстановки Барбары Лисков (Liskov substitution principle), определяющий схему организации ИПД, в рамках которой подсистемы, использующие определенные базовые модули, должны иметь возможность и производные компоненты без существенных и ресурсоемких модификаций;
4) разделения интерфейса (interface segregation principle), при котором в случае изменения интерфейсов компонента не должны меняться подсистемы, которые этот компонент не используют;
5) инверсии зависимостей (dependency inversion principle) — выстраивание каркаса ИПД, в рамках которого подсистемы верхних уровней не должны зависеть от нижних, при этом зацепление модулей должно определяться интерфейсами, а не конкретной реализацией компонентов.

Соблюдение обозначенных принципов при решении задачи разработки проектно-ориентированных ИПД приводит к получению следующих эффектов: усиление связности модулей системы как меры их целеполагания на решение единой конкретной задачи и ослабление их взаимного зацепления, взаимозависимости. ИПД, выстроенные на основе сильно связанных и при этом слабо зацепленных компонентов, приобретают свойства модифицируемости, хорошей сопровождаемости, а также отказоустойчивости.

Результаты этапа оценки рисков становятся отправной точкой в решении задачи проектирования функциональных и качественных требований к инфраструктуре пространственных данных как инструмента управления природно-социально-производственными системами. В том случае, когда конечной целью проектных работ по проектированию, разработке, внедрению и сопровождению ИПД становится минимизация угроз и максимизация позитивных рисков (благоприятных возможностей), связанных с управлением территориально-распределенными ресурсами, появляется обоснованная возможность снижения временных, ресурсных, технических и качественных рисков процесса технической реализации системы управления пространственными данными.

Спроектированная, разработанная и развернутая ИПД в свою очередь становится инструментом осуществления мониторинга и управления рисками организационной деятельности, выстроенной вокруг взаимодействия с территориально распределенными природно-социально-производственными системами. Решение задачи оптимизации процессов консолидации и использования пространственных данных для управления природно-социально-производственными системами должно ориентироваться на критерии: достижение целевых эффектов ИПД, ресурсоемкости и сложности (организационной, операционной, алгоритмической, компетентностной, временной) процессов поддержки (построения, модификации, практического использования) при решении задач управления природно-социально-производственными системами. С точки зрения верхнего уровня абстракции, ИПД может быть декомпозирована на подсистемы анализа, центры хранения пространственных данных и компоненты визуализации, основанные на применении геопортальных систем.

Достижимость целевых эффектов (уменьшение влияния негативных рисков и повышение эффективности использования благоприятных возможностей), снижение ресурсоемкости и временной сложности модификации ИПД позволяет обосновать целесообразность внедрения ИПД для решения задач управления природно-социально-производственными системами. Ключевую роль в данном контексте играют задачи повышения эффективности мониторинга состояния территориально-распределенных систем, усиление качества, точности и быстродействия процесса управления агентами-посредниками по взаимодействию с удаленными объектами и ресурсами, скорости реагирования на чрезвычайные ситуации природного и природно-техногенного характеров.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проблемно-ориентированные геопортальные системы находят применение в различных отраслях народного хозяйства, решая задачи управления негативными и позитивными рисками. В данном разделе дана характеристика проектных решений, разработанных под руководством авторов статьи и направленных на формирование инструментов управления территориальными системами.

Примером информационной системы, реализованной с использованием парадигмы проектирования на основе процессов управления рисками является геопортал «Природное и культурное наследие Республики Мордовия», представленный на рисунке 5. Решение задач сохранения наследия предусматривает как непосредственную охрану и восстановление природных, исторических и культурных памятников, так и их системное изучение, рациональное использование, популяризацию знаний в обществе, в т. ч. среди молодежи.

Проект нацелен на решение проблемы использования имиджевого потенциала природного и культурного наследия региона как системы позитивных рисков (возможностей). Цифровое картографирование, системный анализ и распространение знаний о ключевых компонентах природного и исторического наследия Республики Мордовия в культурном ландшафте дает возможность развития туристской отрасли, способной стать одним из драйверов социально-экономического развития регионов России.

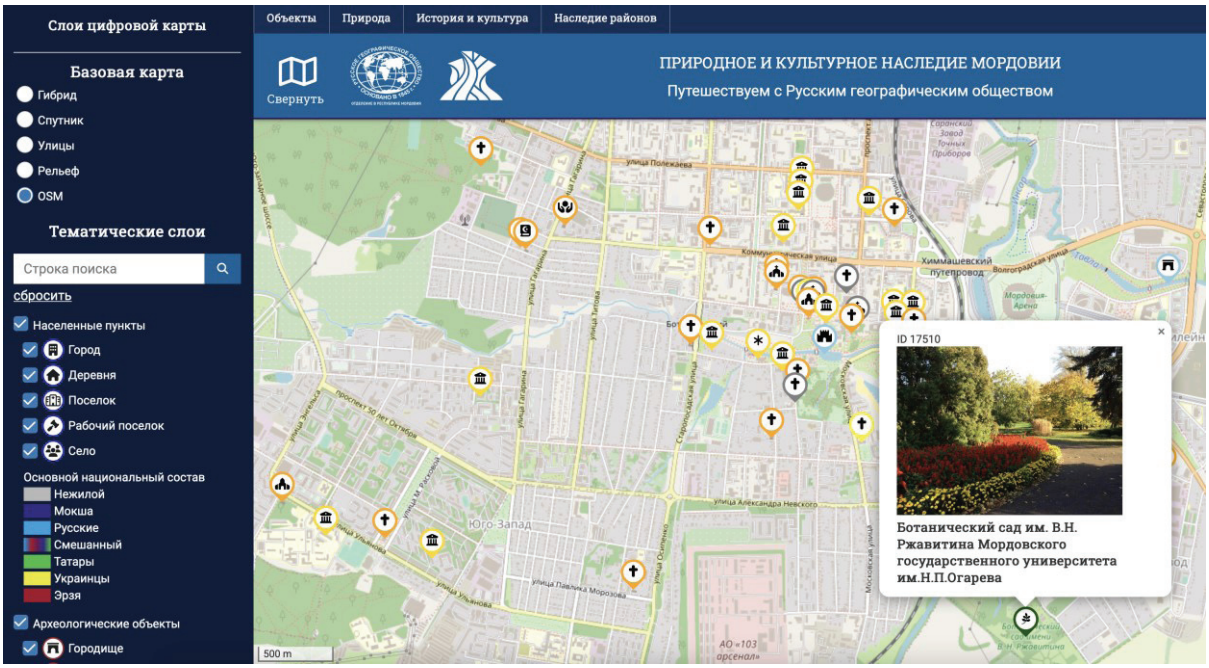


Рис. 5. Геопортал «Природное и культурное наследие Республики Мордовия»
Fig. 5. Geoportal "Natural and cultural heritage of the Republic of Mordovia"

Эффективность развития туристской отрасли в значительной мере опирается на реализацию потребности в многоуровневой географической информации о территории, содержащей знания о свойствах объектов интереса и представляемой в виде системы интерактивных цифровых карт. Функционирование геопортала «Природное и культурное наследие Республики Мордовия» опирается на реляционное хранилище данных, систематизирующее пространственные данные о пространственных объектах следующих тематических категорий:

1) «Реки»: дана гидрологическая характеристика более 170 рек региона;
2) «Особо охраняемые природные территории» (ООПТ): системное описание Национального парка «Смольный», Мордовского государственного природного заповедника им. П.Г. Смидовича, Ботанического сада им. В.Н. Ржавитина Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева, ботанические, геологические, гидрологические, дендрологические, зоологические, комплексные памятники природы (более 90 объектов);
3) «Археологические объекты» региона с описанием возраста и культурологических аспектов: городища, грунтовые могильники, курганы, местонахождения, поселения, стоянки, фортификации (690 объектов);
4) «Населенные пункты», включая информацию о топонимике, времени возникновения или первого упоминания, преобладающей национальности, особенностях развития городов, деревень, поселков и сел (более 1200 объектов);
5) «Религиозные объекты»: характеристика храмов различных конфессий, в т. ч. соборов и мечетей (более 550 объектов);
6) «Объекты культуры»: этно-культурные центры, музеи, места проведения праздников и фестивалей, мемориальные памятники, связанные с жизнью замечательных людей (более 80 объектов).

На цифровой карте геопортала также представлена информация о туристических речных маршрутах, раскрывающих туристический потенциал региона с целью решения задачи управления позитивными рисками. В целом в рамках цифровой карты «Природное и культурное наследие Республики Мордовия. Путешествуем с Русским географическим обществом»[1] представлена информация о более чем 2 800 объектах природного, исторического и культурного наследия. Геопортал нацелен на содействие управлению процессами туристско-рекреационного освоения региона на основе использования тематических пространственных данных о региональных метагеосистемах.

В рамках проекта конечной целью работ по разработке портала была обозначена необходимость максимизация эффекта использования позитивных рисков (благоприятных возможностей), связанных с управлением системами природного, исторического и культурного наследия. Достижение этого результата становится возможным посредством эффективного распространения комплексной (ландшафтной, исторической, культурологической, социологической, экономической, экологической) информации о регионе посредством созданного геопортала, решающего сформулированную проблему за счет способствования достижению следующих целевых эффектов:

1) организация информационного обеспечения процесса проведения инвестиционных кампаний для привлечения средств на сохранение объектов наследия;
2) информирование о процессах развития туристской инфраструктуры;
3) привлечение внимания к проблемам сохранения и развития народных традиций и ремесел;
4) реализация комплекса мер повышению имиджа элементов природного и исторического наследия.

[1] Геопортал. Электронный ресурс: https://map.rgo.life/ (дата обращения 01.02.2023).

Приведем пример геопортальной системы, разработанной в рамках конкурса Агентства стратегических инициатив по продвижению новых проектов и предназначенной для решения задачи визуализации территории затопления. Графические интерфейсы геопортала представлены на рис. 4. Проект апробирован на тестовом полигоне «Волхов», расположенном на территории Новгородской области в районе, где из оз. Ильмень вытекает р. Волхов и располагается г. Великий Новгород (между 58°24'7" и 58°45'50" с. ш., 31°00'57" и 31°48'51" в. д.).

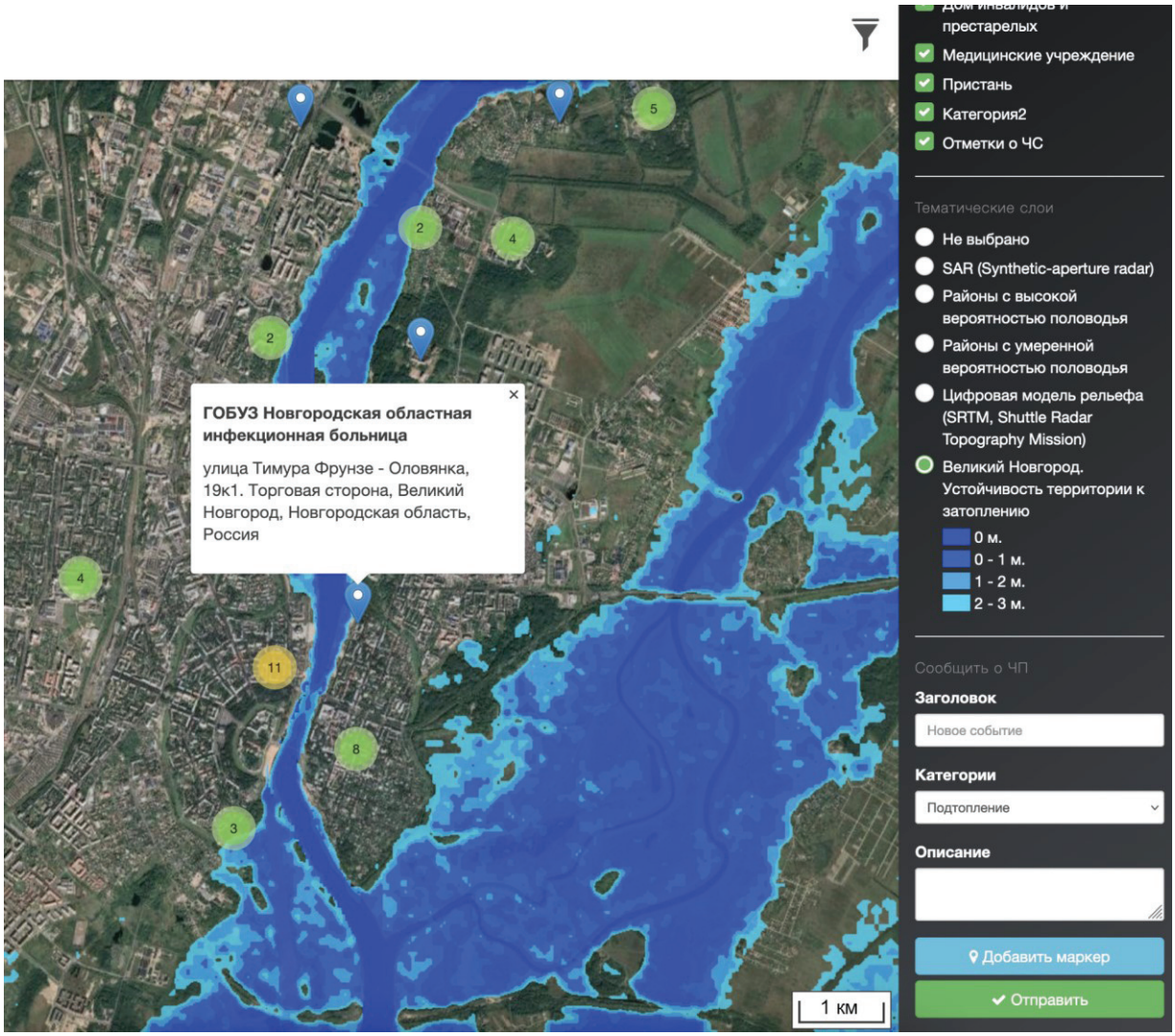


Рис. 4. Геопортальная система визуализации территории затопления
Fig. 4. Geoportal system for visualization of the flooded area

Проектирование системы изначально осуществлялось, исходя из необходимости решения задачи планирования, идентификации, анализа, мониторинга и управления рисками, связанными с опасностью поводков. Информационная система позволяет визуализировать на цифровой карте потенциальную территорию затопления при условии различной степени подъема уровня воды. В рамках системы внедрена также возможность визуализации ключевых объектов социальной и хозяйственной инфраструктуры, что позволяет оценить степень угрозы их затопления. В геопортальных интерфейсах функционирует виджет, визуализирующий данные с гидропостов. Наконец, модуль

обратной связи позволяет сообщить пользователям системы о чрезвычайной ситуации и отметить место маркером на цифровой карте. Инструменты администрирования позволяют редактировать реестр объектов в системе и модерировать сообщения о чрезвычайной ситуации с геопространственной привязкой.

Представленные проекты разработаны на основе использования открытого программного обеспечения. Ключевые компоненты, обеспечивающие функционирование инфраструктуры пространственных данных, реализованы с использованием микросервисного подхода и представляют собой изолированные системы, решающие конкретные задачи. Геопорталы построены на основе архитектурного паттерна Model-View-Controller, предписывающего необходимость декомпозиции информационной системы на компоненты обработки данных, визуализации интерфейсов и управления бизнес-логикой. Использование такого подхода позволяет решить проблему обеспечения модифицируемости системы, посредством эффективной реализации основных принципов объектно-ориентированного программирования и проектирования. В качестве базового языка программирования для разработки серверных модулей использован язык Python, а роль основной системы управления базами данных выполняет PostgreSQL. Графические интерфейсы пользователя спроектированы на основе технологий адаптивной верстки, работа интерактивных цифровых карт реализована посредством языка JavaScript и вспомогательных библиотек с открытым исходным кодом.

ВЫВОДЫ

В статье дана характеристика процесса внедрения инфраструктур пространственных данных для управления метагеосистемами на основе идентификации, анализа и мониторинга рисков. Система задач по оптимизации управления природно-социально-производственными системами сведена к трем позициям: первую категорию составляют условия безопасности жизнедеятельности человека, вторую — стабильность материальной и духовной деятельности общества, т. е. его устойчивое развитие, третью — высокое качество жизни населения.

Иерархически упорядоченные природно-социально-производственные системы (метагеосистемы) могут быть определены как системы обеспечения безопасности, стабильности и качества жизни населения, реализуя функцию защиты от угроз гуманитарного, природного (естественного) и техногенного характеров. Основываясь на данном положении, можно утверждать, что задача управления в пространственно-распределенных системах должна основываться на решении проблемы планирования, идентификации, анализа, мониторинга и управления рисками. Таким образом, проектируемые и внедряемые инфраструктуры пространственных данных должны представлять собой информационные системы, являющиеся инструментом идентификации, анализа и мониторинга рисков, возникающих в организационных системах.

Процесс управления рисками может быть интегрирован в процесс итерационного внедрения и использования ИПД в качестве входного этапа для стадии анализа требований к ИПД. В свою очередь, разработанные или усиленные версии инфраструктуры пространственных данных становятся инструментом мониторинга и управления рисками в организационных системах, деятельность которых связана с использованием пространственно-распределенных ресурсов. Задачи идентификации, анализа и мониторинга рисков должны рассматриваться в плоскости оценки влияния негативных и позитивных рисковых событий на критерии эффективности ИПД в области управления метагеосистемами с учетом наличия зависимостей между возникновением рисков. Результаты оценки силы рисковых событий позволяют подойти к решению задачи

формирования совокупности контролируемых рисков управления природно-социально-производственными системами и становятся отправной точкой в решении задачи проектирования функциональных и качественных требований к инфраструктуре пространственных данных как инструмента управления метагеосистемами.

Оптимизация процессов консолидации и использования пространственных данных в управлении природно-социально-производственными системами должна ориентироваться на критериях достижимости целевых эффектов ИПД, ресурсоемкости и сложности процессов поддержки внедряемых информационных систем. Достижимость целевых эффектов (уменьшение влияния рисков), снижение ресурсоемкости и временной сложности модификации ИПД позволяет обосновать целесообразность внедрения ИПД для решения задач управления природно-социально-производственными системами. Важной особенностью подхода по управлению природно-социально-производственными системами, ориентированного на анализ и мониторинг рисков, является необходимость в ориентации на гибкую организацию процесса разработки геоинформационных систем. Решение проблемы эффективного итерационного функционального и качественного развития ИПД возможно на основе соблюдения принципов SOLID.

Результаты проектирования и разработки геопортальных систем как инструментов управления пространственно-распределенными ресурсами и объектами спроектированы с точки зрения решения задач управления позитивными и негативными рисками. Геопортальная система визуализации территории затопления позволяет визуализировать на цифровой карте потенциальную территорию затопления при условии различной степени подъема уровня воды.

Геопортал «Природное и культурное наследие Республики Мордовия» нацелен на решение проблемы использование имиджевого потенциала природного и культурного наследия региона как системы позитивных рисков (возможностей): в рамках цифровой интерактивной карты системы представлена информация о более чем 2 800 объектах природного, исторического и культурного наследия. Геопортал нацелен на содействие управлению процессами туристско-рекреационным освоением региона на основе использования тематических пространственных данных о региональных метагеосистемах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00651, https://rscf.ru/project/22-27-00651/.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was supported by Russian science foundation (project No. 22-27-00651), https://rscf.ru/en/project/22-27-00651/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Артоболевский С.С., Бабурин В.Л., Бакланов П.Я., Касимов Н.С., Колосов В.А., Котляков В.М., Люри Д.И., Тишков А.А. Стратегии пространственного развития в Российской Федерации: географические ресурсы и ограничения. Известия Российской академии наук. Серия географическая, 2009. № 3. С. 8–17.

Николаев В.А. Классификация и мелкомасштабное картографирование ландшафтов. М.: Издательство Московского университета, 1978. 62 с.

Тикунов В.С., Котова Т.В., Белоусов С.К. Экологическое состояние: определение, показатели, картографирование. ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2021. Т. 27. № 1. С. 165–194. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-165-194.

Черкашин А.К. Метатеоретическое системное моделирование природных и Социальных процессов и явлений в неоднородной среде. Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2019. № 1 (13). С. 61–84. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-06.

Al-Saqqa S., Sawalha S., AbdelNabi H. Agile software development: Methodologies and trends. International Journal of Interactive Mobile Technologies, 2020. V. 14. No. 11. DOI: 10.3991/ijim.v14i11.13269.

Aniche M., Yoder J., Kon F. Current challenges in practical object-oriented software design. 2019 IEEE ACM 41st International Conference on Software Engineering: New Ideas and Emerging Results (ICSE-NIER), 2019. P. 113–116.

Faraji A. Rashidi M., Perera S., Samali B. Applicability-compatibility analysis of PMBOK seventh edition from the perspective of the construction industry distinctive peculiarities. Buildings, 2022. V. 12. No. 210.

Gkonos C., Iosifescu Enescu I., Hurni L. Spinning the wheel of design: Evaluating geoportal Graphical User Interface adaptations in terms of human-centred design. International Journal of Cartography, 2019. V. 5. No. 1. P. 23–43. DOI: 10.1080/23729333.2018.1468726.

Happe A., Duncan B., Bratterud A. Unikernels for cloud architectures: How single responsibility can reduce complexity, thus improving enterprise cloud security. COMPLEXIS, 2017. P. 30–41.

Heaton J., Datta A., Finley A.O. A case study competition among methods for analyzing large spatial data. Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics, 2019. V. 24. No. 3. P. 398–425. DOI: 10.1007/s13253-018-00348-w.

Lee J., Kang M. Geospatial Big Data: Challenges and opportunities. Big Data Research, 2017. V. 2. No. 2. P. 74–81. DOI: 10.1016/j.bdr.2015.01.003.

Räsänen A., Lein H., Bird D., Setten G. Conceptualizing community in disaster risk management. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2020. V. 45. Art. 101485. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2020.101485.

Yamashkin S.A., Yamashkin A.A., Zanozin V.V., Radovanovic M.M., Barmin A.N. Improving the efficiency of deep learning methods in remote sensing data analysis: Geosystem approach. IEEE Access, 2020. V. 8. P. 179516–179529. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3028030.

REFERENCES

Al-Saqqa S., Sawalha S., AbdelNabi H. Agile software development: Methodologies and trends. International Journal of Interactive Mobile Technologies, 2020. V. 14. No. 11. DOI: 10.3991/ijim.v14i11.13269.

Aniche M., Yoder J., Kon F. Current challenges in practical object-oriented software design. 2019 IEEE ACM 41st International Conference on Software Engineering: New Ideas and Emerging Results (ICSE-NIER), 2019. P. 113–116.

Artobolevsky S.S., Baburin V.L., Baklanov P.Ya., Kasimov N.S., Kolosov V.A., Kotlyakov V.M., Lyuri D.I., Tishkov A.A. Spatial development strategies in the Russian Federation: Geographical resources and constraints. Izvestia RAN. Seriya Geograficheskaya (News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series), 2009. No. 3. P. 8–17 (in Russian).

Cherkashin A.K. Metatheoretical system modeling of natural and social processes and phenomena in a heterogeneous environment. Information and Mathematical Technologies in Science and Management, 2019. No. 1 (13). P. 61–84 (in Russian). DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-06.

Faraji A., Rashidi M., Perera S., Samali B. Applicability-compatibility analysis of PMBOK seventh edition from the perspective of the construction industry distinctive peculiarities. Buildings, 2022. V. 12. No. 210.

Gkonos C., Iosifescu Enescu I., Hurni L. Spinning the wheel of design: Evaluating geoportal Graphical User Interface adaptations in terms of human-centred design. International Journal of Cartography, 2019. V. 5. No. 1. P. 23–43. DOI: 10.1080/23729333.2018.1468726.

Happe A., Duncan B., Bratterud A. Unikernels for cloud architectures: How single responsibility can reduce complexity, thus improving enterprise cloud security. COMPLEXIS, 2017. P. 30–41.

Heaton J., Datta A., Finley A.O. A case study competition among methods for analyzing large spatial data. Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics, 2019. V. 24. No. 3. P. 398–425. DOI: 10.1007/s13253-018-00348-w.

Lee J., Kang M. Geospatial Big Data: Challenges and opportunities. Big Data Research, 2017. V. 2. No. 2. P. 74–81. DOI: 10.1016/j.bdr.2015.01.003.

Nikolaev V.A. Classification and small-scale mapping of landscapes. Moscow: Moscow University Press, 1978. 62 p. (in Russian).

Räsänen A., Lein H., Bird D., Setten G. Conceptualizing community in disaster risk management. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2020. V. 45. Art. 101485. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2020.101485.

Tikunov V.S., Kotova T.V., Belousov S.K. Ecological state: Definition, indicators, mapping. InterCarto. InterGIS, 2021. V. 27. Part 1. P. 165–194 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-165-194.

Yamashkin S.A., Yamashkin A.A., Zanozin V.V., Radovanovic M.M., Barmin A.N. Improving the efficiency of deep learning methods in remote sensing data analysis: geosystem approach. IEEE Access, 2020. V. 8. P. 179516–179529. DOI: 10.1109/ACCESS.202 0.3028030.

УДК: 911.3 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-143-157**

О.Ю. Черешня[1], **М.В. Грибок**[2]

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЦИФРОВОГО НЕРАВЕНСТВА В РЕГИОНАХ РОССИИ

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена оценке состояния цифрового неравенства в регионах России. Авторами разработан комплексный индекс, основанный на концепции 3 уровней цифрового неравенства, и предложен метод проведения поуровневой оценки с последующей интеграцией результатов в единый комплексный индекс. Для оценки использованы 3 группы статистических показателей. Первая характеризует особенности доступа населения к цифровым технологиям, вторая — навыки использования Интернета, а третья — эффективность его использования в реальной жизни. На основе проведенных расчетов построены карты 3 уровней цифрового неравенства для территории России. Результаты исследования позволяют сравнить уровень цифрового неравенства по субъектам РФ, выделить регионы с самым высоким и низким уровнем цифрового неравенства, а также сделать выводы о причинах, влияющих на уровень компьютерной грамотности населения регионов. Исследование показало, что существуют инфраструктурные проблемы доступа к Интернету в некоторых регионах, экономические ограничения среди малообеспеченных слоев населения, проблемы недостатка навыков работы среди сельских жителей и населения старшего возраста. В некоторых регионах, например — в Чукотском АО, выявлены высокие показатели компьютерных навыков населения, несмотря на низкий уровень развития инфраструктуры. В других регионах, например — в республиках Северного Кавказа, прослеживается низкий уровень развития инфраструктуры, низкий уровень компьютерной грамотности населения и наиболее низкая эффективность использования цифровых технологий для повышения качества жизни. Стратегия цифровизации экономики в таких регионах должна учитывать не только инвестиции в цифровую инфраструктуру, но и программы по улучшению компьютерных навыков населения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровое неравенство, регионы России, цифровая экономика

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991,
e-mail: **chereshnia.o@geogr.msu.ru**

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991,
e-mail: **gribok.marina@gmail.com**

Olga Yu. Chereshnia[1], **Marina V. Gribok**[2]

COMPLEX ASSESSMENT OF DIGITAL INEQUALITY IN THE REGIONS OF RUSSIA

ABSTRACT

The article is devoted to the assessment of digital inequality in the regions of Russia. The authors have developed a comprehensive index based on the concept of three levels of digital inequality. A method of conducting a level-by-level assessment with subsequent integration of the results into a single complex index is proposed. Three groups of statistical indicators were used for the assessment. The first characterizes the features of the population's access to digital technologies, the second — the skills of using the Internet, and the third — the effectiveness of its use in real life. Based on the calculations performed, maps of digital inequality levels were constructed for the territory of Russia. The results of the study made it possible to compare the level of digital inequality across the subjects of the Russian Federation, identify the regions with the highest and lowest levels of digital inequality, and draw conclusions about the causes affecting the level of computer literacy of the population of the regions. The study revealed that there are infrastructure problems with access in remote regions, economic constraints among low-income groups, and a lack of skills among rural populations and older age groups. Some regions, such as the Chukotka Autonomous Okrug, show high levels of computer skills among the population despite a low level of infrastructure development. In other regions, such as the North Caucasus, there is a poor level of infrastructure development, low levels of computer literacy, and the lowest efficiency in using technology to improve quality of life. The strategy for digitalization of the economy in such regions should consider not only investments in digital infrastructure but also programs to improve the computer skills of the population.

KEYWORDS: digital inequality, Russian regions, digital economy

ВВЕДЕНИЕ

Активное развитие компьютерных технологий началось в последние десятилетия XX в. и ускорилось в начале XXI в. с развитием Интернета. Технологический прогресс оказал значительное влияние на экономику, политику, культуру и общество в целом. В первые годы массового распространения Интернета предполагалось, что цифровые технологии позволят «стереть» границы между людьми, откроют доступ к знаниям в самых удаленных уголках Земли и дадут новые возможности тем, кто раньше не мог себе позволить хорошее образование. Но в реальности одного лишь доступа к технологиям оказалось недостаточно, и ученые начали замечать новые проблемы технологического неравенства еще в конце XX в. Исследования по этой тематике начали проводиться в конце 1990-х гг. Они показали, что доступ к высокоскоростному Интернету был ограничен географическими и социально-экономическими факторами. Так, в США и Европе были выявлены проблемы с доступом к Интернету у населения с низкими доходами и сельских жителей, а также у людей с ограниченными возможностями здоровья [*Hoffman*, *Novak*, 1998; *Strover*, 1999]. Появился первый термин, обозначающий выявленную проблему — цифровой разрыв (англ. digital divide) — это «разрыв между отдельными людьми, домашними хозяйствами, предприятиями и географическими районами на разных

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **chereshnia.o@geogr.msu.ru**

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **gribok.marina@gmail.com**

социально-экономических уровнях с точки зрения возможности их доступа к информационно-коммуникационным технологиям (ИКТ) и их использования для разных видов деятельности»[1].

По мере повсеместного распространения информационных технологий проблема неравномерного доступа к ним оформилась более явно. Оказалось, что неравенство может сохраняться даже после того, как был обеспечен практически равный доступ к технологиям. Данная проблема наблюдается как в странах с высоким уровнем дохода [*Peter*, *Valkenburg*, 2006; *Hargittai*, *Hinnant*, 2008], так и с низким [*Drori*, 2010]. Это подтверждено в т. ч. и в отчете Международного союза электросвязи[2].

Исследования также показали, что особенности использования Интернета и других цифровых технологий также зависит от возраста, пола, уровня образования и размера дохода пользователей. Например: молодежь, люди с высшим образованием и высоким доходом чаще используют Интернет и другие цифровые технологии, чем люди старшего возраста, менее образованные и менее обеспеченные. Таким образом появилось более широкое понятие — цифровое неравенство (англ. digital inequality), обозначающее систематические различия между людьми разного социально-экономического положения в отношении их доступа, навыков, использования и результатов, полученных в результате взаимодействия с цифровыми технологиями [*Büchi*, *Hargittai*, 2022]. Данное понятие включает в себя собственно цифровой разрыв, а также прочие факторы, влияющие на использование технологий людьми, имеющими формальный доступ к ним. Неравенство проявляется в т. ч. в неравномерном распределении навыков работы в Интернете (например, умении искать информацию), а также в использовании Интернета не только для развлечения или общения в социальных сетях [*Van Deursen*, *Helsper*, 2015].

Перечисленные выше зарубежные исследования цифрового неравенства показали, что доступ и использование цифровых технологий характеризуются неравномерностью, связанной с географическими, социально-экономическими и культурными факторами, которые могут приводить к дополнительным проблемам и цифровой изоляции некоторых групп населения.

В отечественной науке интерес к теме также появился в 1990-х гг. и в дальнейшем только усиливался [*Авраамова*, *Вершинская*, 2001; *Юдина*, 2020; *Gladkova* et al., 2020]. Сам термин «цифровое неравенство» вошел в научный обиход после проведения международного семинара «Проблемы преодоления „цифрового неравенства“ в России и странах СНГ» в ноябре 2000 г. [*Захаров*, *Сидорова*, 2016]. Однако по мере развития темы начала наблюдаться некоторая путаница с сопоставлением англоязычной и русскоязычной терминологии. Англоязычный термин digital divide в отечественных исследованиях переводится и как «цифровой разрыв», «информационное неравенство», «цифровой барьер», и как «цифровое неравенство». Тогда как в английском языке все это разные понятия: цифровой разрыв и цифровой барьер — digital divide, а цифровое неравенство или информационное неравенство — digital unequality.

Современные исследования выделяют три уровня цифрового неравенства:

- Первый уровень — неравенство в доступе к технологиям, вызванное экономическими или физическими ограничениями, т. е. собственно digital divide;
- Второй уровень — неравенство в навыках использования технологий, которое происходит из-за различий в уровне цифровой грамотности и образования;

---

1 OECD, Understanding the Digital Divide (2001). Электронный ресурс: http://www.oecd.org/dataoecd/38/57/1888451.pdf (дата обращения 31.03.2023).

2 Measuring the information society. Geneva: ITU. Электронный ресурс: http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/publications/mis2011.aspx (дата обращения 31.03.2023).

- Третий уровень — неравенство в возможностях получения ощутимых результатов в реальной жизни за счет паттернов использования технологий, которое может затрагивать сферы трудоустройства, образования, участия в политической жизни и т. д. [*Van Dijk*, 2012; *Du* et al., 2021].

Большинство работ о цифровом неравенстве в регионах России подходят к данной теме в основном с технологической точки зрения, т. е. с разрыва между теми, кто имеет и не имеет доступа к цифровым технологиям, и анализируют множество факторов, влияющих на этот разрыв. Чаще всего исследуются показатели широкополосного доступа к Интернету [*Архипова*, *Сиротин*, 2019; *Груздева*, 2020; *Дудин* и др., 2021; *Земцов* и др., 2022]. Некоторые исследователи идут дальше и анализируют второй уровень [*Квасникова* и др., 2020; *Николаева*, *Иванов*, 2020], либо первый и второй уровни вместе [*Grishchenko*, 2020; *Yanovskaya* et al., 2022].

Статистической информации для оценки первых двух уровней неравенства вполне достаточно, однако следует признать, что методологические подходы к сбору федеральных статистических данных об особенностях использования ИКТ в России не позволяют оценить в полной мере третий уровень цифрового неравенства в разрезе регионов. Большинство существующих западных исследований третьего уровня цифрового неравенства используют социологический подход, однако на данный момент общепринятой методики для оценки третьего уровня цифрового неравенства не существует.

Географические исследования, касающиеся комплексной оценки всех 3 уровней цифрового неравенства, пока еще единичны. Так, в работе испанского ученого Д. Гомеса [*Gómez*, 2018] анализируются три уровня цифрового разрыва среди молодежи, проживающей в одном районе Мадрида, а в статье российских исследователей [*Гладкова* и др., 2019] апробируется трехуровневая модель комплексного анализа цифрового разрыва на примере Республики Татарстан. Сложность проведения подобных исследований состоит в том, что количественно оценить третий уровень цифрового неравенства более крупных территориальных образований в сопоставимых с первыми двумя уровнями показателях крайне сложно.

В работе [*Ragnedda*, *Kreitem*, 2018] авторы анализируют показатели, связанные с распространением и использованием Интернета (первый уровень цифрового неравенства), уровнем цифровых навыков (второй уровень цифрового неравенства) и цифровыми услугами, используемыми гражданами в восточных странах ЕС для повышения качества их жизни (третий уровень цифрового разрыва). Использование показателя цифровых услуг для оценки третьего уровня видится нам спорным, но других вариантов на сегодняшний день предложено мало.

На основе имеющегося опыта перечисленных исследований зарубежных и российских ученых в данной работе авторами предложено свое решение проблемы совмещения оценки всех 3 уровней цифрового неравенства на примере регионов России. Цель исследования — разработка индекса цифрового неравенства, позволяющего производить комплексную оценку цифрового неравенства на уровне субъектов РФ, а в дальнейшем и на страновом уровне.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки трех уровней цифрового неравенства по субъектам РФ были собраны три группы статистических показателей.

Первый уровень цифрового неравенства оценивался через инфраструктуру широкополосного доступа к Интернету через показатели численности абонентов

широкополосного доступа к Интернету в расчете на 100 чел. населения для фиксированного (через фиксированные линии связи, такие как оптоволоконные кабели, DSL или кабельное телевидение) и мобильного Интернета[1]. Эти показатели отражают доступность широкополосного интернета для населения и являются индикаторами наличия устойчивой телекоммуникационной сети. Показатель численности абонентов мобильного Интернета также отражает уровень развития телекоммуникационной инфраструктуры, т. к. он показывает, насколько широко распространены мобильные сети связи и доступ к Интернету через них. Данные показатели широко используется для оценки неравенства в доступе к ИКТ как в России, так и в мире, емко характеризуют как экономические ограничения (население не может позволить себе широкополосный доступ), так и физические (сложность обеспечения широкополосным доступом территории из-за труднодоступности региона). Эти два показателя были агрегированы в индикатор «Уровень инфраструктуры».

Второй уровень цифрового неравенства оценивался также с помощью показателей, публикуемых Росстатом: «Навыки работы населения на персональном компьютере (в процентах от общей численности населения, использующего персональный компьютер): Работа с текстовым редактором; Передача файлов между компьютером и периферийными устройствами (цифровой камерой, плеером, мобильным телефоном); Работа с электронными таблицами» и «Население, никогда не использующее сеть Интернет». Эти показатели хорошо зарекомендовали себя во многих исследованиях, хотя не лишены некоторых недостатков. Например, со временем они теряют актуальность, т. к. появляются все новые и новые утилиты и программы, которые необходимо освоить для эффективной работы с современными системами. Например, никакая государственная статистика не оценивает навыки использования мобильных устройств, безопасного осуществления платежей, безопасного использования социальных сетей, работы с криптовалютами или искусственным интеллектом. Показатель «Население, никогда не использующее сеть Интернет» учитывает людей, которые не используют Интернет как из-за отсутствия необходимости (нежелание пользоваться, нет интереса), недостатка навыков для работы в Интернете, высоких затрат на подключение, отсутствия технической возможности подключения и по соображениям безопасности и конфиденциальности. Исходные показатели были агрегированы в индикатор «Уровень цифровых навыков».

Оценка **третьего уровня** цифрового неравенства представляла собой отдельный научный интерес, т. к. если для первых двух уровней существуют различные методики оценки, которые можно было адаптировать для нашего исследования, то исследования третьего уровня цифрового неравенства — новое направление, и методик оценки и статистических данных, которые были бы доступны на уровне субъектов РФ, не имеется. Поэтому нами была разработана новая методика, подробно описанная в статье [*Черешня*, *Грибок*, 2022]. В ее основе — определение 3 категорий тем поисковых запросов российских пользователей в Google, ассоциированных с разными типами использования цифровых технологий и их влияния на качество жизни. Предполагается, что поисковые запросы пользователей отражают их основные паттерны использования сети Интернет. Люди с высшим образованием и более высоким доходом чаще используют информационные технологии в информационных, образовательных, рабочих и карьерных целях, а люди с низким уровнем образования и дохода в основном используют приложения для развлечения, чатов, социальных сетей или простого общения [*Zillien*, *Hargittai*, 2009; *Van Duersen*, *Helsper*, 2015; *Tsetsi*, *Reins*, 2017]. Другие данные подтверждают это

[1] Росстат. Информационное общество. Электронный ресурс: https://rosstat.gov.ru/statistics/infocommunity (дата обращения 31.03.2023).

предположение, например показывая, что люди с более высоким уровнем образования получают больше экономических, институциональных и образовательных преимуществ от Интернета, чем менее образованные.

Опираясь на эти выводы, мы разделили паттерны поисковых запросов на условно позитивные и условно негативные, в зависимости от их влияния на качество жизни населения. Первая категория включала запросы, связанные с повседневными услугами и сервисами. Вторая категория — запросы, связанные с образованием, наукой и технологиями, а третья — запросы, связанные с развлечениями. Высокий интерес к запросам первой и второй категории указывает на более эффективное использование Интернета, тогда как использование Интернета для развлечений не способствует повышению его эффективности.

На основе собранных данных были рассчитаны индексы поискового интереса к каждой из 3 тематических категорий: «Повседневные услуги и сервисы», «Образование, наука и технологии» и «Развлечения», а также интегральный индекс «Уровень эффективности использования Интернета», который в данном исследовании использован в качестве индикатора оценки цифрового неравенства третьего уровня.

Для расчета комплексного индекса цифрового неравенства использованы индикаторы, представленные в табл. 1.

Табл. 1. Индикаторы для расчета комплексного индекса цифрового неравенства
Table 1. Indicators for calculating a comprehensive index of the digital inequality

Индикатор	**Показатели**
Уровень инфраструктуры	Абоненты широкополосного доступа к Интернету в расчете на 100 чел., ед., фиксированного
	Абоненты широкополосного доступа к Интернету в расчете на 100 чел., ед. мобильного
Уровень цифровых навыков	Навыки работы населения на персональном компьютере (в % от общей численности населения, использующего персональный компьютер): • работа с текстовым редактором; • передача файлов между компьютером и периферийными устройствами (цифровой камерой, плеером, мобильным телефоном); • работа с электронными таблицами
	Население, никогда не использующее сеть Интернет
Уровень эффективности использования Интернета	Поисковый интерес к повседневным услугам и сервисам
	Поисковый интерес к образованию, науке и технологиям
	Поисковый интерес к развлечениям

На основе агрегированных показателей, полученных нами для каждого уровня цифрового неравенства, был рассчитан комплексный Индекс цифрового неравенства с помощью методики математического моделирования, описанного в работе В.С. Тикунова [1997, с. 83–85]. Он включает в себя нормировку исходных показателей по формуле (1):

$$\hat{X}_{ij} = \frac{\left| x_{ij} - \overset{o}{x}_j \right|}{\left| \max/\min x_j - \overset{o}{x}_j \right|}, \quad \begin{matrix} i=1, 2, 3, \ldots, n; \\ j=1, 2, 3, \ldots, m \end{matrix} \qquad (1)$$

где $\overset{0}{x}$ — наихудшие значения для каждого индикатора из всех встречающихся (например, наименьшее для показателя «Навыки работы населения на персональном компьютере») и наибольшее для показателя «Поисковый интерес к развлечениям»;

$\max/\min x$ — наиболее отличающиеся от $\overset{0}{x}$ значения показателей;

n — количество исследуемых территориальных единиц — регионов России;

m — число показателей, использованных для расчетов.

Целью этой нормировки является преобразование каждого индикатора в отклонение от заданного лучшего или худшего значения. Полученные нормированные показатели ограничены диапазоном от 0 до 1 и могут быть агрегированы в комплексный интегральный индекс цифрового неравенства с помощью вычисления простого среднего.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе расчетов значений каждого из 3 индикаторов по субъектам РФ нами построены карты, наглядно отображающие неравномерность показателей цифрового неравенства первого, второго и третьего уровней по территории России.

Карта, представленная на рис. 1, иллюстрирует распределение по регионам значений индикатора «Уровень инфраструктуры», характеризующего цифровое неравенство первого уровня.

Рис. 1. Индикатор «Уровень инфраструктуры», характеризующий цифровое неравенство первого уровня
Fig. 1. The indicator "Infrastructure level", which characterizes the digital inequality of the first level

Уровень развития широкополосного доступа в России в среднем ниже, чем в развитых странах. Россия — это большая страна с большим количеством и разреженно населенных регионов, что затрудняет развертывание широкополосной инфраструктуры в этих регионах. Логично, что наиболее высокий уровень развития цифровой инфраструктуры отмечен в Москве (0,98). За ней следуют Новосибирская область, г. Санкт-Петербург и Ямало-Ненецкий АО. Наименьший уровень развития инфраструктуры широкополосного доступа наблюдается в национальных республиках, особенно на Северном Кавказе — в Ингушетии (0,20) и Дагестане (0,25). В значительной степени это может быть связано с труднодоступностью многих населенных пунктов, общим уровнем инфраструктуры и низким уровнем доходов населения.

Отдельно отметим Республику Крым и Севастополь, где, согласно официальным данным, показатели доступа к Интернету крайне низкие. Однако можно утверждать, что они не отражают реальной картины, т. к. в 2019 г. из-за санкций многие услуги, в особенности — мобильную связь, жители могли получать какими-либо обходными путями.

Россия в последние годы активно инвестирует в инфраструктуру, в т. ч. в развитие широкополосного доступа к Интернету. Для того, чтобы снизить разрыв регионов по уровню широкополосного доступа к Интернету, необходимо увеличить инвестиции в инфраструктуру, улучшить регуляторную среду и содействовать внедрению новых технологий, например — развертке сетей 5G. Также важно обеспечить доступность широкополосного Интернета для жителей разреженно населенных регионов, чтобы обеспечить равномерный доступ к цифровым технологиям по всей территории России.

На рис. 2 представлена карта, которая построена на основе индикатора «Уровень цифровых навыков», характеризующего цифровое неравенство второго уровня.

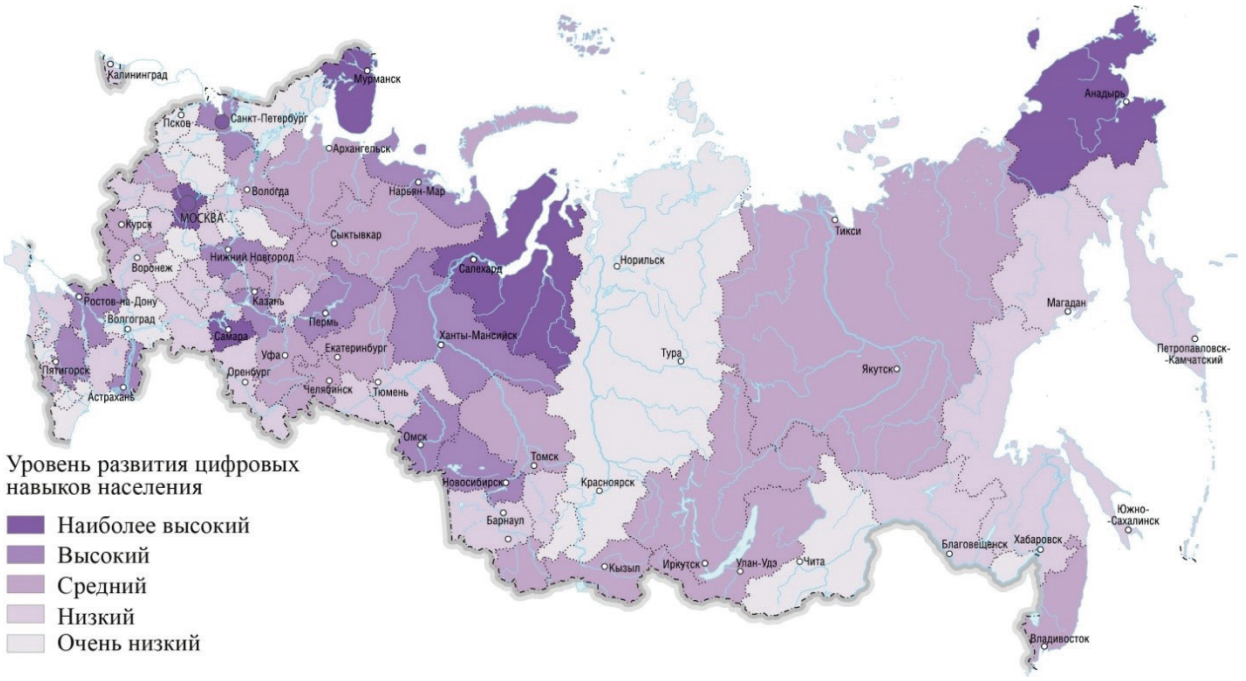


Рис. 2. Индикатор «Уровень цифровых навыков», характеризующий цифровое неравенство второго уровня
Fig. 2. The indicator "Digital skills level", which characterizes the digital inequality of the first level

Согласно нашей оценке, Чукотский автономный округ обладает самым высоким уровнем компьютерной грамотности среди всех регионов с показателем 0,84. За ним следуют Москва (0,82) и Ямало-Ненецкий автономный округ (0,74). С другой стороны, Новгородская область имеет самый низкий показатель среди регионов — 0,15; регион отличается низкими навыками населения в работе с персональным компьютером и высокой долей людей, никогда не пользовавшихся Интернетом (20 %!). Другие регионы с очень низкими показателями включают Рязанскую область (0,17), Чеченскую Республику (0,18) и Ивановскую область (0,26). Из оценки видно, что существует значительная вариация уровня компьютерной грамотности в различных регионах России. Это может влиять на развитие цифровой экономики в этих регионах.

Низкий уровень компьютерной грамотности в регионах России может быть обусловлен несколькими причинами:

- недостаточный уровень развития инфраструктуры, что делает технологии недоступными для многих людей;
- ограниченный доступ к обучению и образованию в области компьютерной грамотности;
- у населения недостаточно мотивации для изучения компьютерной грамотности;
- низкий уровень доходов населения;
- возрастной фактор: согласно исследованиям, среди пожилых людей уровень компьютерной грамотности ниже, что может быть связано с их нежеланием учиться новым технологиям или трудностями в их использовании.

Рис. 3. Индикатор «Уровень эффективности использования Интернета», характеризующий цифровое неравенство второго уровня
Fig. 3. The indicator "Level of efficiency of Internet use", which characterizes the digital inequality of the third level

Регионы с высокими показателями компьютерной грамотности могут иметь больше возможностей для использования цифровых технологий в различных сферах, включая экономику, здравоохранение и образование. С другой стороны, регионы с низким уровнем

компьютерной грамотности, такие как Новгородская область, могут иметь ограниченный доступ к цифровым услугам и возможностям, что может приводить к ухудшению их экономического и социального развития. Повышение компьютерной грамотности и доступности цифровых технологий в таких регионах может стать важным шагом в направлении сокращения цифрового неравенства и обеспечения равных возможностей для всех граждан России.

В паттернах эффективности использования Интернета населениям также прослеживаются некоторые географические закономерности. Наиболее явно выделяются регионы Северного Кавказа, для которых выявлен наиболее низкий уровень эффективности использования Интернета. Поисковые запросы в этом регионе в основном тяготеют к тематике развлечений, что косвенно свидетельствует о том, что сеть Интернет мало используется для экономически и социально полезных действий. Наиболее высокий уровень эффективности использования Интернета выявлен в Татарстане и Якутии, а также в Москве и Санкт-Петербурге.

В целом мы можем отметить скорее низкую эффективность использования Интернета в регионах Сибирского федерального округа. Здесь пользователи в основном не проявляют высокого интереса к темам образования и науки, а также не показывают высокий уровень использования онлайн-услуг. При этом показатель поиска развлечений выше среднего.

Регионы Дальневосточного федерального округа отличаются наибольшим разнообразием по полученному интегральному индексу. Здесь есть регионы как с очень низкой (Еврейская АО), так и с очень высокой эффективностью использования Интернета (Якутия).

Регионы Уральского и Центрального федеральных округов России показывают высокую эффективность использования Интернета. Здесь население чаще всего ищет полезные сервисы, информацию для образования и науки. Единственное исключение — Курганская область.

Рис. 4. Индекс цифрового неравенства
Fig. 4. The Digital Inequality Index

Комплексная оценка цифрового неравенства показала (рис. 4), что самый низкий индекс цифрового неравенства наблюдается в г. Москве и г. Санкт-Петербурге, Ямало-Ненецком АО, Республике Татарстан и Московской области. Хуже всего ситуация с цифровым неравенством на Кавказе: в Карачаево-Черкесской Республике, Республике Дагестан, Чеченской Республике и Республике Ингушетии. Эти регионы «проседают» по всему комплексу показателей. Выделяются высоким уровнем неравенства некоторые регионы Сибири и Дальнего Востока. Достаточно низкий уровень цифрового неравенства в регионах Урала и Северо-Запада. Примечательно, что в большинстве регионов Центральной России, за исключением Московской области и Москвы, выявлен высокий уровень цифрового неравенства.

ВЫВОДЫ

Как показывает исследование, показатели всех уровней цифрового неравенства в регионах России весьма вариативны. Цифровое неравенство увеличивают инфраструктурные проблемы доступа к Интернету в отдаленных территориях, экономические ограничения малообеспеченных слоев населения, проблемы недостатка навыков работы с технологиями среди сельского населения и групп старшего возраста, недостаток эффективности и навыков использования технологий. Некоторые регионы, например Чукотский АО, при низком уровне развития инфраструктуры показывают очень высокие показатели компьютерных навыков населения. Эффективной мерой поддержки для технологически грамотного населения здесь могло бы стать снижение стоимости услуг связи, а также развитие сетей нового поколения.

Многие регионы Северного Кавказа «проседают» по всем показателям цифрового неравенства: плохой уровень развития инфраструктуры, низкий уровень компьютерной грамотности, самая низкая эффективность использования технологий для повышения качества жизни. Подобная ситуация формирует порочный круг: нет доступа, а значит — нет возможности сформировать компьютерные навыки, а следовательно и нет понимания эффективных стратегий имплементации технологий в повседневную жизнь. В таких регионах одних только инвестиций в цифровую инфраструктуру будет недостаточно, они не дадут должного результата. Как показывает практика других стран, при низком уровне компьютерной грамотности население, получившее доступ к технологиям, может столкнуться даже со снижением качества жизни: растет риск стать жертвами мошенничества, потерять важные персональные данные. При введении обязательных электронных процедур (например, получение сертификатов вакцинации), люди сталкиваются с непреодолимыми препятствиями и не могут реализовать свои права.

Новые технологичные развлечения, которые требуют гораздо меньше компьютерных навыков и усилий, снижают возможности для эффективного труда и обучения. Поэтому стратегия цифровизации экономики в регионах с высоким уровнем цифрового неравенства должна включать программы по улучшению компьютерных навыков, повышению цифровых компетенций населения, в особенности, с точки зрения безопасности и эффективности использования Интернета.

Некоторые факторы, которые могут влиять на цифровое неравенство в России:

- Географическое положение: населенные пункты на отдаленных территориях России могут иметь ограниченный доступ к широкополосному Интернету из-за ограниченной инфраструктуры;
- Социально-экономическое положение: бедные и малообеспеченные слои населения могут иметь ограниченный доступ к цифровым технологиям из-за невозможности приобретения необходимого оборудования или оплаты услуг доступа в Интернет;

- Образование: люди с низким уровнем образования могут испытывать трудности в использовании цифровых технологий;
- Возраст: пожилые люди могут иметь ограниченный доступ к цифровым технологиям из-за низкого уровня компьютерной и технологической грамотности.

Для того, чтобы снизить цифровое неравенство в России, необходимо улучшить доступность широкополосного Интернета, особенно для сельского населения и населения на отдаленных территориях, а также разработать программы поддержки для малообеспеченных слоев населения. Также важно повышать уровень компьютерной грамотности и технологической грамотности во всех возрастных группах населения, в т. ч. в сельских регионах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РНФ, грант № 21-77-00024.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Science Foundation, grant No. 21-77-00024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авраамова Е.А., Вершинская О.Н. Домашний компьютер как ресурс социально-экономической адаптации. Информационное общество, 2001. № 5. С. 44–49.

Архипова М.Ю., Сиротин В.П. Региональные аспекты развития информационно-коммуникационных и цифровых технологий в России. Экономика региона, 2019. Т. 15. № 3. С. 670–683.

Гладкова А.А., Гарифуллин В.З., Рагнедда М. Модель трех уровней цифрового неравенства: современные возможности и ограничения (на примере исследования Республики Татарстан). Вестник Московского университета. Серия 10: Журналистика, 2019. № 4. С. 46–56.

Груздева М.А. Включенность населения в цифровое пространство: глобальные тренды и неравенство российских регионов. Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз, 2020. Т. 13. № 5. С. 90–104. DOI: 10.15838/esc.2020.5.71.5.

Дудин М.Н., Шкодинский С.В., Усманов Д.И. Оценка влияния цифрового неравенства на уровень социально-экономического развития регионов Российской Федерации. Вопросы инновационной экономики, 2021. Т. 11. № 3. С. 962–984. DOI: 10.18334/vinec.11.3.113452.

Захаров А.Л., Сидорова А.В. Информационное неравенство: история и современность. Вопросы экономики и права, 2016. № 100. С. 17–21.

Земцов С.П., Демидова К.В., Кичаев Д.Ю. Распространение Интернета и межрегиональное цифровое неравенство в России: тенденции, факторы и влияние пандемии. Балтийский регион, 2022. Т. 14. № 4. С. 57–78. DOI: 10.5922/2079-8555-2022-4-4.

Квасникова М.А. Цифровое неравенство и его влияние на социально-экономическое развитие регионов в России. Социально-политические исследования, 2020. № 1(6). С. 43–58. DOI: 10.20323/2658-428X-2020-1-6-43-58.

Николаева И.В., Иванов Н.Ю. Цифровая грамотность населения отдаленных территорий Российской Федерации. Вестник Алтайской академии экономики и права, 2020. № 11(2). С. 295–300.

Тикунов В.С. Моделирование в картографии. М.: Издательство МГУ, 1997. 405 с.

Черешня О.Ю., Грибок М.В. Методика региональной оценки цифрового неравенства третьего уровня ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 43–57. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-43-57.

Юдина М.А. Влияние цифровизации на социальное неравенство. Уровень жизни населения регионов России, 2020. Т. 16. № 1. С. 97–108. DOI: 10.19181/lsprr.2020.16.1.10.

Büchi M., Hargittai E. A Need for Considering Digital Inequality When Studying Social Media Use and Well-Being. Social Media + Society, 2022. No. 8(1). DOI: 10.1177/20563051211069125.

Drori G.S. Globalization and technology divides: Bifurcation of policy between the "Digital divide" and the "Innovation divide". Sociological Inquiry, 2010. No. 80(1). P. 63–91.

Du H., Zhou N., Cao H., Zhang J., Chen A., King R.B. Economic inequality is associated with lower Internet use: A nationally representative study. Social Indicators Research, 2021. No. 155(3). P. 789–803. DOI: 10.1007/s11205-021-02632-8.

Gladkova A., Vartanova E., Ragnedda M. Digital divide and digital capital in multiethnic Russian society. Journal of Multicultural Discourses, 2020. No. 15(2). P. 126–147. DOI: 10.1080/ 17447143.2020.1745212.

Gómez D. Os três níveis da divisão digital: Barreiras no acesso, na utilização e na utilidade da Internet entre jovens em Espanha. Interações: Sociedade E As Novas Modernidades, 2018. No. 34. P. 64–91. DOI: 10.31211/interacoes.n34.2018.a4.

Grishchenko N. The gap not only closes: Resistance and reverse shifts in the digital divide in Russia. Telecommunications Policy, 2020. V. 44. Iss. 8. DOI: 10.1016/j.telpol.2020.102004.

Hargittai E., Hinnant A. Digital inequality: Differences in young adults' use of the Internet. Communication Research, 2008. No. 35(5). P. 602–621. DOI: 10.1177/0093650208321782.

Hoffman D.L., Novak T.P. Bridging the Racial Divide on the Internet. Science, 1998. V. 280. No. 5362. P. 390–391. DOI: 10.1126/science.280.5362.390.

Peter J., Valkenburg P.M. Adolescents' Internet use: Testing the "disappearing digital divide" versus the "emerging digital differentiation" approach. Poetics, 2006. No. 34(4–5). P. 293–305.

Ragnedda M., Kreitem H. The three levels of digital divide in East EU countries. World of Media. Journal of Russian Media and Journalism Studies, 2018. No. 1(4). P. 5–26. DOI: 10.30547/worldofmedia.4.2018.1.

Strover S. Rural Internet Connectivity. Columbia, MO: Rural Policy Research Institute, 1999. P. 99–113.

Tsetsi E., Reins S.A. Smartphone Internet access and use: Extending the digital divide and usage gap. Mobile Media & Communication, 2017. No. 5(3). P. 239–255. DOI: 10.1177/205015791770 8329.

Van Deursen A.J., Helsper E.J. The third-level digital divide: Who benefits most from being online? Communication and information technologies annual. Emerald: Bingley, 2015. No. 10. P. 29–52.

Van Dijk J. The evolution of the digital divide: The digital divide turns to inequality of skills and usage. Digital Enlightenment Yearbook. Amsterdam: IOS Press, 2012. P. 57–75.

Yanovskaya O., Kulagina N., Logacheva N. Digital inequality of Russian regions. Sustainable Development and Engineering Economics, 2022. No. 1. P. 77–98. DOI: 10.48554/SDEE.202 2.1.5.

Zillien N., Hargittai E. Digital distinction: Status-specific types of Internet usage. Social Science Quarterly, 2009. No. 90(2). P. 274–291. DOI: 10.1111/j.1540-6237.2009.00617.

REFERENCES

Arkhipova M.Yu., Sirotin V.P. Regional aspects of the development of information and communication and digital technologies in Russia. The Economy of the Region, 2019. V. 15. Iss. 3. P. 670–683 (in Russian).

Avraamova E.A., Vershinskaya O.N. Home computer as a resource for socio-economic adaptation. Information Society, 2001. No. 5. P. 44–49 (in Russian).

Büchi M., Hargittai E. A need for considering digital inequality when studying social media use and well-being. Social Media + Society, 2022. No. 8(1). DOI: 10.1177/20563051211069125.

Chereshnia O.Yu., Gribok M.V. Methodology for regional assessment of the third level digital inequality. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2022. V. 28. Part 1. P. 43–57 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-43-57.

Drori G.S. Globalization and technology divides: Bifurcation of policy between the "Digital divide" and the "Innovation divide". Sociological Inquiry, 2010. No. 80(1). P. 63–91.

Du H., Zhou N., Cao H., Zhang J., Chen A., King R.B. Economic inequality is associated with lower Internet use: A nationally representative study. Social Indicators Research, 2021. No. 155(3). P. 789–803. DOI: 10.1007/s11205-021-02632-8.

Dudin M.N., Shkodinsky S.V., Usmanov D.I. Assessment of the impact of digital inequality on the level of socio-economic development of the regions of the Russian Federation. Issues of Innovative Economy, 2021. V. 11. No. 3. P. 962–984 (in Russian). DOI: 10.18334/vinec.11.3.113452.

Gladkova A.A., Garifullin V.Z., Rogneda M. Model of three levels of digital inequality: Modern opportunities and limitations (on the example of a study of the Republic of Tatarstan). Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 10. Zhurnalistika (Moscow University Bulletin. Series 10. Journalism), 2019. No. 4. P. 46–56 (in Russian).

Gladkova A., Vartanova E., Ragnedda M. Digital divide and digital capital in multiethnic Russian society. Journal of Multicultural Discourses, 2020. No. 15(2). P. 126–147. DOI: 10.1080/17447143.2020.1745212.

Gómez D. Os três níveis da divisão digital: Barreiras no acesso, na utilização e na utilidade da Internet entre jovens em Espanha (The three levels of the digital division: Barriers in access, use and utility of the Internet among young people in Spain). Interações: Sociedade E As Novas Modernidades, 2018. No. 34. P. 64–91 (in Portuguese). DOI: 10.31211/interacoes.n34.2018.a4.

Grishchenko N. The gap not only closes: Resistance and reverse shifts in the digital divide in Russia. Telecommunications Policy, 2020. V. 44. Iss. 8. DOI: 10.1016/j.telpol.2020.102004.

Gruzdeva M.A. Inclusion of the population in the digital space: Global trends and inequality of Russian regions. Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast. 2020. V. 13. No. 5. P. 90–104 (in Russian). DOI: 10.15838/esc.2020.5.71.5.

Hargittai E., Hinnant A. Digital inequality: Differences in young adults' use of the Internet. Communication Research, 2008. No. 35(5). P. 602–621. DOI: 10.1177/0093650208321782.

Hoffman D.L., Novak T.P. Bridging the racial divide on the Internet. Science, 1998. V. 280. No. 5362. P. 390–391. DOI: 10.1126/science.280.5362.390.

Kvasnikova M.A. Digital inequality and its impact on the socio-economic development of regions in Russia. Socio-political Studies, 2020. No. 1(6). P. 43–58 (in Russian). DOI: 10.20323/2658-428X-2020-1-6-43-58.

Nikolaeva I.V., Ivanov N.Yu. Digital literacy of the population of remote territories of the Russian Federation. Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law, 2020. No. 11(2). P. 295–300 (in Russian).

Peter J., Valkenburg P.M. Adolescents' Internet use: Testing the "disappearing digital divide" versus the "emerging digital differentiation" approach. Poetics, 2006. No. 34(4–5). P. 293–305.

Ragnedda M., Kreitem H. The three levels of digital divide in East EU countries. World of Media. Journal of Russian Media and Journalism Studies, 2018. No. 1(4). P. 5–26. DOI: 10.30547/worldofmedia.4.2018.1.

Strover S. Rural Internet Connectivity. Columbia, MO: Rural Policy Research Institute, 1999. P. 99–113.

Tikunov V.S. Modeling in cartography. Moscow: Moscow University Press, 1997. 405 p. (in Russian).

Tsetsi E., Reins S.A. Smartphone Internet access and use: Extending the digital divide and usage gap. Mobile Media & Communication, 2017. No. 5(3). P. 239–255. DOI: 10.1177/2050157917708329.

Van Deursen A.J., Helsper E.J. The third-level digital divide: Who benefits most from being online? Communication and information technologies annual. Emerald: Bingley, 2015. No. 10. P. 29–52.

Van Dijk J. The evolution of the digital divide: The digital divide turns to inequality of skills and usage. Digital Enlightenment Yearbook. Amsterdam: IOS Press, 2012. P. 57–75.

Yanovskaya O., Kulagina N., Logacheva N. Digital inequality of Russian regions. Sustainable Development and Engineering Economics, 2022. No. 1. P. 77–98. DOI: 10.48554/SDEE.2022.1.5.

Yudina M.A. The impact of digitalization on social inequality. Living Standards of the Population of Regions of Russia, 2020. V. 16. No. 1. P. 97–108 (in Russian). DOI: 10.19181/lsprr.2020.16.1.10.

Zakharov A.L., Sidorova A.V. Information inequality: history and modernity. Questions of Economics and Law, 2016. No. 100. P. 17–21 (in Russian).

Zemtsov S.P., Demidova K.V., Kichaev D.Yu. The spread of the Internet and interregional digital inequality in Russia: trends, factors and the impact of the pandemic. Baltic Region, 2022. V. 14. No. 4. P. 57–78 (in Russian). DOI: 10.5922/2079-8555-2022-4-4.

Zillien N., Hargittai E. Digital distinction: Status-specific types of Internet usage. Social Science Quarterly, 2009. No. 90(2). P. 274–291. DOI: 10.1111/j.1540-6237.2009.00617.

УДК: 528.94+004.9+330+338+332.122+332.146+332.1+001.895+005.591.6

DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-158-173

А.М. Носонов[1], **С.А. Тесленок**[2], **В.А. Чернобровкина**[3], **П.С. Дмитриев**[4]

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИССЛЕДОВАНИИ ИННОВАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ РЕГИОНОВ РОССИИ

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена использованию геоинформационных систем и технологий для исследования территориальной организации инновационной деятельности в регионах России. Главное внимание уделено выявлению и анализу пространственных закономерностей локализации основных компонентов инновационной инфраструктуры — инновационных территориальных кластеров и технопарков. Рассмотрены такие аспекты их функционирования, как организационно-правовой статус, количество, число участников и количество занятых. Выявлена значительная неравномерность в размещении этих объектов технико-технологической инфраструктуры. Наиболее развита инновационная инфраструктура в крупных агломерациях Европейской России. Это обусловлено высоким уровнем социально-экономического развития, существенной диверсификацией экономики, наличие большого количества научных учреждений и университетов, высокая концентрация инновационно-активных предприятий и главных рынков инновационных товаров и услуг. Использование ГИС-технологий является эффективным методом выявления и анализа пространственных закономерностей в функционировании важных объектов производственно-технологической инфраструктуры (технопарков и инновационных территориальных кластеров) с точки зрения их динамики, организационно-правового статуса, численности занятых, а также методом определения перспектив развития этих объектов инновационной инфраструктуры. Результаты исследования, полученные на основе анализа пространственных данных по инновационной деятельности в регионах России, необходимы организациям и лицам, принимающим решения для формирования региональной и федеральной политики, направленной на достижение страной лидерства в отдельных высокотехнологичных отраслях производства. Конечным результатом проведения эффективной инновационной политики является повышение качества жизни населения страны. Дальнейшее формирование инновационной инфраструктуры должно быть основано на разработке эффективной маркетинговой стратегии коммерциализации инноваций, совершенствования системы образования и диверсификации всех компонентов инновационной инфраструктуры. Геоинформационные технологии являются наиболее результативным средством выявления

[1] Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева, Институт геоинформационных технологий и географии, ул. Большевистская, д. 68, Саранск, Республика Мордовия, Россия, 430005, *e-mail:* **artno@mail.ru**

[2] Югорский государственный университет, Высшая экологическая школа, ул. Чехова, д. 16, Ханты-Мансийск, Ханты-Мансийский автономный округ — Югра, Россия, 628012; Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева, Институт геоинформационных технологий и географии, ул. Большевистская, д. 68, Саранск, Республика Мордовия, Россия, 430005, *e-mail:* **teslserg@mail.ru**

[3] Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева, Институт геоинформационных технологий и географии, ул. Большевистская, д. 68, Саранск, Республика Мордовия, Россия, 430005, *e-mail:* **vartno@mail.ru**

[4] Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева, Факультет математики и естественных наук, ул. Пушкина, д. 86, Петропавловск, Республика Казахстан, 150000, *e-mail:* **dmitriev_pavel@mail.ru**

уровня диверсификации инновационной инфраструктуры в силу возможности наглядно визуализировать уровень концентрации различных инфраструктурных объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геоинформационные системы, технопарк, инновационный территориальный кластер, инновационная инфраструктура

Arthur M. Nosonov[1], **Sergey A. Teslenok**[2], **Valeria A. Chernobrovkina**[3], **Pavel S. Dmitriyev**[4]

GEOINFORMATION TECHNOLOGIES IN THE STUDY OF INNOVATIVE INFRASTRUCTURE OF THE REGIONS OF RUSSIA

ABSTRACT

The article is devoted to the use of geoinformation systems and technologies to study the territorial organization of innovative activities in the regions of Russia. The main attention is paid to the identification and analysis of spatial patterns of localization of the main components of the innovative infrastructure — innovative territorial clusters and technology parks. Such aspects of their functioning as organizational and legal status, overall quantity, quantity of participants and number of employees are considered. Significant unevenness in the placement of these objects of technical and technological infrastructure has been revealed. The most developed innovative infrastructure is in large agglomerations of European Russia. This is due to the high level of socio-economic development, significant diversification of the economy, the presence of a large number of scientific institutions and universities, a high concentration of innovative enterprises and main markets for innovative goods and services. The use of GIS technologies is an effective method for identifying and analyzing the spatial patterns of the functioning of important objects of industrial and technological infrastructure (technoparks and innovative territorial clusters) in terms of their dynamics, organizational and legal status, the number of employees and determining the prospects for the development of these objects of innovative infrastructure. The results of the study, obtained on the basis of the analysis of spatial data on innovation activity in the regions of Russia, are necessary for organizations and decision makers to form regional and federal policies aimed at achieving the country's leadership in certain high-tech industries. The end result of an effective innovation policy is to improve the quality of life of the country's population. Further formation of the innovation infrastructure should be based on the development of an effective marketing strategy for the commercialization of innovations, improvement of the education system and diversification of all components of the innovative infrastructure. Geo-information technologies are the most effective means of identifying the level of diversification of innovative infrastructure due to the ability to visualize the level of concentration of various infrastructure facilities.

KEYWORDS: geoinformation systems, technopark, innovative territorial cluster, innovative infrastructure

[1] National Research N.P. Ogarev Mordovia State University, Institute of Geoinformation Technologies and Geography, 68, Bolshevistskaya str., Saransk, Republic of Mordovia, 430005, Russia, *e-mail:* **artno@mail.ru**

[2] Ugra State University, Higher Ecological School, 16, Chekhova str., Khanty-Mansiysk, Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug — Yugra, 628012, Russia; National Research N.P. Ogarev Mordovia State University, Institute of Geoinformation Technologies and Geography, 68, Bolshevistskaya str., Saransk, Republic of Mordovia, 430005, Russia, *e-mail:* **teslserg@mail.ru**

[3] National Research N.P. Ogarev Mordovia State University, Institute of Geoinformation Technologies and Geography, 68, Bolshevistskaya str., Saransk, Republic of Mordovia, 430005, Russia, *e-mail:* **vartno@mail.ru**

[4] Kozybayev University, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, 86, Pushkin Street, Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan, *e-mail:* **dmitriev_pavel@mail.ru**

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие России основано на приоритетном развитии высокотехнологичных отраслей производства и соответствующей инфраструктуры как предпосылки достижения технико-технологического лидерства в мировой экономике. Инновационное развитие страны во многом зависит от успешности научно-технологической политики на региональном уровне [Синергия пространства…, 2012; *Рыбалкин, Сутырина*, 2013; *Schumpeter,* 2003]. Главным направлением модернизации экономики России является генерация новых знаний как основы коммерциализации результатов интеллектуальной деятельности и распространение достижений научно-технического прогресса во всех отраслях общественной деятельности [*Королева, Кандрашкина,* 2014; *Бабурин, Земцов*, 2017; *Макар, Носонов,* 2017]. Только на этой основе возможно достичь конкурентоспособности страны и обеспечить ее дальнейшее устойчивое развитие, главным критерием которого является повышение качества жизни населения.

Наиболее эффективными компонентами инновационной инфраструктуры являются научные и промышленные технопарки и инновационные территориальные кластеры. Они служат центрами генерации новых знаний, коммерциализации и диффузии инноваций в другие регионы страны [*Теребова,* 2014; *Тесленок* и др., *Тесленок*, 2014; *Romer,* 2015]. Поэтому выявление пространственных закономерностей функционирования и развития этих объектов научно-производственной инфраструктуры с использованием ГИС-технологий является необходимой основой разработки федеральной и региональной инновационной политики [*Баринова* и др., 2015; *Torrisi,* 2009; *Scranton,* 2019; *Sunny, Shu,* 2019]. ГИС-технологии позволяют определить и визуализировать особенности специализации и эффективность функционирования инновационных территориальных кластеров как базиса дальнейшего формирования экономики России преимущественно на основе высокотехнологичных производств. Уровень концентрации и диверсификация объектов технико-технологической инфраструктуры является важной предпосылкой инновационного развития регионов, оказывая мультипликативное воздействие на развитие других отраслей всех секторов экономики [*Баринова* и др., 2014; *Tassey,* 2008; *Wang* et al., 2010; *Audretsch* et al., 2015]. Инфраструктурные факторы инновационного развития во многом определяют общий уровень социально-экономического развития субъектов Российской Федерации. Как правило, регионы, наиболее насыщенные инновационными инфраструктурными компонентами (Москва, Санкт-Петербург, республики Башкортостан и Татарстан), отличаются значительными показателями валового регионального продукта и высоким качеством жизни населения.

Цель исследования заключается в использовании ГИС-технологий для выявления и анализа пространственных закономерностей функционирования важных объектов производственно-технологической инфраструктуры (технопарков и инновационных территориальных кластеров) с точки зрения их динамики, организационно-правового статуса и численности занятых, а также определение перспектив развития этих объектов инновационной инфраструктуры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В современных исследованиях не сложилось однозначного определения понятия «инновационная инфраструктура» [*Соколов, Томилина,* 2016; *Goncalves, Peuckert,* 2011]. В законодательных актах представлено предельно широкое определение этого вида инфраструктуры как совокупность объектов, организаций, предприятий и институтов, функция которых заключается в обеспечении инновационной деятельности. В научных публикациях инновационная инфраструктура определяется как составная часть национальной инновационной системы, включающая объекты, выполняющие функцию

доступа к тем видам ресурсов, которые необходимы для реализации инновационных проектов [*Бабурин, Земцов,* 2017; *Feldman,* 2005; *Birudavolu, Nag,* 2018]. В отдельных публикациях указывается присутствие в составе инновационной инфраструктуре системы управления (федеральной и региональной).

Обобщение различных определений понятия инновационной инфраструктуры позволил предложить следующий вариант данного термина. Инновационная инфраструктура — это целостная система технико-технологических объектов, информационных технологий, научных учреждений и образовательных организаций, финансовых учреждений, главная функция которых заключается в создании инноваций, их коммерциализации, вывода на рынок высокотехнологичной продукции и внедрения в реальные сектора экономики, что является необходимым условием национального и регионального инновационного развития, объединенных общими механизмами управления. Инфраструктурные объекты обеспечивают субъектам инноваций финансирование инновационных проектов, предоставляют в пользование офисы и рабочие площадки, высокотехнологичные приборы и оборудование и другой инструментарий для проведения исследований и разработок инновационного характера.

В статье главное внимание уделено выявлению пространственных закономерностей территориальной дифференциации объектов производственно-технологической инфраструктуры — инновационных территориальных кластеров и технопарков, которые вносят решающий вклад в создание, коммерциализацию и диффузию инноваций [*Тесленок* и др., 2014]. Большое значение при анализе инновационного развития регионов России имеют теоретико-методологические работы, которые посвящены методам исследования инновационного потенциала, выявлению и изучению пространственно-временных закономерностей и особенностей инновационных процессов [*Бабурин, Земцов,* 2017].

Особое внимание в современных публикациях уделяется особенностям формирования инновационных территориальный кластеров, направлениям перетоков научных знаний, проблеме развития образования в области управления инновационными проектами. В ряде работ обобщаются результаты функционирования и развития зарубежных и российских инфраструктурных объектов, анализируются территориальные различия и эффективность инновационной деятельности в европейских странах и регионах, исследуются наиболее эффективные технопарки и региональные инновационные кластеры в Северной Америке, Европе и Восточной Азии [Синергия пространства…, 2012]. В большинстве отечественных и зарубежных публикаций инфраструктурные компоненты рассматриваются как главные факторы социально-экономического развития, лидерства в области высоких технологий, обеспечивающие повышение качества жизни населения стран [*Михайлов* и др., 2012; Синергия пространства…, 2012; *Куценко* и др., 2017; *Audretsch* et al., 2015; *Romer* 2015; *Kutsenko* et al., 2017; *Scranton,* 2019]. Значительная часть научных работ посвящена проблеме функционирования и развития инновационных территориальных кластеров в экономически развитых странах Европы и Америки и их роли как средства региональной политики для выравнивания внутригосударственных территориальных различий в уровне социально-экономического развития [Синергия пространства…, 2012; *Cooke,* 2002; *Moreno* et al., 2006; *Sunny, Shu,* 2019]. В отечественных работах по исследованию кластерной политики выявляются актуальные тенденции формирования и развития кластеров на примере приморских регионов Европейской России под влиянием взаимовлияния инновационного, приморского и агломерационного факторов. Подчеркивается инновационная специализация приморских кластеров, обеспечивающих решение проблемы импортозамещения [*Михайлов* и др., 2020]. В других отечественных публикациях дается системный анализ кластерной политики в России на начальном этапе ее реализации и выявлены преимущества кластерного подхода перед другими формами организации производства [*Куценко* и др., 2017].

В большинстве современных исследований национальной и региональной инновационных систем и роли инфраструктуры в ее формировании и развитии наибольшее внимание уделяется решению следующих проблем:

- теоретико-методологические основы исследования инновационной инфраструктуры как междисциплинарного научного направления, включая определения этого термина [*Бабурин, Земцов,* 2017; *Caiazza* et al., 2015; *Miguelez, Moreno,* 2018; *Hasan* et al., 2018];
- роль отдельных компонентов инновационной инфраструктуры в диффузии инноваций и перетоков знаний как основы социально-экономического развития стран и регионов [Рейтинг инновационного развития, 2017; Рейтинг инновационных регионов, 2018; *Moreno* et al., 2006];
- анализ структуры и эффективности функционирования производственно-технологической инновационной инфраструктуры в разных странах и регионах [*Cooke,* 2002; *Martin* et al., 2015*; Scholl, Brenner,* 2016].

Результатом исследования было создание первого варианта специализированной геоинформационной системы (ГИС) «Технопарки и инновационные территориальные кластеры России» с целью последующего проведения ГИС-картографирования характеристик географического распределения основных характеристик этих объектов производственно-технологической инфраструктуры. Объектом ГИС-проекта являются территориальные образования в разрезе субъектов Российской Федерации, предметом — качественная и количественная оценка основных параметров развития технопарков и инновационных территориальных кластеров. Для оценки уровня инновационного развития регионов использованы результаты рейтинга регионов России, представленные Высшей школой экономики [Рейтинг инновационного развития, 2017] и Ассоциацией инновационных регионов России (АИРР) [Рейтинг инновационных регионов, 2018], материалы сайтов Ассоциации кластеров, технопарков и ОЭЗ России и «Карта кластеров России»[1]. Состав и основные характеристики субъектов производственно-технологической инфраструктуры представлены на сайте «Инновации России» и исследованиях ассоциации кластеров и технопарков России. Данная ассоциация ежегодно осуществляет рейтинг технопарков России для выявления эффективности управления технопарками и оценки работы резидентов технопарков.

Дополнительная информация получена на сайтах Министерства экономического развития России, Министерства промышленности и торговли Российской Федерации, крупных технопарков и инновационных территориальных кластеров России. Эти данные отражают специализацию, показатели результативности инновационной деятельности, количественные показатели функционирования объектов инновационной инфраструктуры. Статистическая информационная основа исследования представлена материалами Федеральной службы государственной статистики, Высшей школы экономики, Ассоциации инновационных регионов в виде федеральных и региональных нормативно-правовых актов, регламентирующих инновационную деятельность.

На начальном этапе исследования были созданы базы данных пространственной дифференциации основных компонентов инновационной инфраструктуры: технопарков, инновационных территориальных кластеров, инжиниринговых центров, особых экономических зон внедренческого типа, центров трансфера технологий, бизнес-инкубаторов, центров коллективного пользования, технологических платформ. После получения соответствующих баз данных из статистических источников осуществлено

[1] Карта кластеров России. Электронный ресурс: https://map.cluster.hse.ru/ (дата обращения 18.01.2023).

создание электронных баз данных специализированной ГИС «Технопарки и инновационные территориальные кластеры России» и проведены работы по проектированию их возможных вариантов и разработке их структуры на основе целевой ГИС-программы ArcGIS компании ESRI. Был создан соответствующий геоинформационный проект в ГИС-программе ArcGIS путем формирования спроектированных векторных слоев по регионам России, а также осуществлена общая настройка проекта и настройка его отдельных векторных слоев, в атрибутивных таблицах отражены поля с определенными ранее технологическими параметрами.

На следующем этапе исследований были спроектированы, реализованы, рассмотрены и проанализированы различные варианты картографической визуализации информации сформированных баз данных специализированной ГИС «Технопарки и инновационные территориальные кластеры». Пространственная географическая информация в форме цифровой информации ГИС использована для ее визуализации на основе их программных средств двумя традиционными способами: в виде электронной карты, отображаемой на видеоэкране монитора компьютера и компьютерной карты, предназначенной для вывода на принтер или плоттер. В результате реализации ГИС-проекта были подготовлены различные варианты созданной серии электронных и компьютерных карт на основе имеющихся пространственных баз данных. Синтетическим результатом реализации данного геоинформационного проекта явилась покомпонентная и интегральная типология регионов России по уровню развития инновационной производственно-технологической инфраструктуры.

Для визуализации полученных результатов использованы геоинформационные технологии. Дифференциация количественных параметров в базовой ГИС ArcGIS предусматривают четыре варианта автоматического ранжирования географических объектов при помощи цветовой шкалы — равномерных интервалов, квантилей, естественных границ, стандартных отклонений — по числовым атрибутам используемого показателя [MapInfo Professional, 2004; *Earls, Dixon,* 2007]. Кроме того, предусмотрено определение и разбиение границ на основе экспертного заключения пользователя. Во всех подходах ранжирования количественных показателей предусмотрена последовательность цветов шкалы легенды от минимального к максимальному путем увеличения интенсивности оттенков одного цвета. В данном исследовании экспертный подход использовался для определения границ между показателями.

Для картографирования уровня организационного развития и специализации территориальных технологических кластеров в регионах России был применен совмещенный способ картограммы и локализованных структурных диаграмм [MapInfo Professional, 2004]. Первый визуализировал показатель уровня организационного развития кластеров с их распределением по 5 группам (низкий; низкий и средний; средний; средний и высокий; высокий) и группой регионов с отсутствием кластеров. Второй отражает специализацию кластеров по 12 группам (аэрокосмическая промышленность; информационно-коммуникационные технологии; микроэлектроника и приборостроение; новые материалы; оборонная промышленность; производство среднетехнологичной продукции машиностроения; отрасли АПК; туризм; фармацевтика и биотехнологии; ядерные и радиационные технологии; лесная промышленность; прочие отрасли). Символ круговой диаграммы показывает все уникальные категории, связанные с объектом, соответствующим местоположению субъекта, а цвет сектора, отвечающий той или иной специализации, выбирается из палитры или вручную вводится его шестнадцатеричное значение.

На основе применения возможностей целевой ГИС-программы ArcGIS в разработанном специализированном ГИС-проекте «Технопарки и инновационные территориальные кластеры России» создана серия аналитических карт, отражающих и

визуализирующих различные аспекты функционирования технопарков и технологических кластеров в разрезе регионов Российской Федерации: распределение технопарков по регионам России; количество территориальных кластеров; количество участников территориальных кластеров; численность работников территориальных кластеров; уровень организационного развития территориальных кластеров; ключевая специализация территориальных кластеров; статус территориальных кластеров; год создания территориальных кластеров.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ГИС «Технопарки и инновационные территориальные кластеры России» исследованы технопарки, которые являются важным компонентом производственно-технологической инфраструктуры, обеспечивающим инновационное развитие страны. Технопарк представляет собой особую локализованную территорию с определенным организационно-правовым статусом. Главная функция этой территории заключается в поддержке высокотехнологичных отраслей экономики, инновационного бизнеса; она имеет свою специализацию (реже встречаются многоотраслевые технопарки). В пределах этой территории имеется возможность льготного использования офисов, современных лабораторий, сборочных площадок, складов, цехов для экспериментального производства и создания полезных моделей и прототипов изобретений [*Соколов, Томилина,* 2016; *Макар, Носонов,* 2017*; Torrisi,* 2009; *Goncalves, Peuckert,* 2011; *Hasan* et al., 2018].

В мире имеется более 700 крупных технопарков, большая часть которых функционирует в Северной Америке, Восточной Азии и Западной Европе. Первым технопарком в соответствие с современным определением этого понятия можно считать Сибирский академгородок в Новосибирске, который возник еще в середине 50-х гг. XX в. В современной России первые технопарки начали создаваться в 1990-х гг. Они возникли на базе ведущих университетов страны: МГУ имени М.В. Ломоносова, Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, МИФИ, Уфимского государственного авиационного технического университета, Саратовского государственного технического университета, Нижегородского государственного технического университета [Синергия пространства, 2012; *Соколов, Томилина,* 2016; *Макар, Носонов,* 2017]. В дальнейшем стремительный рост количества технопарков наблюдался, начиная с 2006 г. (рис. 1), после выхода соответствующих нормативно-правовых актов.

В России функционирует около 150 технопарков в 45 регионах России. Наибольшее число технопарков в расчете на 1 млн населения сформировалось в регионах с наиболее благоприятными факторами инновационной деятельности — высоким уровнем социально-экономического развития, значительным научно-техническим потенциалом, выгодным экономико-географическим положением, исторически унаследованной технологической инфраструктурой и др. В соответствии с этим наибольшее число технопарков находятся в г. Москве и Московской обл., Свердловской обл., г. Санкт-Петербурге и Республике Татарстан — от 9 до 20 единиц [*Макар, Носонов,* 2017]. Число технопарков в расчете на 1 млн населения наивысшее в Калужской, Свердловской, Курганской, Астраханской, Ульяновской обл., в республиках Татарстан, Башкортостан, Мордовия, Саха (Якутия) — более 2 единиц (рис. 1). Больше половины технопарков принадлежат частным собственникам, около трети — государству и десятая часть имеют смешанную форму собственности. Площадь, занимаемая технопарками, составляет около 1 500 га, количество зарегистрированных резидентов — около 5 тыс. организаций, совокупная выручка резидентов технопарков в 2020 г. превышала 250 млрд руб., количество патентов на изобретения, полезные модели и программные продукты, зарегистрированных резидентами технопарков — более 1 тыс. единиц.

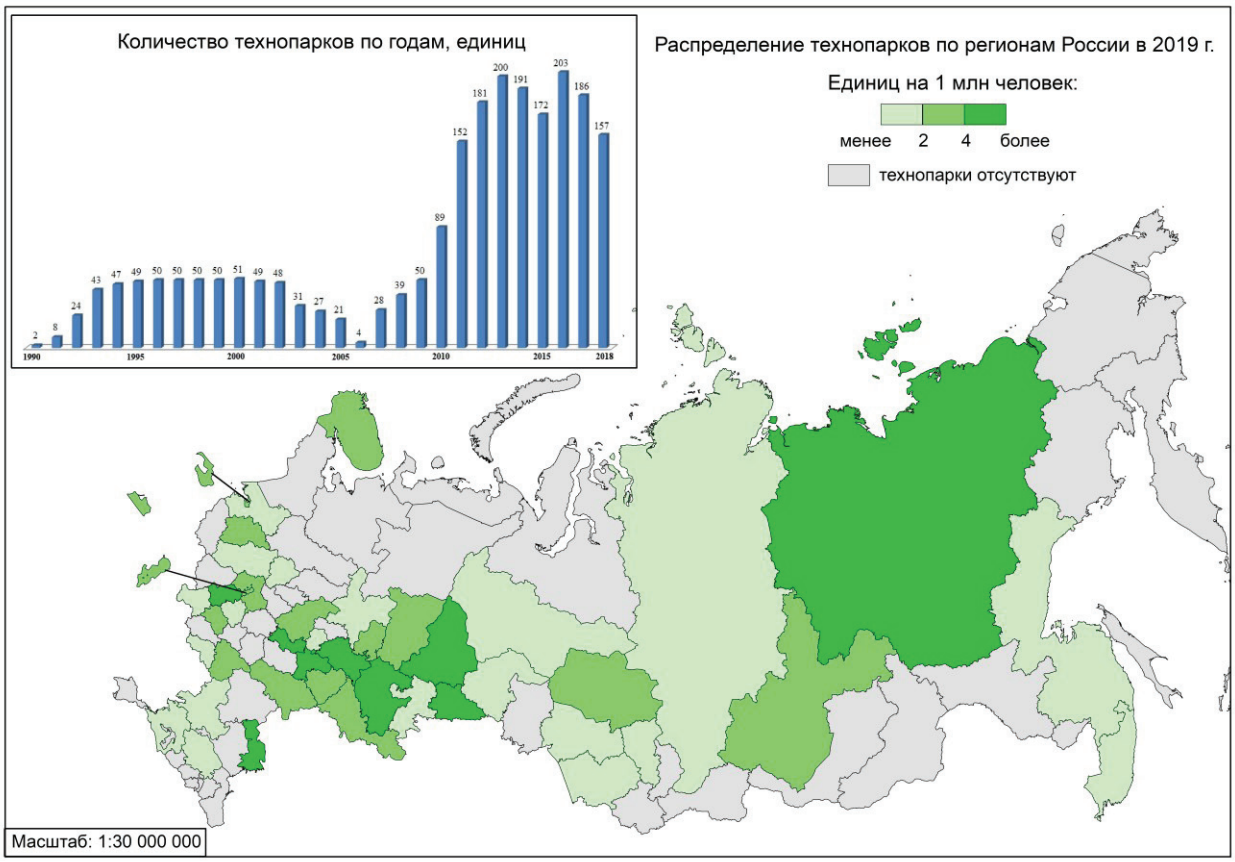


Рис. 1. Количество технопарков в регионах России в 2019 г., единиц на 1 млн населения
Fig. 1. Distribution of technoparks by regions of Russia in 2019, units per 1 million population

Понятие «инновационный территориальный кластер» появилось лишь в 1970-х гг. Они получили широкое развитие в Западной Европе (более 50 % занятых в экономике и науке, большая часть патентов) и в США (около 35 % занятых в экономике и науке, половина доходов и более 90 % объектов интеллектуальной собственности). В России кластерные инициативы начали реализовываться с середины 90-х гг. XX в. Основными структурами, осуществляющими кластерную политику в России, являются федеральные органы власти — Министерство экономического развития России, Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. Кроме того, в ряде регионов России функционируют центры кластерного развития.

Организационное оформление инновационные территориальные кластеры получили в 2012 г. в рамках программы поддержки пилотных инновационных территориальных кластеров. На конкурсной основе из 94 заявок было отобрано 25 заявок на статус «пилотный инновационный территориальный кластер». В настоящее время их количество расширено до 27 (рис. 2). В России к 2020 г. создано более 100 кластеров в 46 регионах страны, в т. ч. 6 межрегиональных кластеров. В 39 регионах России инновационные территориальные кластеры отсутствуют. Наряду с пилотными инновационными территориальными кластерами существуют следующие виды федеральной поддержки кластерных структур: поддержка центром кластерного развития в рамках программы Минэкономразвития России по поддержке малого и среднего предпринимательства и включение в перечень промышленных кластеров, утверждаемый Минпромторгом России (рис. 2). Незначительная часть кластеров поддерживается только региональными органами

власти. Наибольшее количество кластеров размещено в регионах, которые отличаются высоким уровнем инновационного развития и значительным научно-техническим и производственным потенциалом: г. Санкт-Петербурге, г. Москве, Ростовской обл., Республике Татарстан, Алтайском крае и Воронежской обл. В Волгоградской, Томской, Омской, Брянской, Смоленской, Московской, Пензенской, Липецкой, Новгородской, Рязанской обл. и Пермском крае создано от 3 до 4 инновационных территориальных кластеров. В 18 регионах России расположено по 1, в 9 субъектах Российской Федерации по 2 кластера. Большая часть кластеров находится на начальной стадии формирования, пятая часть кластеров имеет средний уровень развития и лишь 10 % — высокий (рис. 2). Это свидетельствует, что в большинстве инновационных территориальных кластеров отсутствуют устойчивые производственные, технико-технологические, научные связи между субъектами кластеров либо они носят эпизодической, стохастический характер.

В функционировании кластеров участвуют около 4 тыс. инновационных предприятий, технопарков, научных и образовательных организаций. В большинстве регионов России количество субъектов инновационной деятельности, которые входят в состав кластерных структур, составляет нескольких десятков (от 1 до 100). Наибольшая территориальная концентрация участников кластеров отмечается в Республике Татарстан (более 500), г. Санкт-Петербурге (около 300), г. Москве, Новосибирской обл., Республике Башкортостан (более 200) (рис. 2).

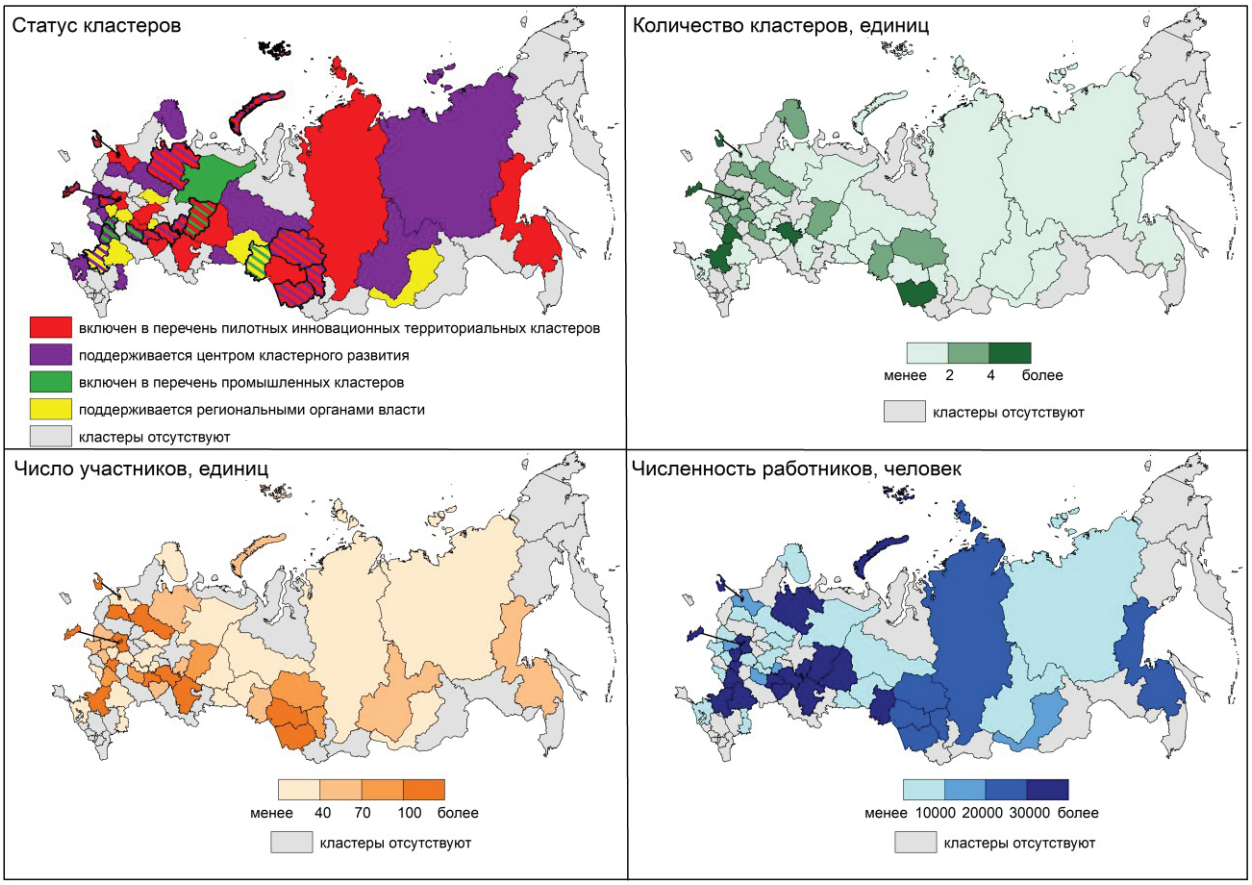


Рис. 2. Основные показатели по инновационным территориальным кластерам
Fig. 2. Main indicators for innovative territorial clusters

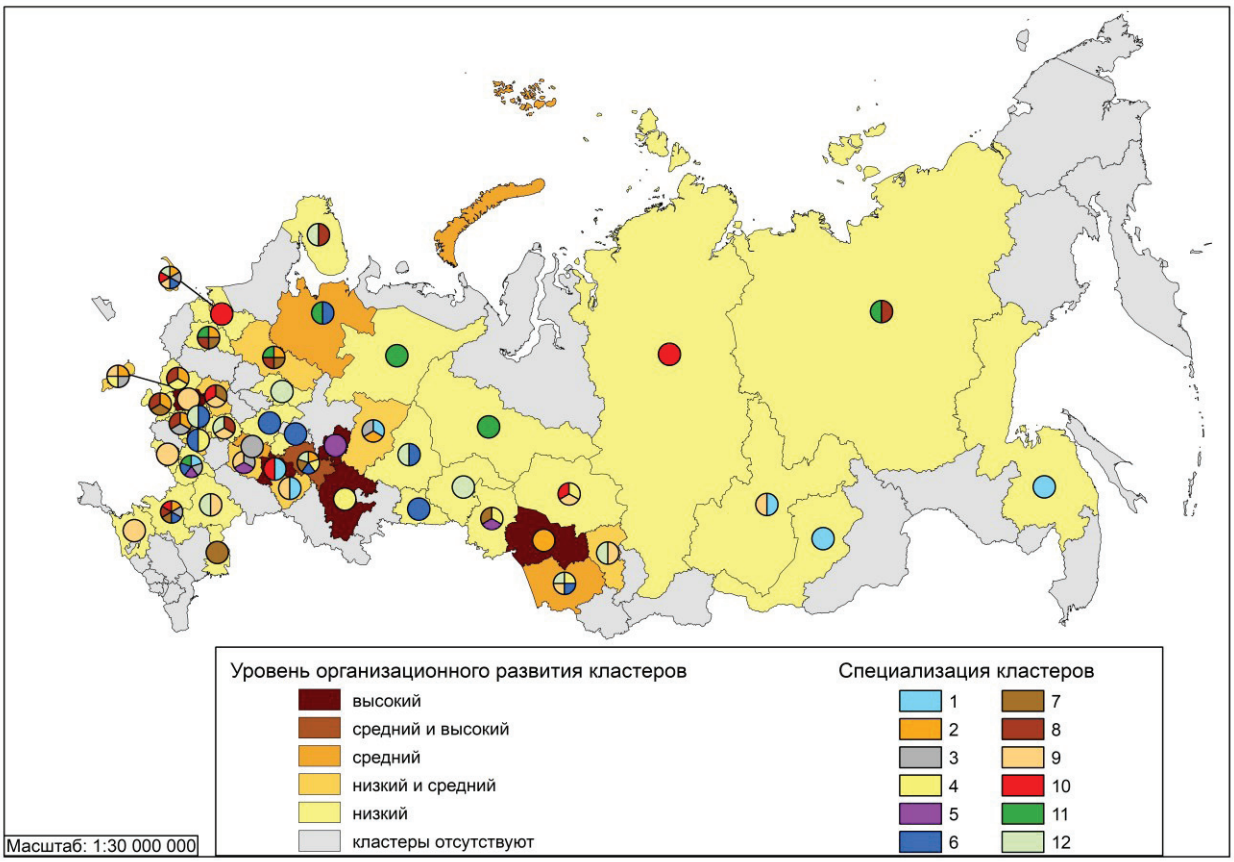


Рис. 3. Уровень организационного развития и специализация кластеров в регионах России. Специализация кластеров: 1 — аэрокосмическая промышленность; 2 — информационно-коммуникационные технологии; 3 — микроэлектроника и приборостроение; 4 — новые материалы; 5 — оборонная промышленность; 6 — автомобилестроение; 7 — производство пищевых продуктов; 8 — туризм; 9 — фармацевтика; 10 — ядерные и радиационные технологии; 11 — лесная промышленность; 12 — энергетика

Fig. 3. The level of organizational development and specialization of clusters in the regions of Russia. Cluster specialization: 1 — aerospace industry; 2 — information and communication technologies; 3 — microelectronics and instrumentation; 4 — new materials; 5 — defense industry; 6 — automotive industry; 7 — food production; 8 — tourism; 9 — pharmaceuticals; 10 — nuclear and radiation technologies; 11 — forestry industry; 12 — energy industry

Общая численность работников кластеров — около 1,5 млн чел. Это более 2 % занятых в экономике. Распределение их по регионам России крайне неравномерно. В преобладающем количестве кластеров насчитывается менее 1 тыс. работников. Наибольшее их количество сосредоточено в Татарстане (более 200 тыс. чел.), Москве, Санкт-Петербурге (более 100 тыс. чел.) (рис. 2). Самые крупные по числу занятых — это кластеры в оборонной и космической промышленности (Самарский аэрокосмический кластер, Удмуртский машиностроительный кластер, Инновационный территориальный кластер «Технополис «Новый Звездный»») — более 155 тыс. чел., автомобилестроении (Камский инновационный кластер, Татарстан) — более 150 тыс. чел., фармацевтика (Инновационный территориальный кластер «ФИЗТЕХ XXI», Волгоградский фармацевтический кластер, Томский фармацевтический кластер и др.) — около 150 тыс. чел., судостроении (Архангельский инновационный кластер, Композитный кластер Санкт-Петербурга) — более 50 тыс. чел.

Инновационные территориальные кластеры представлены большим набором отраслей специализации[1] (рис. 3).

Специализация формируется под воздействием следующих факторов: наличие отдельных видов природных ресурсов (отрасли АПК, лесная, нефтяная, газовая промышленность, туризм), наличие высококвалифицированных трудовых ресурсов (аэрокосмическая промышленность, микроэлектроника, приборостроение, отрасли оборонно-промышленного комплекса, фармацевтика). На государственном уровне приоритетное развитие получили кластеры, специализирующиеся на производстве высокотехнологичных отраслях экономики, в которых Россия отстает от мировых лидеров: микроэлектроника и точное приборостроение, фармацевтика и биотехнологии, производство нано- и композитных материалов, производство среднетехнологичной продукции машиностроения и информационно-коммуникационных технологиях. Достаточно большое значение приобретают туристские инновации, что обусловлено необходимостью более активного освоения огромного внутреннего рекреационного рынка. Благодаря значительному количеству инноваций в отраслях АПК обеспечивается поддержание и укрепление высокого уровня обеспечения продовольственной безопасности страны.

ВЫВОДЫ

Результаты исследования главных компонентов инновационной инфраструктуры на основе использования ГИС-технологий позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Инновационная технико-технологическая инфраструктура является одним из важнейших факторов социально-экономического развития регионов России. Геоинформационные системы являются эффективным методом выявления и анализа пространственных закономерностей функционирования важных объектов производственно-технологической инфраструктуры с точки зрения их динамики, организационно-правового статуса, численности занятых и определения перспектив развития этих объектов инновационной инфраструктуры.
2. Благоприятными условиями создания и формирования региональных инновационных кластеров являются высокий уровень социально-экономического развития, насыщенность и диверсификация объектов технико-технологической инфраструктуры, степень инновационной активности промышленных предприятий, научный и образовательный потенциал региона, высокая квалификация трудовых ресурсов. Характерна большая пространственная неравномерность размещения территориальных инновационных кластеров. Большинство их сосредоточено на территории Европейской России, где наблюдаются наилучшая обеспеченность всеми компонентами инновационной инфраструктуры и высокий уровень развития информационных технологий.
3. Организационное оформление и формирование инновационных территориальных кластеров произошло в России значительно позже, чем в экономически развитых странах мира. Только в 2012 г. в рамках программы поддержки пилотных инновационных территориальных кластеров были созданы первые 25 кластеров. В дальнейшем отмечаются одни из самых высоких темпов кластеризации экономики в мире. В соответствие с компонентом кластерной концентрации Глобального инновационного индекса в 2018 г. Россия занимала 101-е место, в 2020 г. — 85-е, а в 2022 г. уже 54-е. Наряду с пилотными инновационными территориальными кластерами существуют следующие виды федеральной поддержки кластерных

[1] Карта кластеров России. Электронный ресурс: https://map.cluster.hse.ru/ (дата обращения 18.02.2023).

структур: поддержка центром кластерного развития в рамках программы Минэкономразвития России по поддержке малого и среднего предпринимательства и включение в перечень промышленных кластеров, утверждаемый Минпромторгом России. Незначительная часть кластеров поддерживается только региональными органами власти.

4. Главной проблемой формирования развития инновационных территориальных кластеров является низкий уровень коммерциализации инноваций и их устаревание в процессе значительной протяженности внедрения в производство. В результате этого новые техника и технологии уже не соответствуют уровню решаемых материально-технических задач. Количество используемых передовых технологий во всех регионах страны значительно ниже числа разрабатываемых инновационных технологий, что свидетельствует о сильной акцепторности российской экономики, т. е. существенном преобладании используемых передовых производственных технологий над созданными в регионе инновациями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бабурин В.Л., Земцов С.П. Инновационный потенциал регионов России. М.: Университетская книга, 2017. 358 с.

Баринова В.А., Земцов С.П., Спивак В.В., Сутырина Т.А. Региональная инновационная система Иркутской области. М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. 232 с.

Баринова В.А., Мальцева А.А., Сорокина А.В., Еремкин В.А. Подходы к оценке эффективности функционирования объектов инновационной инфраструктуры в России. Инновации, 2014. № 3. С. 42–51.

Королева Л.П., Кандрашкина М.А. Инновационная инфраструктура: сущность и тенденции развития в Республике Мордовия. Системное управление, 2014. Вып. 3 (24). Электронный ресурс: http://sisupr.mrsu.ru/2014-3/PDF/Koroleva_L_P_Kandraskina_M_A.pdf (дата обращения 09.03.2023).

Куценко Е.С., Абашкин В.Л., Фияксель Э.А., Исланкина Е.А. Десять лет кластерной политики в России: логика ведомственных подходов. Инновации, 2017. № 12 (230). С. 46–58.

Макар С.В., Носонов А.М. Оценка и пространственные закономерности развития инновационной деятельности в регионах России. Экономика. Налоги. Право, 2017. Т. 10. С. 96–106. DOI: 10.26794/1999-849X-2017-10-4-96-106.

Михайлов А.С., Горочная В.В., Михайлова А.А., Плотникова А.П., Вольхин Д.А. Кластеры приморских регионов европейской части России. Географический вестник, 2020. № 4 (55). С. 81–96. DOI: 10.17072/2079-7877-2020-4-81-96.

Михайлов А.С., Михайлова А.А. О возможностях российского участия в формировании трансграничных инновационных кластеров на Балтике. Экономика, управление, финансы: Материалы II Междунар. науч. конф. Пермь, 2012. С. 171–178. DOI:10.13140/2.1.4800.8007.

Рейтинг инновационного развития субъектов Российской Федерации. Вып. 5. М.: Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики», 2017. 260 с.

Рейтинг инновационных регионов России Ассоциации инновационных регионов России. М.: АИРР, 2018. 54 с.

Рыбалкин В.В., Сутырина Т.А. Стратегия инновационного развития российских регионов. М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2013. 316 с.

Синергия пространства: региональные инновационные системы, кластеры и перетоки знания. Смоленск: Ойкумена, 2012. 760 с.

Соколов Д.С., Томилина Н.С. Инновационная инфраструктура в современной России: понятие, содержание, особенности. Инновационная наука, 2016. № 1. С. 172–177.

Теребова С.В. Инновационная инфраструктура в регионе: проблемы и направления развития. Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз, 2014. № 6 (36). С. 199–212. DOI: 10.15838/esc/2014.6.36.15.

Тесленок С.А., Носонов А.М., Тесленок К.С. Геоинформационное моделирование диффузии инноваций. ИнтерКарто/ИнтерГИС-20: Устойчивое развитие территорий: картографо-геоинформационное обеспечение. М., 2014. С. 159–169.

Audretsch D.B., Heger D., Veith T. Infrastructure and entrepreneurship. Small Business Economics, 2015. No. 44 (2). P. 219–230. DOI: 10.1007/s11187-014-9600-6.

Birudavolu S., Nag B. Regional factors influencing innovation. Business Innovation and ICT Strategies, 2018. P. 211–238. DOI: 10.1007/978-981-13-1675-3_8.

Caiazza R., Richardson A., Audretsch D.J. Knowledge effects on competitiveness: from firms to regional advantage. The Journal of Technology Transfer, 2015. V. 40. Iss. 6. P. 899–909. DOI: 10.1007/s10961-015-9425-8.

Cooke P. Biotechnology clusters as regional, sectoral innovation systems. International Regional Science Review, 2002. V. 25. No. 2. P. 8–37. DOI: 10.1177/0160017602 02500102.

Earls J., Dixon B. Spatial interpolation of rainfall data using ArcGIS: A comparative study. Proceedings of the 27th Annual ESRI International User Conference, 2007. V. 31. P. 1–9.

Feldman M.P. The new economics of innovation, spillovers and agglomeration: A review of empirical studies. Economics of innovation and new technology, 1999. No. 8(1−2). V. 8. P. 5–25. DOI: 10.1080/10438599900000002.

Goncalves J., Peuckert J. Measuring the impacts of quality infrastructure: Impact theory, empirics and study design. PTB Guide. Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2011. V. 7. P. 5–44.

Hasan S., Klaiber H.A., Sheldon I. The impact of science parks on small- and medium-sized enterprises productivity distributions: The case of Taiwan and South Korea. Small Business Economics, 2018. P. 1–19. DOI: 10.1007/s11187-018-0083-8.

Kutsenko E., Islankina E., Abashkin V. The evolution of cluster initiatives in Russia: The impacts of policy, life-time, proximity and innovative environment. Foresight, 2017. V. 19. No. 2. P. 87–120. DOI: 10.1108/FS-07-2016-0030.

MapInfo Professional. User Manual (complete). MapInfo Corporation. New York: Troy, 2004. 659 p.

Martin R., Florida R., Pogue M., Mellander C. Creativity, clusters and the competitive advantage of cities. Competitiveness Review, 2015. V. 25. Iss. 5. P. 482–496. DOI: 10.1108/CR-07-2015-0069.

Miguelez E., Moreno R. Relatedness, external linkages and regional innovation in Europe. Regional Studies, 2018. V. 52. Iss. 5. P. 688–701. DOI: 10.1080/00343404.2017.1360478.

Moreno R., Paci R., Usai S. Innovation clusters in the European regions. European Planning Studies, 2006. V. 14. No. 9. P. 1235–1263. DOI: 10.1080/09654310600933330.

Romer P. M. Mathiness in the theory of economic growth. American Economic Review, 2015. V. 105. No. 5. C. 89–93. DOI: 10.1257/aer.p20151066.

Scholl T., Brenner T. Detecting spatial clustering using a firm-level cluster index. Regional Studies, 2016. V. 50. Iss. 6. P. 1054–1068.

Schumpeter J. Capitalism, socialism and democracy. London & New York: Taylor & Francis e-Library, 2003. 460 p.

Scranton P. Infrastructure: Reappraisal and reorientation. Enterprise, Organization, and Technology in China, 2019. P. 199–230. DOI: 10.1007/978-3-030-00398-2_7.

Sunny S. A., Shu C. Investments, incentives, and innovation: geographical clustering dynamics as drivers of sustainable entrepreneurship. Small Business Economics, 2019. V. 52. Iss. 4. P. 905–927. DOI: 10.1007/s11187-017-9941-z.

Tassey G. Modeling and measuring the economic roles of technology infrastructure. Economics of Innovation and New Technology, 2008. No. 17 (7−8). P. 617–631. DOI: 10.1080/ 10438590701785439.

Torrisi G. Public infrastructure: definition, classification and measurement issues. Munich Personal RePEc Archive. MPRA Paper No. 12990, posted 25 January 2009. P. 2–34.

Wang X., Lv J., Wei C., Xie D. Modeling spatial pattern of precipitation with GIS and multivariate geostatistical methods in Chongqing tobacco planting region. China. International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. P. 512–524.

REFERENCES

Audretsch D.B., Heger D., Veith T. Infrastructure and entrepreneurship. Small Business Economics, 2015. No. 44 (2). P. 219–230. DOI: 10.1007/s11187-014-9600-6.

Baburin V.L., Zemtsov S.P. Innovative potential of Russian regions. Moscow: University Book, 2017. 358 p. (in Russian).

Barinova V.A., Maltseva A.A., Sorokina A.V., Eremkin V.A. Approaches to assessing the effectiveness of the operation of innovation infrastructure facilities in Russia. Innovations, 2014. No. 3. P. 42–51 (in Russian).

Barinova V.A., Zemtsov S.P., Spivak V.V., Sutyrina T.A. Regional innovation system of the Irkutsk region. Moscow: Delo Publishing House RANEPA, 2015. 232 p. (in Russian).

Birudavolu S., Nag B. Regional factors influencing innovation. Business Innovation and ICT Strategies, 2018. P. 211–238. DOI: 10.1007/978-981-13-1675-3_8.

Caiazza R., Richardson A., Audretsch D.J. Knowledge effects on competitiveness: From firms to regional advantage. The Journal of Technology Transfer, 2015. V. 40. Iss. 6. P. 899–909. DOI: 10.1007/s10961-015-9425-8.

Cooke P. Biotechnology clusters as regional, sectoral innovation systems. International Regional Science Review, 2002. V. 25. No. 2. P. 8–37. DOI: 10.1177/016001760 202500102.

Earls J., Dixon B. Spatial interpolation of rainfall data using ArcGIS: A comparative study. Proceedings of the 27th Annual ESRI International User Conference, 2007. V. 31. P. 1–9.

Feldman M.P. The new economics of innovation, spillovers and agglomeration: A review of empirical studies. Economics of innovation and new technology, 1999. No. 8 (1−2). V. 8. P. 5–25. DOI: 10.1080/10438599900000002.

Goncalves J., Peuckert J. Measuring the impacts of quality infrastructure: Impact theory, empirics and study design. PTB Guide. Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2011. V. 7. P. 5–44.

Hasan S., Klaiber H.A., Sheldon I. The impact of science parks on small- and medium-sized enterprises productivity distributions: The case of Taiwan and South Korea. Small Business Economics, 2018. P. 1–19. DOI: 10.1007/s11187-018-0083-8.

Koroleva L.P., Kandrashkina M.A. Innovative infrastructure: essence and development trends in the Republic of Mordovia. System Management, 2014. Iss. 3s (24). Web resource: http://sisupr.mrsu.ru/2014-3/PDF/Koroleva_L_P_Kandraskina_M_A.pdf (accessed 09.02.2023) (in Russian).

Kutsenko E.S., Abashkin V.L., Fiyaksel E.A., Islankina E.A. Ten years of cluster politics in Russia: the logic of departmental approaches. Innovations, 2017. No. 12 (230). P. 46–58 (in Russian).

Kutsenko E.S., Islankina E., Abashkin V. The evolution of cluster initiatives in Russia: The impacts of policy, life-time, proximity and innovative environment. Foresight, 2017. V. 19. No. 2. P. 87–120. DOI: 10.1108/FS-07-2016-0030.

Makar S.V., Nosonov A.M. Evaluation and spatial patterns of development of innovation activity in the regions of Russia. Economy. Taxes. Right, 2017. V. 10. No. 4. P. 96–106 (in Russian). DOI: 10.26794/1999-849X-2017-10-4-96-106.

MapInfo Professional. User Manual (complete). MapInfo Corporation. New York: Troy, 2004. 659 p.

Martin R., Florida R., Pogue M., Mellander C. Creativity, clusters and the competitive advantage of cities. Competitiveness Review, 2015. V. 25. Iss. 5. P. 482–496. DOI: 10.1108/CR-07-2015-0069.

Miguelez E., Moreno R. Relatedness, external linkages and regional innovation in Europe. Regional Studies, 2018. V. 52. Iss. 5. P. 688–701. DOI: 10.1080/00343404.2017.1 360478.

Mikhailov A.S., Gorochnaya V.V., Mikhailova A.A., Plotnikova A.P., Volkhin D.A. Clusters of coastal regions of the European part of Russia. Geographical Bulletin, 2020. No. 4 (55). P. 81–96. DOI: 10.17072/2079-7877-2020-4-81-96.

Mikhailov A.S., Mikhailova A.A. On the possibilities of Russian participation in the formation of cross-border innovation clusters in the Baltic. Economics, Management, Finance: Proceedings of II International scientific conference. Perm, 2012. P. 171–178. DOI: 10.13140/2.1.4800.8007.

Moreno R., Paci R., Usai S. Innovation clusters in the European regions. European Planning Studies, 2006. V. 14. No. 9. P. 1235–1263. DOI: 10.1080/09654310600933330.

Rating of innovative development of subjects of the Russian Federation. Iss. 5. Moscow: National research University "Higher School of Economics", 2017. 260 p. (in Russian).

Rating of innovative regions of Russia by the Association of Innovative Regions of Russia. Moscow: AIRR, 2018. 54 p. (in Russian).

Romer P.M. Mathiness in the theory of economic growth. American Economic Review, 2015. V. 105. No. 5. P. 89–93. DOI: 10.1257/aer.p20151066.

Rybalkin V.V., Sutyrina T.A. Strategy of innovative development of Russian. Moscow: Delo Publishing House RANEPA, 2013. 316 p. (in Russian).

Scholl T., Brenner T. Detecting spatial clustering using a firm-level cluster index. Regional Studies, 2016. V. 50. Iss. 6. P. 1054–1068.

Schumpeter J. Capitalism, socialism and democracy. London & New York: Taylor & Francis e-Library, 2003. 460 p.

Scranton P. Infrastructure: Reappraisal and reorientation. Enterprise, Organization, and Technology in China, 2019. P. 199–230. DOI: 10.1007/978-3-030-00398-2_7.

Sokolov D.S., Tomilina N.S. Innovative infrastructure in modern Russia: Concept, content, features. Innovative Science, 2016. No. 1. P. 172–177 (in Russian).

Sunny S.A., Shu C. Investments, incentives, and innovation: Geographical clustering dynamics as drivers of sustainable entrepreneurship. Small Business Economics, 2019. V. 52. Iss. 4. P. 905–927. DOI: 10.1007/s11187-017-9941-z.

Synergy of space: Regional innovation systems, clusters and knowledge flows. Smolensk: Oikumena, 2012. 760 p. (in Russian).

Tassey G. Modeling and measuring the economic roles of technology infrastructure. Economics of Innovation and New Technology, 2008. No. 17 (7−8). P. 617–631. DOI: 10.1080/10438590701785439.

Terebova S.V. Innovative infrastructure in the region: Problems and directions of development. Economic and social changes: facts, trends, forecast, 2014. No. 6 (36). P. 199–212 (in Russian). DOI: 10.15838/esc/2014.6.36.15.

Teslenok S.A., Nosonov A.M., Teslenok K.S. Geoinformation modeling of diffusion of innovations. InterCarto/InterGIS-20: Sustainable development of territories: cartographic and geoinformation support. Moscow, 2014. P. 159–169 (in Russian).

Torrisi G. Public infrastructure: Definition, classification and measurement issues. Munich Personal RePEc Archive. MPRA Paper No. 12990, posted 25 January 2009. P. 2–34.

Wang X., Lv J., Wei C., Xie D. Modeling spatial pattern of precipitation with GIS and multivariate geostatistical methods in Chongqing tobacco planting region. China. International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. P. 512–524.

УДК: 528.93+378.14 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-174-185**

М.В. Панасюк[1], **Е.М. Пудовик**[2], **И.Г. Мальганова**[3]

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММАХ КАФЕДРЫ ГЕОГРАФИИ И КАРТОГРАФИИ КАЗАНСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

АННОТАЦИЯ

В работе раскрывается специфика образовательных программ кафедры географии и картографии Казанского (Приволжского) федерального университета — программ бакалавриата и магистратуры по направлениям 05.03.03 и 05.04.03 — «Картография и геоинформатика». Определены важнейшие профессиональные компетенции в области геоинформационного картографирования, среди которых большая их часть нацелена на совершенствование методических навыков и умений, связанных с обработкой и анализом пространственных данных, получаемых из разных источников. Главной особенностью разработанной системы курсов по геоинформационному картографированию является разнообразие современных образовательных и геоинформационных технологий, благодаря которым каждый курс дает возможность овладения широким спектром навыков решения задач в среде различных геоинформационных систем и может быть использован как для очной, так и для дистанционной и смешанной форм обучения. Эффективность образовательных программ раскрывается в т. ч. через взаимодействие с партнерами-работодателями. К числу организаций-партнеров кафедры географии и картографии КФУ относятся: филиал ППК «Роскадастр» по Республике Татарстан; компании, работающие в сфере территориального планирования, например ГБУ «Фонд пространственных данных Республики Татарстан», Университет Иннополис, МБУ «Институт развития города» (г. Казань), ГБУ «Институт пространственного планирования Республики Татарстан», ООО «ГК-групп» и др.; фирмы, оказывающие консалтинговые услуги и выполняющие экспертизу — ООО «Геоконсалтинг», ООО «Экспертно-консультационный центр «Промышленная безопасность»», ООО «Многофункциональный инжиниринговый центр»; крупные компании, работающие в сферах технической инвентаризации объектов недвижимости, межевания, землеустройства, такие, как Акционерное общество «Бюро технической инвентаризации и кадастровых работ Республики Татарстан»; Министерства строительства, сельского хозяйства и продовольствия, лесного хозяйства Республики Татарстан (РТ) и ряд других организаций и предприятий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геоинформационное картографирование, образование, ГИС

[1] Казанский федеральный университет, кафедра географии и картографии, ул. Кремлевская, д. 6/20, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420008,
e-mail: **mp3719@yandex.ru**

[2] Казанский федеральный университет, кафедра географии и картографии, ул. Кремлевская, д. 6/20, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420008,
e-mail: **epudovic@mail.ru**

[3] Казанский федеральный университет, кафедра географии и картографии, ул. Кремлевская, д. 6/20, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420008,
e-mail: **irinamalganova@gmail.com**

Mikhail V. Panasyuk[1], **Elena M. Pudovik**[2], **Irina G. Malganova**[3]

GEOINFORMATION MAPPING IN EDUCATIONAL PROGRAMS OF THE DEPARTMENT OF GEOGRAPHY AND CARTOGRAPHY OF KAZAN UNIVERSITY

ABSTRACT

The article describes educational programs of Geography and Cartography Department of Kazan (Volga Region) Federal University — bachelor's and master's degree programs in the field of "Cartography and Geoinformatics". The most important professional competencies in the field of geoinformatics mapping are enlightened, including those aimed at improving methodological skills and abilities related to the processing and analysis of spatial data, obtained from various sources. The main feature of the developed system of courses on geoinformation mapping is the variety of modern educational and geoinformation technologies. Due to them, each course provides an opportunity to master a wide range of problem-solving skills in the environment of various geoinformation systems, and can be used for both full-time and online learning forms of education. The effectiveness of educational programs is revealed, inter alia, through interaction with employers. Among partners of Geography and Cartography Department of Kazan Federal University are State Budgetary Institution "Spatial Data Foundation of the Republic of Tatarstan", Innopolis University, Municipal Budgetary Institution "Institute of City Development" (Kazan), State Budgetary Institution "Institute of Spatial Planning of the Republic of Tatarstan", Limited Liability Company "GC-group", etc.; companies providing consulting services and performing expertise — Limited Liability Company "Geoconsulting", Limited Liability Company "Expert Consulting Center "Industrial Safety"", Limited Liability Company "Multifunctional Engineering Center", large companies working in the field of technical inventory of real estate, surveying, land management, such as Joint-Stock company "Bureau of Technical Inventory and Cadastral Works of the Republic of Tatarstan"; Ministries of Construction, Agriculture and Food, Forestry of the Republic of Tatarstan and a number of other organizations and enterprises.

KEYWORDS: geoinformation mapping, education, GIS

ВВЕДЕНИЕ

Геоинформационное картографирование — относительно новая область знаний и практических умений, возникшая на стыке классической картографии и современных геоинформационных технологий. Оно объединяет понятийный аппарат и методы традиционной картографии, геоинформатики, дистанционного зондирования Земли, фотограмметрии, системного картографирования и, в свою очередь, способствует разработке качественной картографической основы ГИС, позволяя повысить качество и оперативность создания сложных картографических произведений [*Капралов* и др., 2004; *Эйриян*, 2020; *Panasyuk*, *Pudovik*, 2020].

Геоинформационное картографирование находит широкое применение во многих сферах деятельности, включая территориальное планирование и проектирование,

[1] Kazan Federal University, Geography and Cartography department, 6/20, Kremlyovskaya str., Kazan, Republic of Tatarstan, 420008, Russia, *e-mail:* **mp3719@yandex.ru**

[2] Kazan Federal University, Geography and Cartography department, 6/20, Kremlyovskaya str., Kazan, Republic of Tatarstan, 420008, Russia, *e-mail:* **epudovic@mail.ru**

[3] Kazan Federal University, Geography and Cartography department, 6/20, Kremlyovskaya str., Kazan, Republic of Tatarstan, 420008, Russia, *e-mail:* **irinamalganova@gmail.com**

кадастровую деятельность, техническую инвентаризацию объектов, землеустройство, строительство, сельское и лесное хозяйство и пр. [*Лурье*, 2001].

К числу организаций-партнеров кафедры географии и картографии КФУ, заинтересованных в приобретении их сотрудниками навыков в области геоинформационного картографирования, относятся: филиал ППК «Роскадастр» по Республике Татарстан[1]; компании, работающие в сфере территориального планирования, например, ГБУ «Фонд пространственных данных Республики Татарстан»[2], Университет Иннополис[3], МБУ «Институт развития города» (г. Казань)[4], ГБУ «Институт пространственного планирования Республики Татарстан»[5], ООО «ГК-групп» и др.; фирмы, оказывающие консалтинговые услуги и выполняющие экспертизу — ООО «Геоконсалтинг», ООО «Экспертно-консультационный центр «Промышленная безопасность»», ООО «Многофункциональный инжиниринговый центр», крупные компании, работающие в сферах технической инвентаризации объектов недвижимости, межевания, землеустройства — такие, как Акционерное общество «Бюро технической инвентаризации и кадастровых работ Республики Татарстан»[6]; Министерства строительства, сельского хозяйства и продовольствия, лесного хозяйства Республики Татарстан (РТ) и ряд других организаций и предприятий.

Геоинформационное картографирование является одним из основных подходов к решению проблем картографического обеспечения работ указанных организаций и предприятий Республики Татарстан, объединяя на практике широкий спектр методов, приемов и технологий, в т. ч. создание разномасштабных цифровых карт, разработку картографической основы для ведомственных и региональной геоинформационной системы РТ, разработку и ведение картографических баз данных, работу с различными источниками информации — от классических карт и их оцифровки до применения ДЗЗ и космических технологий, а также формирование информационных систем централизованного хранения и коллективного использования картографической информации, включая совокупность картографических баз данных, СУБД и комплекс прикладных программ. Это свидетельствует о значительном социальном заказе на подготовку специалистов — картографов и геоинформатиков, владеющих навыками и умениями в области профессиональной геоинформационной картографии.

Для формирования необходимых компетенций и подготовки высококвалифицированных специалистов кафедра географии и картографии Казанского федерального университета разработала и успешно осуществляет в течение последних 8 лет программы бакалавриата и магистратуры по направлениям 05.03.03 и 05.04.03 — «Картография и геоинформатика», где представлено значительное число дисциплин, охватывающих различные методы и технологии геоинформационного картографирования.

---

1 Филиал ППК «Роскадастр» по Республике Татарстан. Электронный ресурс: https://roskadastr.tatarstan.ru/ (дата обращения 14.02.2023).

2 ГБУ «Фонд пространственных данных Республики Татарстан». Электронный ресурс: https://fpd.tatarstan.ru/ (дата обращения 15.02.2023).

3 Университет Иннополис. Электронный ресурс: https://innopolis.university/ (дата обращения 15.02.2023).

4 МБУ «Институт развития города». Электронный ресурс: https://kzn.ru/meriya/ispolnitelnyy%E2%80%93 komi tet/institut%E2%80%93razvitiya%E2%80%93goroda/?lang=ru (дата обращения 14.02.2023).

5 ГБУ «Институт пространственного планирования РТ». Электронный ресурс: http://ipprt.ru/ (дата обращения 14.02.2023).

6 Акционерное общество «Бюро технической инвентаризации и кадастровых работ Республики Татарстан». Электронный ресурс: https://bti.tatarstan.ru/ (дата обращения 14.02.2023).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках основной образовательной программы кафедры «Геоинформационные технологии в экономике и управлении» направления 05.03.03 «Картография и геоинформатика» у выпускников формируются 7 важнейших профессиональных компетенций в области геоинформационного картографирования [*Панасюк*, *Пудовик*, 2019]. Из них 4 нацелены на совершенствование методических навыков и умений, связанных с обработкой и анализом пространственных данных, получаемых из разных источников:

- ПК-5 — способен применять аэрокосмические методы картографирования и моделирования, основанные на компьютерных технологиях обработки снимков нового типа (сверхвысокого разрешения, тепловых, радиолокационных), а также методы компьютерных стереоизмерений и трехмерного аэрокосмического моделирования;
- ПК-6 — способен использовать методы и технологии сбора, анализа и обработки пространственных данных из разных источников, в т. ч. посредством построения инфраструктуры пространственных данных и создания географических баз и банков данных;
- ПК-7 — способен применять современные геоинформационные и веб-технологии создания карт, программное обеспечение в области картографии, геоинформатики и обработки аэрокосмических снимков;
- ПК-8 — способен применять картографические, топографические и геодезические методы при решении стандартных задач профессиональной деятельности.

Две компетенции направлены на выработку навыков и умений работы в различных ГИС-пакетах, построения картографических изображений разной направленности, работы с базами пространственных данных, их построения и использования, применения приемов компьютерного дизайна:

- ПК-3 — способен использовать базовые знания в области информатики, компьютерных и мультимедийных технологий, программных средств, в т. ч. знания об интерфейсе ГИС-пакетов, моделях, форматах данных, вводе пространственных данных и организации запросов в ГИС;
- ПК-4 — способен использовать базовые знания картографии, топографии и геодезии при применении методов составления, редактирования, подготовки к изданию и издания различных общегеографических и тематических карт, атласов и других картографических изображений в традиционной аналоговой и цифровой формах, разрабатывать оформление и компьютерный дизайн карт разных видов в графических и ГИС-пакетах.

Имеется также специализированная компетенция, введенная в базу компетенций основной образовательной программы специально по запросу организаций-партнеров и связанная с формированием базы знаний в сфере кадастровой деятельности:

- ПК-9 — способен применять базовые знания в области кадастровой деятельности для управления земельными ресурсами, недвижимостью, организации и проведения кадастровых и землеустроительных работ.

Сформированный пул знаний и умений создает базу для успешного трудоустройства выпускников бакалавриата. Они умеют применять современные методы получения обработки и информации, знают специализированные программные продукты для кадастровой деятельности. Мониторинг дальнейшей их карьеры показывает, что трудоустройство в профильных организациях превышает 95 %.

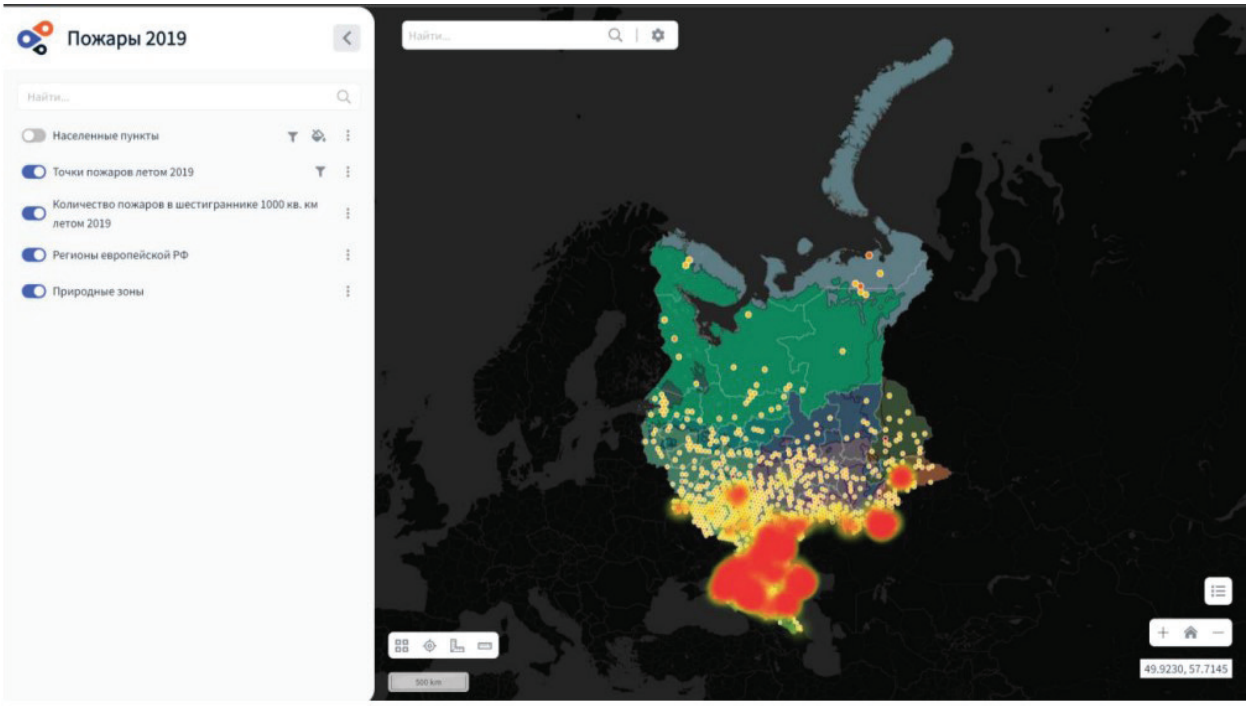
Более углубленная выработка умений и навыков в сфере геоинформационного картографирования происходит на уровне магистратуры, в рамках обучения по магистерской программе направления 05.04.03 «Картография и геоинформатика» — «Космические и геоинформационные технологии в экономике и управлении».

Сформированная база профессиональных компетенций состоит из 7 компетенций и нацелена не только на совершенствование владения методами сбора, обработки и анализа геоинформации, но и на выработку умений и навыков выявления и решения современных проблем картографического и геоинформационного обеспечения различных областей и видов профессиональной деятельности. В их число входят:

- ПК-2 — способен владеть знаниями о современных теоретических концепциях, проблемах и перспективах развития картографии, аэрокосмического зондирования, геоинформатики, геоинформационного картографирования, создания инфраструктуры пространственных данных, истории и методологии картографической науки;
- ПК-3 — способен выполнять сбор, обработку, преобразование цифровой пространственной информации топографического и тематического содержания, владением картографическими, геоинформационными и аэрокосмическими методами эколого-географического картографирования, мониторинга природных ресурсов, умением проектировать и создавать новые виды картографических произведений;
- ПК-4 — способен создавать базы и банки знаний и картографические информационно-поисковые системы, формировать пространственные инфраструктуры данных и разрабатывать геоинформационные системы глобального, национального, регионального, локального и муниципального уровней;
- ПК-5 — способен получать, обрабатывать, синтезировать аэрокосмическую информацию от разных съемочных систем (датчиков), в разных диапазонах и с разным разрешением для целей картографирования и создания геоинформационных систем, научно-исследовательских и производственных работ;
- ПК-6 — способен разрабатывать кадастровые системы комплексного и отраслевого типа и различного назначения и владением методами математико-картографического моделирования, картографо-аэрокосмических, компьютерных и геоинформационных технологий;
- ПК-7 — способен организовывать и контролировать картографические и геоинформационные работы, выполнять редакторские работы, осуществлять контроль картографического и геоинформационного производства;
- ПК-8 — способен проектировать и создавать базы и банки цифровой информации, геоинформационные системы всевозможного назначения и территориального охвата, создавать геопорталы и владеть технологиями и процессами мультимедийного, виртуального, многомерного цифрового пространственного моделирования для принятия организационных и проектных решений.

В разработке дисциплин по геоинформационному картографированию были использованы традиционные и современные образовательные методы и технологии. Это прежде всего связано со спецификой образовательного формата дисциплин. Предлагается максимальное погружение в работу с десктопными и веб-версиями таких программных продуктов, как ГИС «ArcGIS»[1], QGIS[2], ГИС «Аксиома»[3], FlexGIS[4] (рис. 1).

1 ГИС «ArcGIS». Электронный ресурс: https://www.esri-cis.ru/(дата обращения 14.02.2023).
2 QGIS. Электронный ресурс: https://qgis.org/ru/site/ (дата обращения 14.02.2023).
3 ГИС «Аксиома». Электронный ресурс: https://axioma-gis.ru/ (дата обращения 18.02.2023).
4 FlexGIS. Электронный ресурс: https://flexgis.ru/ (дата обращения 20.02.2023).



2. Проанализируйте данную веб-ГИС (вопросы в задании выше в этом помогут) и составьте характеристику данного проекта в виде текстового анализа (аналитическая записка).

Рис. 1. Пример задания по курсу «Веб-картография и веб-ГИС»
Fig. 1. An example of a task for the course "Web cartography and Web-GIS"

Одновременно с этим слушатели получают возможность ознакомления с учебными материалами в разных образовательных форматах: лекционные и видеоматериалы, скринкасты, подкасты и гайды по каждому из блоков курса, презентации, тесты, сертификат о прохождении курса Казанского федерального университета. Все учебно-методические материалы размещаются на страницах курсов сайта дистанционного образования Казанского федерального университета[1].

Видеоматериалы по дисциплинам также записываются лекторами в Microsoft Teams — корпоративной платформе, позволяющей формировать и сохранять записи лекций и семинарских занятий с возможностью трансляции рабочего экрана. После записи видеолекция «заливается» на закрытый канал авторов и с помощью html-кода интегрируется на страницу курса.

Скринкасты с объяснением практических занятий курса формируются в 3 разных форматах:

1) в виде «гифки» или короткого видео без звука, чтобы проиллюстрировать практические задачи конкретными примерами работы в среде ГИС;
2) со звуком; в данном случае запись экрана сопровождается комментариями и пояснениями автора для понимания специфики каждой из изучаемых геоинформационных систем — ArcGIS, QGIS, MapInfo Prof., ГИС «Аксиома»;
3) с лицом спикера, когда к записи экрана добавляется видео с вебкамеры и используется для подготовки видеоматериалов.

[1] Сайт дистанционного образования Казанского федерального университета. Электронный ресурс: https://edu.kpfu.ru/ (дата обращения 18.02.2023).

Помимо традиционных тестов в системе электронного обучения Moodle на edu.kpfu.ru, авторами дисциплин используются элементы геймификации в режиме реального времени. Для этого ряд тестов создан на личных страницах авторов в сервисах учебных викторин и тестов Quizizz и Kahoot! (рис. 2) [*Уарова*, 2020; *Чигиринова*, 2021].

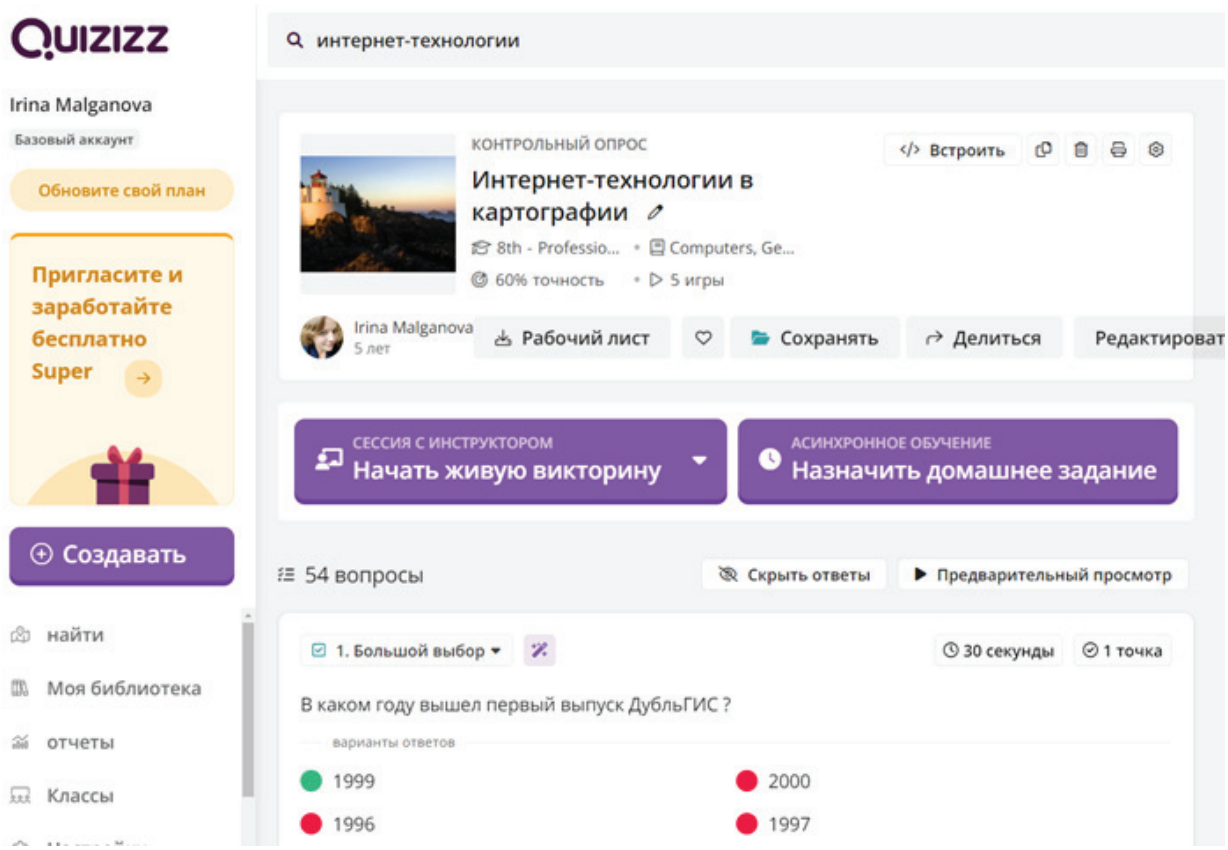


Рис. 2. Пример викторины на странице сервиса Quizizz
Fig. 2. An example of a quiz on the Quizizz service page

Главной особенностью разработанной системы курсов по геоинформационному картографированию является разнообразие современных образовательных и геоинформационных технологий, благодаря которым каждый курс дает возможность овладения широким спектром навыков решения задач в среде различных геоинформационных систем и может быть использован как для очной, так и для дистанционной и смешанной форм обучения. В ряде курсов практические занятия посвящены изучению кейсов от работодателя, например, в курсе «Атласное картографирование» для магистрантов направления 05.04.03 «Картография и геоинформатика» заключительный блок — «Кейс от работодателя: атласная геоинформационная система и территориальное планирование». Он рассматривается в формате мастер-класса вместе с партнерами проекта — работодателями (ООО «ГК-групп»). Тематика кейса обусловлена практической востребованностью как самого продукта, так и его методической базы.

Для успешной выработки компетенций, связанных с современными методами сбора и обработки геоданных сформирован межинститутский специализированный учебный кластер «Геодезия, картография и инфраструктура пространственных данных» по подготовке специалистов в области картографии, геоинформатики, геодезии,

дистанционного зондирования Земли и кадастровой деятельности. Данный кластер состоит из трех компьютерных классов, в т. ч. одного специализированного класса, состоящего из 25 рабочих станций с лицензионным программным обеспечением в области картографии и геоинформатики (ArcGIS, QGIS, ГИС «Аксиома», Google Earth[1], SaS.Планета[2], CREDO[3], ГИС «Панорама»[4] и др.) и учебной лаборатории «Дистанционное зондирование Земли» (11 цифровых фотограмметрических станций), оснащенной 3D дисплеями, двумя БПЛА и плоттером.

Создание кластера привело к расширению возможностей преподавателей и студентов по выполнению НИР и НИРС, также выполнению выпускных квалификационных и курсовых работ в области картографии, геоинформатики, геодезии, дистанционного зондирования Земли и кадастровой деятельности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Необходимость выработки отмеченных компетенций и потенциал новых методов обучения, используемых при преподавании дисциплин по геоинформационной картографии, привели к разработке системы специальных дисциплин, обеспечивающих базовые и продвинутые знания, умения и навыки выпускников в области геоинформационного картографирования.

Основные компетенции в этой области формируются на основе изучения ряда дисциплин бакалавриата и их последующее развитие в магистратуре кафедры, таких как:

- Геоинформационные системы;
- Геоинформационное картографирование;
- Базы пространственных данных;
- Практикум по геоинформационной системе ArcGIS;
- Практикум по геоинформационной системе MapInfo;
- Муниципальные геоинформационные системы;
- Интернет-технологии в картографии;
- Проектирование и составление карт и атласов;
- Ландшафтное картографирование;
- Социально-экономическое картографирование;
- Геоинформационные технологии в экономике и менеджменте;
- Кадастры и управление недвижимостью и земельными ресурсами;
- Аэрофото- и космические методы исследований;
- Фотограмметрия и дистанционные методы зондирования Земли;
- Экономико-правовые основы геоинформационной деятельности.

Дисциплина «Геоинформационные системы» формирует общие представления о геоинформационных системах, их функциях, сильных и слабых сторонах, сферах применения и рынках ГИС. Студенты начинают изучать свою первую ГИС — QGIS.

Дисциплина «Геоинформационное картографирование», будучи одним из центральных курсов образовательной программы бакалавриата, формирует основные базовые знания и умения работы в двух геоинформационных системах — QGIS и ArcGIS.

---

1 Google Earth. Электронный ресурс: https://www.google.ru/intl/ru/earth/ (дата обращения 18.02.2023).

2 SaS.Планета. Электронный ресурс: http://sasgis.ru/sasplaneta/ (дата обращения 18.02.2023).

3 Программный комплекс КРЕДО. Электронный ресурс: https://credo-dialogue.ru/produkty.html (дата обращения 18.02.2023).

4 ГИС «Панорама». Электронный ресурс: https://gisinfo.ru/products/products_panorama.htm (дата обращения 18.02.2023).

Курс годовой, и к его окончанию студенты готовы переходить к изучению частных аспектов использования геоинформационных систем, осваивать отдельные прикладные аспекты геоинформационного картографирования.

Дисциплина «Базы пространственных данных» вырабатывает умения создавать и вести базы пространственных данных различного контента, на основе которых формируются тематические ГИС-карты. Результаты обучения востребованы в работе ряда организаций-партнеров кафедры, таких как ГБУ «Фонд пространственных данных Республики Татарстан».

Дисциплина «Муниципальные геоинформационные системы» знакомит студентов с особенностями применения геоинформационных технологий и методов ГИС-картографирования на уровне муниципального образования, занятия ведутся представителями организации-партнера кафедры — ОАО «Градосервис».

Прикладной характер имеет и дисциплина «Геоинформационные технологии в экономике и менеджменте», вводя студентов в широкий круг прикладных аспектов геоинформационного картографирования в сфере государственного управления, региональных ГИС, применения ГИС в банковской сфере и иных областях экономики.

Дисциплина «Интернет-технологии в картографии» формирует умения работать в относительно новой среде геоинформационного картографирования, которой является Интернет. Все большее распространение работы в облачных сервисах делает эти знания и умения особо востребованными.

Выработка умений и навыков профессионального построения геоинформационных карт, разработки программы карты, формирования слоев и баз данных реализуется тремя дисциплинами программы бакалавриата — «Проектирование и составление карт и атласов», «Ландшафтное картографирование», «Социально-экономическое картографирование».

Методы сбора данных для геоинформационного картографирования изучаются в рамках дисциплин «Аэрофото- и космические методы исследований», «Фотограмметрия и дистанционные методы зондирования Земли». Занятия проходят в специализированной лаборатории учебного кластера «Геодезия, картография и инфраструктура пространственных данных».

На старших курсах бакалавриата происходит совершенствование умений работать в геоинформационной системе ArcGIS (дисциплина «Практикум по геоинформационной системе ArcGIS»), вводятся элементы геоинформационного анализа и изучается более углубленно язык запросов, работа с таблицами. Также студенты приступают к знакомству с еще двумя геоинформационными системами — MapInfo и Аксиома. Имеющийся опыт работы в среде геоинформационных систем, изученных на 1–2 курсах бакалавриата, позволяет легко разобраться в функциональных возможностях новых ГИС и особенностях их применения. Наряду с ними, на старших курсах бакалавриата изучается ГИС Панорама. Знакомство с ней очень важно, т. к. ежегодно многие выпускники трудоустраиваются в сфере кадастровой деятельности. Кроме того, в условиях современной международной обстановки применение отечественных ГИС получает все большее распространение в организациях, осуществляющих сбор, обработку и распространение пространственных данных, поэтому навыки работы в их среде отвечают изменяющимся потребностям работодателей.

Развитие компетенций в области геоинформационного картографирования продолжается на магистерской программе направления 05.04.03 «Картография и геоинформатика» — «Космические и геоинформационные технологии в экономике и управлении» в рамках следующих базовых дисциплин:

– Геоинформатика. Продвинутый уровень;
– Практикум по геоинформационному анализу территорий;
– Кадастровый учет и оценка объектов недвижимости;

– Проектирование геоинформационных систем;
– Атласное картографирование;
– Космическая фотограмметрия;
– Космические и БПЛА-технологии;
– Технологии дистанционного зондирования Земли;
– Геоинформационные и космические технологии в экономике и управлении.

Дисциплины «Геоинформатика. Продвинутый уровень», «Практикум по геоинформационному анализу территорий», «Кадастровый учет и оценка объектов недвижимости», «Проектирование геоинформационных систем» нацелены на дальнейшее совершенствование навыков работы с геоинформационными системами ArcGIS и «Панорама», большое внимание уделяется вопросам проектирования геоинформационных систем и ГИС-проектам.

Дисциплина магистратуры «Атласное картографирование» формирует навыки геоинформационного картографирования самого высокого уровня, предполагая овладением умений создания не просто серии карт, а разработки и реализации атласных геоинформационных систем.

Дальнейшее изучение методов сбора и анализа пространственных данных для геоинформационного картографирования происходит на курсах «Космическая фотограмметрия», «Космические и БПЛА-технологии», «Технологии дистанционного зондирования Земли». В рамках этих курсов проводится много практических занятий, магистранты учатся работать с беспилотными летальными аппаратами, дешифрировать аэрофотоснимки, проводить различные виды анализа полученных данных.

Большую роль в приобретении навыков и умений в области геоинформационного картографирования играют производственные практики, которые проходят в организациях-партнерах кафедры. В период обучения в бакалавриате и в магистратуре таких практик две. По мере прохождения теоретических дисциплин, усложняются и задачи производственных практик. Особой востребованностью стороны наших студентов пользуется прохождение практик в организациях-партнерах — ГБУ «Фонд пространственных данных Республики Татарстан», Филиал ППК «Роскадастр» по Республике Татарстан, Акционерное общество «Бюро технической инвентаризации и кадастровых работ Республики Татарстан», ООО «Геоконсалтинг», ООО «ГК-групп», ООО «Экспертно-консультационный центр «Промышленная безопасность»», ООО «Градосервис». По итогам практики многие студенты кафедры получают приглашение на работу до завершения обучения.

ВЫВОДЫ

Разработанные системные решения, обеспечивающие качественную подготовку в области геоинформационной картографии, доказали свою эффективность. В последние 5–7 лет они способствовали выстраиванию прочного партнерства с целым рядом ведущих российских и региональных организаций, быстрому росту числа партнеров кафедры, их активному участию в формировании учебных планов кафедры. Представители организаций-партнеров составляют большинство членов Государственной аттестационной комиссии, непосредственно оценивая качество подготовки специалистов. Достаточно много случаев предложения трудоустройства непосредственно по результатам защиты выпускных квалификационных работ. Косвенным свидетельством профессиональной эффективности обучения являются также достаточно высокие карьерные позиции выпускников, которых они достигают в течение нескольких лет после завершения образования — начальников отделов, глав фирм и т. д.

Отмеченные решения в области содержания и структуры образовательных программ кафедры способствовали в т. ч. ее вхождению в состав партнерских подразделений Образовательного консорциума «Национальная система пространственных данных», возглавляемого Московским государственным университетом геодезии и картографии[1]. В учебном плане сетевой магистерской программы консорциума «Картографическое и геоинформационное обеспечение инфраструктуры пространственных данных» представлен ряд дисциплин, в которых развиваются умения и навыки геоинформационного картографирования.

В цели Консорциума до 2030 г., помимо пилотного проекта сетевого взаимодействия по обучению сотрудников территориальных управлений Росреестра, входят:

- осуществление комплекса мероприятий в сфере содействия повышению качества государственных услуг и пространственных данных, выполнение работ, оказание услуг федеральными государственными бюджетными учреждениями в рамках государственных заданий и иные мероприятия, обеспечение работоспособности цифровых сервисов и систем, мониторинг состояния и использования земель, создание инфраструктуры пространственных данных;
- создание и внедрение цифрового отечественного геопространственного обеспечения, интегрированного с муниципальными и региональными информационными системами, на территориях 85 субъектов Российской Федерации;
- создание единой цифровой платформы пространственных данных на территории всех субъектов Российской Федерации, а также создание единой электронной картографической основы, в т. ч. крупных масштабов, в целях наполнения государственной информационной системы ведения единой электронной картографической основы;
- достижение «цифровой зрелости» в сфере государственного кадастрового учета недвижимого имущества и государственной регистрации прав на недвижимое имущество при организации инфраструктуры пространственных данных в Российской Федерации (100 %).

Приобретенный опыт свидетельствует о высокой практической востребованности умений и навыков выпускников в области геоинформационной картографии. Быстрые темпы цифровизации общества обусловливают растущий спрос на пространственные данные, разработку проектов в области сбора, обработки и распространении пространственных данных, рост потребности в продуктах цифровой картографии создают устойчивые перспективы подготовки специалистов картографов и геоинформатиков, профессионально владеющих навыками геоинформационного картографирования, чему и будут способствовать результаты разработанных образовательных решений кафедры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Епринцев С.А., Шекоян С.В. Геоинформационное картографирование урбанизированных территорий как механизм социально-экологического мониторинга. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. Экология. Экономика. Информатика, 2019. № 4. С. 25–28.

Капралов Е.Г., Кошкарев А.В., Тикунов В.С., Заварзин А.В., Лурье И.К., Рыльский И.А., Трофимов А.М., Флейс М.Э., Яровых В.Б. Основы геоинформатики. Учебное пособие для вузов. В 2-х книгах. Книга 1. М.: Академия, 2004. 352 с.

[1] В России создан консорциум в сфере геоинформационных технологий. Электронный ресурс: https://ria.ru/ 20220618/pmef-1795891160.html (дата обращения 22.02.2023).

Лурье И.К. Геоинформационные методы в географических исследованиях и образовании. География, общество, окружающая среда. Развитие географии в странах Центральной и Восточной Европы. Тез. докл. Ч. 2. Калининград: Издательство Калининградского государственного университета, 2001. С. 94–95.

Панасюк М.В., Пудовик Е.М. Магистерская программа «Геоинформационные и космические технологии в экономике и управлении». Экономика в меняющемся мире: III Всероссийский экономический форум с международным участием (Казань, 17–26 апреля 2019 г.): сб. научных статей. Казань: Издательство Казанского Университета, 2019. С. 11–14.

Уарова Э.А. Применение игровой платформы KAHOOT! в обучении. Академический вестник Якутской государственной сельскохозяйственной академии, 2020. № 11 (16). С. 47–51.

Чигиринова И.Н. Возможности приложений kahoot и quizizz в организации учебной деятельности в условиях смешанного обучения. Интеграция науки, технологии и образования: ИНТО-2021. Материалы VI межрегиональной конференции молодых исследователей с международным участием. М., 2021. С. 6–9.

Эйриян Г.Н. Беспилотники: взгляд с позиции земельного законодательства. Lex russica (Русский закон), 2020. Т. 73. № 10. С. 63–72. DOI: 10.17803/1729-5920.2020.167.10.063-072.

Panasyuk M.V., Pudovik E.M. Geoinformation support for analysis of marine economic activities of Russian regions. AD ALTA: Journal of interdisciplinary research, 2020. V. 10. Iss. 2. P. 76–79.

REFERENCES

Chigirinova I.N. The possibilities of kahoot and quiz applications in the organization of educational activities in conditions of mixed learning. Integration of science, technology and education: INTO-2021. Proceedings of the VI interregional conference of young researchers with international participation. Moscow, 2021. P. 6–9 (in Russian).

Eiriyan G.N. Drones: a view from the standpoint of land legislation. Lex russica, 2020. V. 73. No. 10. P. 63–72 (in Russian). DOI: 10.17803/1729-5920.2020.167.10.063-072.

Kapralov E.G., Koshkarev A.V., Tikunov V.S., Zavarzin A.V., Lurie I.K., Rylskiy I.A., Trofimov A.M., Fleis M.E., Yarovykh V.B. Fundamentals of geoinformatics. Textbook for universities. In 2 books. Book 1. Moscow: Academy, 2004. 352 p. (in Russian).

Lurie I.K. Geoinformation methods in geographical research and education. Geography, Society, Environment. The development of geography in the countries of Central and Eastern Europe. Abstracts. Part 2. Kaliningrad: Kaliningrad State University Press, 2001. P. 94–95 (in Russian).

Panasyuk M.V., Pudovik E.M. Master's program "Geoinformation and Space technologies in Economics and Management". Economics in a Changing World: III All-Russian Economic Forum with International Participation (Kazan, April 17–26, 2019): Collection of scientific articles. Kazan: Kazan University Publishing House, 2019. P. 11–14 (in Russian).

Panasyuk M.V., Pudovik E.M. Geoinformation support for analysis of marine economic activities of Russian regions. AD ALTA: Journal of interdisciplinary research, 2020. V. 10. Iss. 2. P. 76–79.

Uarova E.A. Application of the KAHOOT! in learning. Academic Bulletin of the Yakutsk State Agricultural Academy, 2020. No. 11 (16). P. 47–51 (in Russian).

Yeprintsev S.A., Shekoyan S.V. Geoinformation mapping of urban observations as a mechanism for socio-ecological monitoring. Series: Geoinformation technologies and space monitoring. Ecology. Economy. Computer science, 2019. No. 4. P. 25–28 (in Russian).

УДК: 504.06 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-186-200**

Ю.А. Спирин[1], **С.И. Зотов**[2], **В.С. Таран**[3], **Ю.В. Королева**[4]

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕК ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

АННОТАЦИЯ

Реки юго-восточной части Калининградской области: Анграпа, Писса, Красная, Русская обладают большой уязвимостью к природным и антропогенным воздействиям, имеют первую и высшую категорию рыбохозяйственного назначения, отличаются трансграничным статусом. Мониторинг экологического состояния водотоков фрагментарен и не отвечает современным требованиям. В связи с отмеченными особенностями они представляют большой интерес для исследований. Для каждого водотока определены 4 точки от верховья до устья, в которых в осенний гидрологический сезон измерены гидрологические параметры и отобраны пробы воды для химических анализов. Рассчитаны кратности превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) по большому перечню химических элементов, определен индекс загрязнения воды (ИЗВ) и соответствующий ему класс качества воды в исследуемых реках. Проведено картографирование и выявлена пространственная дифференциация ИЗВ, кратности превышения ПДК по растворенному кислороду, биологическому потреблению кислорода за 5 суток ($БПК_5$), нитритам, аммонию, железу, нефтепродуктам. Результаты исследования показали, что качество воды в изучаемых реках находится в неудовлетворительном состоянии. Выявленное пространственное загрязнение складывается традиционным образом — качество воды от истока к устью ухудшается. Основным показателем, который вносит свой вклад в загрязнение водотоков, являются нефтепродукты, что подчеркивает потенциальное антропогенное влияние (кратность превышения ПДК колеблется в широком диапазоне — от 2,80 до 124,60 (по всем пробам)). Резкие изменения по этому показателю происходят после прохождения водотоками крупных по меркам района исследования городов. На втором месте находятся показатель железа, вносящий серьезный вклад в общую картину загрязнения (кратности превышения по железу — от 1,94 до 48,49 (по всем пробам)), что обусловлено высокими концентрациями этого ингредиента в подземных водах, питающих реки. Биогенные загрязнения, представленные аммонием и нитритами, распределены равномерно, что, предположительно, связано с их сельскохозяйственным происхождением (от 1,12 до 11,28 кратности по аммонию [по 5 из 16 пробам] и от 1,38 до 7,38 по нитриту [по 7 из 16 пробам]).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: антропогенные воздействия, гидрологический сезон, гидрохимический анализ, качество вод, картографирование загрязнения рек

[1] Российский государственный аграрный университет — Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, кафедра метеорологии и климатологии, ул. Прянишникова, д. 12, Москва, Россия, 127550, *e-mail:* **spirin.yuriy@rambler.ru**

[2] Балтийский федеральный университет имени И. Канта, Высшая школа живых систем, ул. Университетская, д. 2, Калининград, Россия, 236041, *e-mail:* **zotov.prof@gmail.com**

[3] Балтийский федеральный университет имени И. Канта, Высшая школа живых систем, ул. Университетская, д. 2, Калининград, Россия, 236041, *e-mail:* **ronya.volkova@yandex.ru**

[4] Балтийский федеральный университет имени И. Канта, Высшая школа живых систем, ул. Университетская, д. 2, Калининград, Россия, 236041, *e-mail:* **yu.koroleff@yandex.ru**

Yuri A. Spirin[1], **Sergey I. Zotov**[2], **Veronika S. Taran**[3], **Yulia V. Koroleva**[4]

EVALUATION OF SPATIAL FEATURES OF POLLUTION OF RIVERS IN THE SOUTH-EASTERN PART OF THE KALININGRAD REGION

ABSTRACT

The rivers of the south-eastern part of the Kaliningrad region: Angrapa, Pissa, Krasnaya, Russkaya are highly vulnerable to natural and anthropogenic impacts, have the first and highest category of fishery purposes, and are distinguished by their transboundary status. Monitoring of the ecological state of watercourses is fragmentary and does not meet modern requirements. In connection with the noted features, they are of great interest for research. For each watercourse, 4 points were identified from the headwaters to the mouth, in which hydrological parameters were measured in the autumn hydrological season and water samples were taken for chemical analysis. The multiplicity of exceeding the MPC for a large list of chemical elements was calculated, the WPI and the corresponding class of water quality in the studied rivers were determined. Mapping was carried out and spatial differentiation of the WPI, the multiplicity of exceeding the MPC for dissolved oxygen, BOD5, nitrites, ammonium, iron, oil products was revealed. The results of the study showed that the water quality in the studied rivers is in an unsatisfactory state. The identified spatial pollution is formed in the traditional way — the quality of water from the source to the mouth is deteriorating. The main indicator that contributes to the pollution of watercourses is oil products, which emphasizes the potential anthropogenic impact (the multiplicity of exceeding the MPC varies in a wide range — from 2.80 to 124.60 (for all samples)). Sharp changes in this indicator occur after watercourses pass through large cities by the standards of the study area. In second place is the iron index, which makes a serious contribution to the overall picture of pollution (excess ratios for iron — from 1.94 to 48.49 (for all samples)), which is due to the high concentrations of this ingredient in the groundwater that feeds the rivers. Biogenic pollutants represented by ammonium and nitrite are evenly distributed, which is presumably due to their agricultural origin (from 1.12 to 11.28 times for ammonium [for 5 out of 16 samples] and from 1.38 to 7.38 for nitrite [for 7 out of 16 samples]).

KEYWORDS: anthropogenic impacts, hydrological season, hydrochemical analysis, water quality, river damage mapping

ВВЕДЕНИЕ

Калининградская область — это один из уникальных субъектов в Российской Федерации. Речная сеть здесь имеет особую значимость, поскольку именно за счет нее покрывается большая часть спроса на водные ресурсы в регионе. Рост индустриализации и урбанизации наложил свой отпечаток на современное экологическое состояние водотоков в Калининградской области [*Нагорнова* и др., 2011; 2014; *Нагорнова*, 2012; *Ахмедова* и др.,

[1] Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Department of Meteorology and Climatology, 12, Pryanishnikova str., Moscow, 127550, Russia, *e-mail:* **spirin.yuriy@rambler.ru**

[2] Immanuel Kant Baltic Federal University, Institute of Living Systems, 2, Universitetskaya str., Kaliningrad, 236041, Russia, *e-mail:* **zotov.prof@gmail.com**

[3] Immanuel Kant Baltic Federal University, Institute of Living Systems, 2, Universitetskaya str., Kaliningrad, 236041, Russia, *e-mail:* **ronya.volkova@yandex.ru**

[4] Immanuel Kant Baltic Federal University, Institute of Living Systems, 2, Universitetskaya str., Kaliningrad, 236041, Russia, *e-mail:* **yu.koroleff@yandex.ru**

2015; *Зотов* и др., 2021; *Зотов, Спирин,* 2022]. Современное состояние водных объектов на рассматриваемой территории по большей части оценивается как загрязненное[1].

Для принятия решений в формировании стратегии водоохранных и водозащитных мероприятий нужно иметь массивы гидрохимических данных по водным объектам, что часто является дефицитной информацией. Сезонный мониторинг за гидрохимическими показателями водотоков — наиболее эффективный инструмент при анализе экологической обстановки на водосборах.

Объектом нашего исследования выбраны реки Юго-Восточной части Калининградской области, относящиеся к бассейну р. Анграпы. Это рр. Писса, Красная, Русская и непосредственно сама р. Анграпа (рис. 1). На представленных водотоках мониторинг загрязнения вод ведется фрагментарно, сезонный мониторинг отсутствует. Цель работы — собрать необходимую гидрохимическую информацию по водотокам в бассейне р. Анграпы, построить и проанализировать картосхемы уровней химического загрязнения.

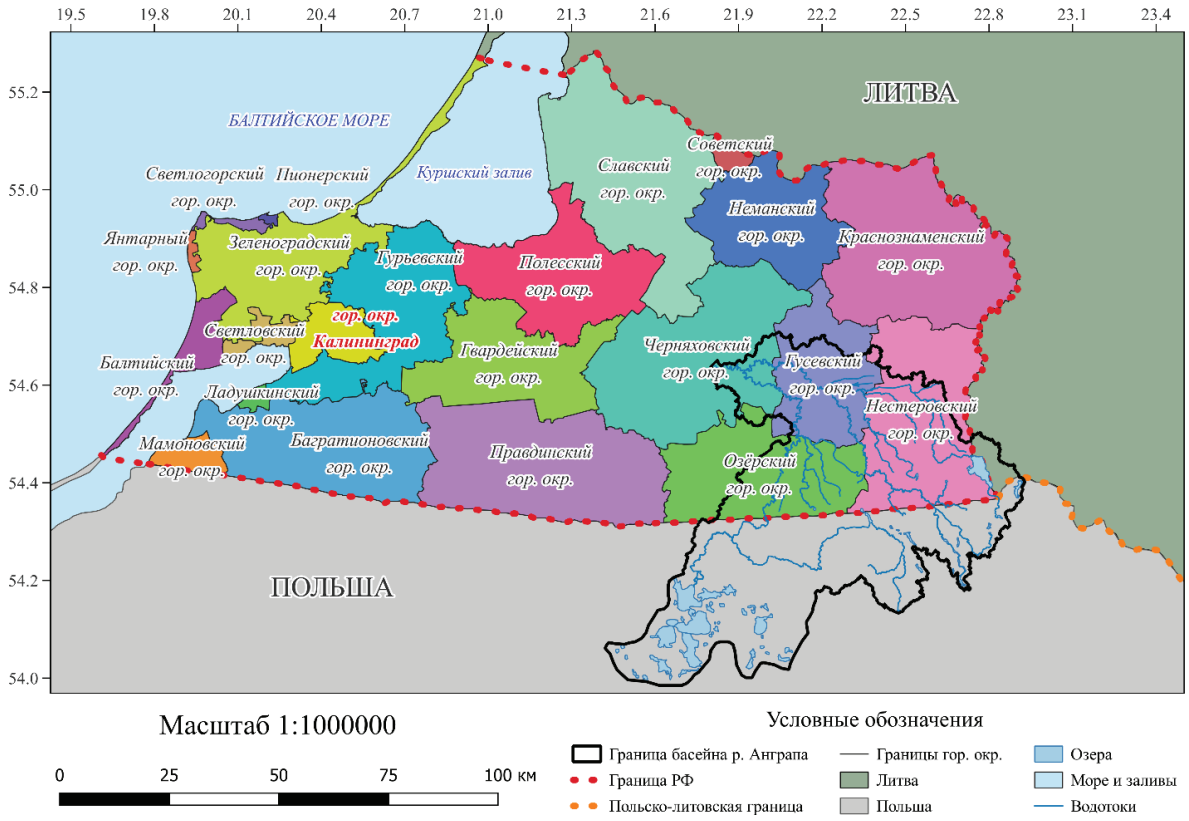


Рис. 1. Картосхема водосборного бассейна р. Анграпы относительно РФ (Калининградской области и ее муниципалитетов), Литвы и Польши
Fig. 2. Map of the drainage basin of the Angrapa River regarding Russian Federation (Kaliningrad Region and its municipalities), Lithuania and Poland

Изучаемые водотоки бассейна р. Анграпе имеют ряд географических особенностей, представляющих интерес для исследования:

1) Наблюдается большой перепад высот по всей изучаемой территориии (от 0 м до 287 м БС), который является следствием того, что одна половина бассейна р. Анграпы

[1] Государственный доклад «Об экологической обстановке в Калининградской области в 2021 г.». Калининград: ВИА Калининград, 2022. 51 с.

располагается на низменности, а вторая половина на возвышенности. В границах исследуемого бассейна расположен крупный лесной массив, имеющий статус особо охраняемой природной территории — природный парк «Виштинецкий». Изучаемые водотоки имеют первую и высшую категорию рыбохозяйственного назначения и обладают большой уязвимостью к природным и антропогенным воздействиям.

2) Бассейн р. Анграпы располагается на территории 3 стран: Российская Федерация, Польша, Литва. Реки Анграпа и Красная являются трансграничными, истоки и верховья их расположены на территории Польши и в намного меньшей части Литвы, со всеми потенциальными рисками дополнительного загрязнения с ее стороны.
3) Бассейн р. Анграпы расположен на территории 4 муниципалитетов Калининградской области (Гусевский, Нестеровский, Черняховский и Озерский городские округа), которые ведут активную хозяйственную деятельность. Основным можно считать сельское хозяйство и сопряженные с ним сектора: животноводство, растениеводство, овощеводство, пищевое производство и промышленность, нацеленная на переработку сельскохозяйственной продукции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор водотоков для гидрохимического анализа осуществлялся таким образом, чтобы дать точную сравнительную картину пространственной динамики содержания загрязняющих веществ. Построение такого пространственного распределения загрязнений в полной мере позволит проводить идентификацию влияния на гидрохимические показатели природных и антропогенных факторов на разных участках водосборного бассейна. Природно-хозяйственные особенности[1] с большой вероятностью свидетельствуют о том, что поступление загрязняющих веществ в реки носит диффузный характер. Вследствие этого принято решение определить по 4 точки для измерения гидрологических параметров и отбора проб воды для химических анализов в следующих природно-антропогенных ландшафтах: верховье на территории РФ (1), граница лесных и сельскохозяйственных угодий (2), граница сельскохозяйственных угодий и крупных населенных пунктов (3), устья водотоков (4). Выбранные реки и точки отбора проб представлены на рис. 2 и в табл. 1.

Выезд для исследования водотоков в осеннем гидрологическом сезоне осуществлен 15.10.2022. В процессе выезда измерены скорость течения и средняя глубина рек, в полевых условиях определены цветность, запах, мутность (ЕМФ — единицы мутности по формазину), температура, кислотный остаток воды и отобраны пробы воды для последующих химических анализов. Химические анализы проб проводились в лаборатории высшей школы живых систем БФУ им. И. Канта на перечень важнейших показателей. *Органолептические показатели* определены в соответствии с ГОСТ Р 57164-2016, *взвешенные вещества* — в соответствии с РД 52.24.468-2019, *химическое потребление кислорода* (*ХПК)* — ПНД Ф 14.1:2:4. 190-2003, *биологическому потреблению кислорода за 5 суток* (*БПК*$_5$*)* — ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97, *нитраты* — ПНД Ф 14.1:2.4-95, *нитриты* — ПНДФ 14.1:2:4.3-95, *аммоний и аммонийный азот* — ПНД Ф 14.1:2.1-95, *фосфаты* — ПНД Ф 14.1:2.1-95, *сухой остаток* — ПНД Ф 14.1:2:4.261-2010, *хлориды* — ГОСТ 4245-72, *сульфаты* — ПНД Ф 14.1:2.159-2000, *натрий, магний, калий, кальций* — ПНД Ф 14.1:2.159-2000, *железо* — ПНД Ф 14.1:2.159-2000, *нефтепродукты* — ПНД Ф 14.1:2.116-97. Химические анализы проведены с помощью прибора двухлучевой спектрофотометрии UV-1800 Shimadzu и системы капиллярного электрофореза «КАПЕЛЬ-105М».

[1] Государственный доклад «Об экологической обстановке в Калининградской области в 2021 г.». Калининград: ВИА Калининград, 2022. С. 6–80.

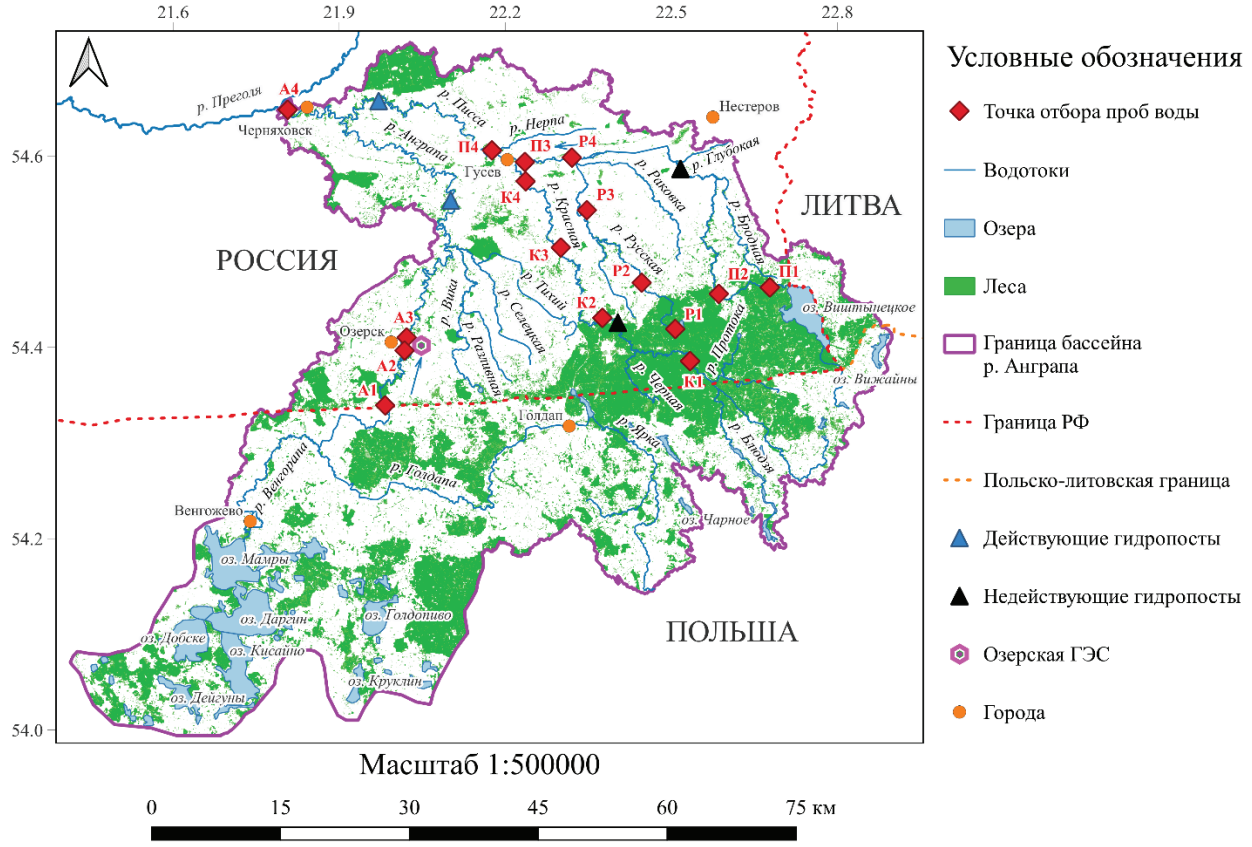


Рис. 2. Картосхема расположения исследуемых водотоков и локация точек отбора проб воды
Fig. 2. Map of the location of the researched watercourses and the location of water sampling points

Табл. 1. Выбранные реки и локация точек проб воды
Table 1. Selected rivers and location of water sampling points

№	р. Анграпа (А)	р. Писса (П)	р. Красная (К)	р. Русская (Р)
1	п. Междулесье	п. Ягодное	п. Радужное	п. Пугачево
2	с. Минское	п. Калинино	п. Токаревка	п. Чистые пруды
3	г. Озерск	п. Брянское	п. Ольховатка	п. Новостроевка
4	г. Черняховск	г. Гусев	п. Липово	п. Подгоровка

На основе полученных показателей рассчитаны кратности превышения предельной допустимой концентрации (ПДК), индекса загрязнения воды (ИЗВ) и соответствующий ему класс качества воды (табл. 2) в исследуемых реках. Расчет ИЗВ проводился по формуле для поверхностных вод суши:

$$ИЗВ = (\sum_{i=1}^{6} \frac{C_i}{ПДК_i}) / 6 \quad (1),$$

где C_i — наибольшие относительно ПДК концентрация i-го загрязняющего вещества в воде с обязательным учетом растворенного кислорода и $БПК_5$;
ПДК — предельно допустимая концентрация i-го загрязняющего вещества.

Табл. 2. Классы качества воды в зависимости от значения индекса загрязнения воды[1]
Table 2. Water quality classes depending on the value of the water pollution index

Классификация	Значения ИЗВ	Классы качества воды
Очень чистые	менее или равно 0,2	I
Чистые	более 0,21–1,0	II
Умеренно загрязненные	1,1–2,0	III
Загрязненные	2,1–4,0	IV
Грязные	4,1–6,0	V
Очень грязные	6,1–10,0	VI
Чрезвычайно грязные	>10,1	VII

В работе использовались совмещенные списки ПДК загрязняющих веществ: ПДК$_1$[2] и ПДК$_2$[3] (табл. 3). Расчеты проводятся исходя из самого строгого показателя в представленном списке.

Границы водосборов исследуемых рек построены на базе SRTM снимков в программном пакете SAGA GIS с использованием стандартного встроенного инструментария [*Ермолаев* и др., 2018; *Чумаченко* и др., 2018; *Балдаков, Кудишин* и др., 2019; *Lata*, 2020].

При помощи ландшафтно-бассейнового подхода были построены схемы пространственной дифференциации ИЗВ и основных загрязняющих веществ [*Нагорнова*, 2012; *Джамалов* и др., 2019; *Lämmchen* et al., 2021; *Зотов*, *Спирин*, 2022]. Бассейн р. Анграпы был разделен на 4 суббассейна, а они в свою очередь поделены на 4 участка, что соответствует количеству выбранных точек отбора проб воды. При формировании границ участков соблюдалась та же логика, что при выборе точек мониторинга. Стоит учесть, что в этом процессе более важна четкая визуализация распространения загрязнений в пространстве и выявление потенциального вектора возможных закономерностей относительно антропогенных и природных факторов для дальнейшего анализа сложившейся ситуации в бассейне, нежели высокая точность.

---

1 Временные методические указания по комплексной оценке качества поверхностных и морских вод по гидрохимическим показателям. Утв. Госкомгидрометом СССР 22.09.1986 г. № 250-1163. 5 с.

2 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (с изменениями на 10 марта 2020 г.)». Электронный ресурс: http://docs.cntd.ru/document/420389120 (дата обращения 29.03.20).

3 СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения». Электронный ресурс: http://docs.cntd.ru/document/901798042 (дата обращения 29.03.20).

Табл. 3. Совмещенный список ПДК
Table 3. Combined list of MPCs

Наименование показателя	$ПДК_1$	$ПДК_2$	Наименование показателя	$ПДК_1$	$ПДК_2$
Цветность, градусы	–	20	Аммоний, мг/л	0,5	1,5
Запах, баллы	–	2	Фосфаты, мг/л	0,05	3,5
Мутность, ЕМФ	–	2	Хлориды, мг/л	300	350
Температура воды, °С	–	–	Сульфаты, мг/л	100	500
pH, ед	фон	6–9	Натрий, мг/л	120	200
Взвеш. вещества, мг/л	–	–	Магний, мг/л	40	–
Растворенный O_2, мг/л	≥ 6	–	Железо общее, мг/л	0,1	0,3
ХПК, мг/л	–	15	Нефтепродукты, мг/л	0,05	0,1
$БПК_5$, мг/л	2,1	–	Соленость, мг/л	–	–
Нитраты, мг/л	40	45	Калий, мг/л	50	–
Нитриты, мг/л	0,08	3	Кальций, мг/л	180	–

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Во время полевого выезда, проведенного в середине осеннего гидрологического сезона, отмечен низкий уровень воды в реках, что типично для Калининградской области и подтверждается исследованиями водного режима водотоков региона [*Наумов*, *Ахмедова*, 2017; *Наумов*, 2020]. Режим межени рек обусловлен небольшим количеством атмосферных осадков, выпавших в летний и ранний осенний сезоны. Эту особенность нужно учитывать при анализе массового содержания загрязняющих веществ, поскольку концентрация их в водоеме получается выше. В день отбора проб температура атмосферного воздуха в среднем составляла 14 °С, давление 761 мм рт. ст., ветер юго-западный, влажность воздуха 85 %, ясно и без осадков. Русла рек в устьевой части преимущественно землистые, в истоковой части — илистые. Глубина в основной части отбора проб небольшая (в среднем в интервале 58–80 см), связана с продолжающимся периодом летней межени. По точке отбора проб «Р1» нет химических данных, поскольку вода в данном водотоке отсутствовала, и невозможно было осуществить отбор проб воды. Результаты полевых и лабораторных химических анализов представлены в таблице 4, точки маркированы в соответствии с картосхемой на рисунке 2.

На основании полученных данных рассчитаны кратность превышения ПДК, ИЗВ и определен класс качества воды в исследуемых водотоках. Результаты сведены в единую табл. 5; отдельно выделены полужирным шрифтом те загрязняющие вещества, которые легли в основу расчета ИЗВ. Построена пространственная дифференциация ИЗВ в бассейне р. Анграпы (рис. 3.).

Как можно видеть из таблицы 5 и рисунка 3, исследуемый водосбор подвержен серьезным загрязнениям, класс качества воды варьируется от «загрязненной» до «чрезвычайно грязной». Фиксируется классическая картина загрязнения водотоков от истока к устью, где урбанизация вместе с сельскохозяйственными землями выступают основными потенциальными источниками загрязнения, т. к. именно после пересечения зон их расположения качество воды ухудшается. Проанализируем ситуацию в каждом из суббассейнов.

Табл. 4. Гидрохимические показатели водотоков водосборного бассейна р. Анграпы
Table 4. Hydrochemical indicators of watercourses in the catchment area of the river Angrapa

Водотоки	**р. Анграпа**				**р. Писса**				**р. Русская**				**р. Красная**			
Точки отбора	А1	А2	А3	А4	П1	П2	П3	П4	Р1	Р2	Р3	Р4	К1	К2	К3	К4
Цветность, градусы	10	10	20	10	15	5	25	20	–	35	30	20	10	10	5	10
Запах, баллы	1	2	0	0	0	0	3	2	–	2	2	2	1	0	0	0
Мутность, мг/л	15	10	15	10	15	4	16	18	–	19	15	20	15	5	6	10
t воды, °С	9,6	12,2	12,0	12,7	12,1	13,6	12,2	11,5	–	13,6	13,5	13,4	9,0	11,9	11,5	11,8
pH, ед	7,9	7,0	7,2	7,1	7,9	7,3	7,6	7,3	–	8,1	7,8	7,2	8,0	8,0	8,1	7,8
Взвеш. вещ., мг/л	1,95	1,40	18,67	1,91	1,12	15,34	11,12	15,77	–	29,35	5,73	4,95	12,05	13,17	10,85	13,82
Раств. O_2, мг/л	7,57	6,91	6,54	7,05	7,31	7,56	6,88	7,47	–	2,44	3,51	3,02	7,52	6,98	6,81	8,09
ХПК, мг/л	8,51	13,66	13,20	11,25	5,74	13,38	11,15	9,32	–	13,20	39,16	18,75	6,32	8,37	5,13	18,83
$БПК_5$, мг/л	6,85	6,90	6,68	5,74	10,14	12,27	5,69	4,81	–	6,68	19,14	9,34	3,83	4,36	2,80	9,37
Нитраты, мг/л	0,328	0,258	0,754	1,442	0,814	0,998	0,771	0,762	–	0,731	0,572	0,489	0,415	0,418	1,568	0,451
Нитриты, мг/л	0,59	0,12	0,12	0,03	0,01	0,43	0,15	0,14	–	0,01	0,01	0,01	0,11	0,01	0,01	0,32
Аммоний, мг/л	0,56	1,61	1,16	1,12	1,16	1,09	1,44	1,40	–	5,64	3,36	3,30	1,06	0,24	0,76	1,38
Фосфаты, мг/л	0,017	0,067	0,077	0,012	0,027	0,032	0,092	0,081	–	0,058	0,080	0,079	0,012	0,252	0,068	0,109
Сухой остаток, мг/л	0,35	2,55	0,23	0,45	0,13	2,45	0,58	0,95	–	6,63	3,41	8,15	0,57	0,45	1,32	0,63
Хлориды, мг/л	96,61	64,37	71,65	213,4	67,05	65,02	57,81	56,07	–	224,15	21,90	74,68	69,61	53,02	90,01	60,11
Сульфаты, мг/л	121,1	99,7	104,2	185,5	127,1	141,2	80,1	76,1	–	69,2	16,37	117,3	84,5	126,0	130,1	113,1
Натрий, мг/л	6,37	5,67	9,18	7,51	2,66	3,09	5,17	6,34	–	16,77	9,72	38,66	4,40	5,45	4,13	5,59
Магний, мг/л	8,21	7,59	9,44	6,42	5,41	5,72	6,73	8,40	–	11,72	14,84	17,28	8,41	9,03	7,91	10,33
Железо, мг/л	0,214	0,194	0,797	0,734	0,312	0,872	0,729	0,836	–	3,572	4,849	2,879	0,996	0,745	0,849	0,815
Нефтепродукты, мг/л	0,31	0,64	1,25	3,65	0,18	0,14	6,23	3,71	–	2,15	3,31	5,59	0,14	0,65	0,18	0,85
Соленость, мг/л	0,40	0,42	0,43	0,44	0,25	0,26	0,31	0,38	–	0,72	0,79	0,85	0,41	0,44	0,44	0,42
Калий, мг/л	2,86	2,55	3,10	2,94	1,97	1,36	2,28	4,26	–	5,91	1,91	8,67	1,10	2,02	5,16	1,99
Кальций, мг/л	45,73	41,12	50,57	33,47	27,80	30,32	35,80	49,09	–	60,97	112,90	86,65	51,5	44,96	48,37	61,67

193

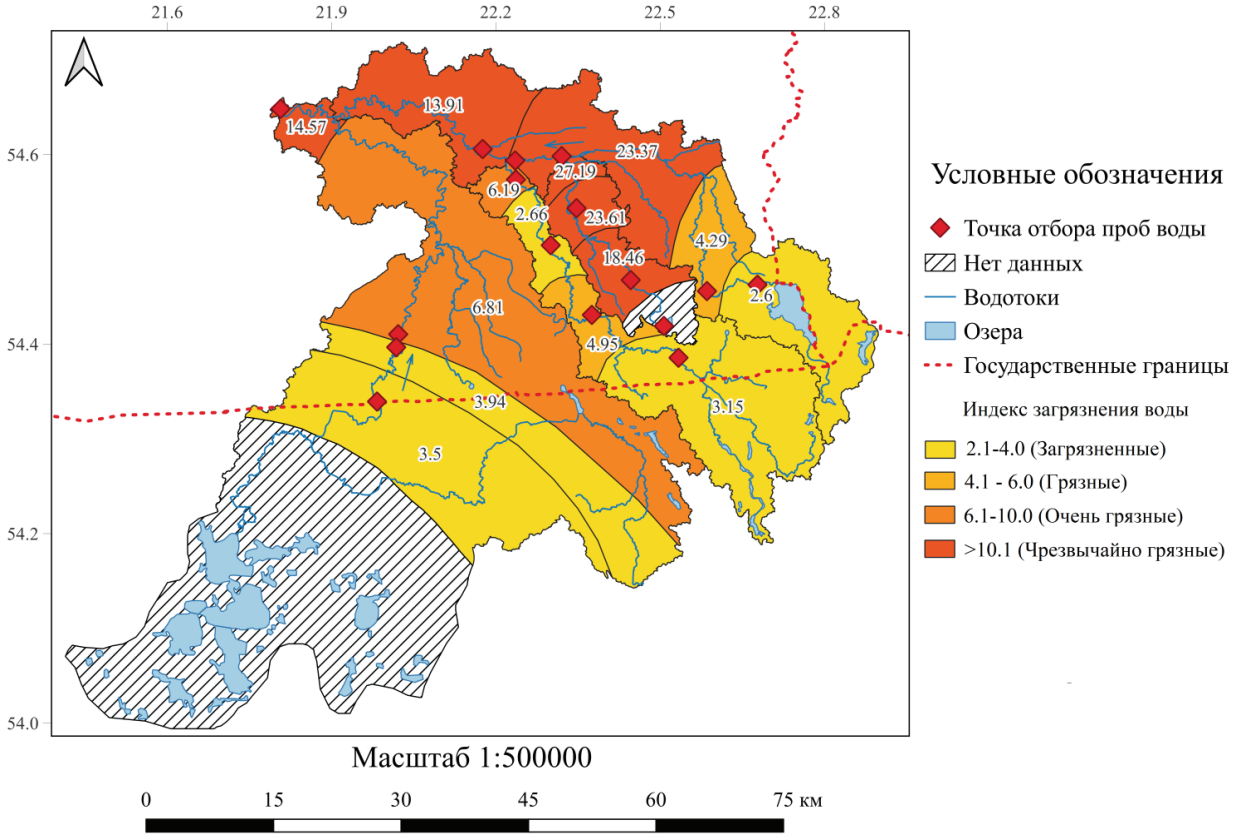


Рис. 3. Пространственная дифференциация ИЗВ в бассейне р. Анграпы
Fig. 3. Spatial differentiation of the WPI in the basin of the Angrapa River

В суббассейне р. Анграпы средний показатель ИЗВ равен 7.21, что соответствует классу качества воды «очень грязная». На приграничном участке в точке А1 ИЗВ равняется 3.50, а при переходе участка из точки А1 в точку А2, наблюдается незначительно ухудшение качества воды, ИЗВ увеличилось с 3.50 до 3.94. При переходе из точки А2 в точку А3 произошло более закономерное и весомое увеличение ИЗВ, т. к. точка А2 расположена перед вхождением водотока в г. Озерск, а точка А3 уже после выхода из его границ. Это привело к увеличению ИЗВ с 3.94 до 6.81. Та же история с переходом зоны в точке А3 в зону точки А4, только вместо г. Озерск, там расположен более крупный г. Черняховск, что привело к росту ИЗВ с 6.81 до 14.57.

В суббассейне р. Красной средний показатель ИЗВ равен 4.24, что соответствует классу качества воды «грязная». Здесь загрязнение распределено в своеобразном шахматном порядке, а основным триггером к увеличению ИЗВ стали высокие концентрации нефтепродуктов, а в точке К2 — еще и фосфатов. Точки К1 и К3 имеют сравнительно низкие показатели ИЗВ — 3.15 и 2.66, в это же время в точках К2 и К4 более высокие показатели — 4.95 и 6.19. Если причину роста в зоне отбора проб в точке К4 можно объяснить наличием рядом г. Гусева, то причину такого роста в точке К2 выяснить на данном этапе исследования не удалось, особенно с учетом того, что в следующей точке К3 загрязнение снизилось почти в 2 р. Также не совсем понятно, почему в точке К1, где расположено верховье водотока и крупный лесной массив, качество воды чуть хуже, чем в точке К3, которая находится в менее благоприятных условиях (после загрязненной зоны в точке К2). Несмотря на это, р. Красная — самая чистая из исследуемых рек, потому что в ее бассейне нет явных источников загрязнения и воздействует благоприятный природный фактор в виде лесного массива в верховье реки.

Табл. 5. Кратность превышения ПДК, ИЗВ и класс качества воды в исследуемых водотоках
Table 5. Multiplicity of exceeding MPC, WPI and water quality class in the studied watercourses

Водотоки	**р. Анграпа**				**р. Писса**				**р. Русская**				**р. Красная**			
Точки отбора	А1	А2	А3	А4	П1	П2	П3	П4	Р1	Р2	Р3	Р4	К1	К2	К3	К4
pH, ед	0,99	0,88	0,90	0,89	0,99	0,91	0,95	0,91	–	1,01	0,98	0,90	1,00	1,00	1,01	0,98
Раств. O_2, мг/л	**0,79**	**0,87**	**0,92**	**0,85**	**0,82**	**0,79**	**0,87**	**0,80**	–	**16,39**	**8,55**	**9,93**	**0,80**	**0,86**	**0,88**	**0,74**
ХПК, мг/л	0,57	0,91	0,88	0,75	0,38	0,89	0,74	0,62	–	0,88	2,61	1,25	0,42	0,56	0,34	1,26
$БПК_5$, мг/л	**3,26**	**3,29**	**3,18**	**2,73**	**4,83**	**5,84**	**2,71**	**2,29**	–	**3,18**	**9,11**	**4,45**	**1,82**	**2,08**	**1,33**	**4,46**
Нитраты, мг/л	0,01	0,01	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	–	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,01
Нитриты, мг/л	**7,38**	**1,50**	1,50	0,38	0,13	**5,38**	**1,88**	**1,75**	–	0,13	0,13	0,13	**1,38**	0,13	0,13	**4,00**
Аммоний, мг/л	1,12	**3,22**	**2,32**	**2,24**	**2,32**	**2,18**	**2,88**	**2,80**	–	**11,28**	**6,72**	**6,60**	**2,12**	0,48	**1,52**	**2,76**
Фосфаты, мг/л	0,34	1,34	**1,54**	0,24	0,54	0,64	1,84	1,62	–	**1,16**	**1,60**	**1,58**	0,24	**5,04**	**1,36**	2,18
Хлориды, мг/л	0,32	0,21	0,24	0,71	0,22	0,22	0,19	0,19	–	0,75	0,07	0,25	0,23	0,18	0,30	0,20
Сульфаты, мг/л	**1,21**	1,00	1,04	**1,86**	**1,27**	1,41	0,80	0,76	–	0,69	0,16	1,17	0,85	**1,26**	1,30	1,13
Натрий, мг/л	0,05	0,05	0,08	0,06	0,02	0,03	0,04	0,05	–	0,14	0,08	0,32	0,04	0,05	0,03	0,05
Магний, мг/л	0,21	0,19	0,24	0,16	0,14	0,14	0,17	0,21	–	0,29	0,37	0,43	0,21	0,23	0,20	0,26
Железо, мг/л	**2,14**	**1,94**	**7,97**	**7,34**	**3,12**	**8,72**	**7,29**	**8,36**	–	**35,72**	**48,49**	**28,79**	**9,96**	**7,45**	**8,49**	**8,15**
Нефтепродукты, мг/л	**6,20**	**12,80**	**25,00**	**73,00**	**3,60**	**2,80**	**124,60**	**74,20**	–	**43,00**	**66,20**	**111,80**	**2,80**	**13,00**	**3,60**	**17,00**
Калий, мг/л	0,06	0,05	0,06	0,06	0,04	0,03	0,05	0,09	–	0,12	0,04	0,17	0,02	0,04	0,10	0,04
Кальций, мг/л	0,25	0,23	0,28	0,19	0,15	0,17	0,20	0,27	–	0,34	0,63	0,48	0,29	0,25	0,27	0,34
ИЗВ	3,50	3,94	6,81	14,67	2,66	4,29	23,37	13,91	–	18,46	23,61	27,19	3,15	4,95	2,86	6,19
Класс качества воды	IV	IV	VI	VII	IV	V	VII	VII		VII	VII	VII	IV	V	IV	VI

195

В суббассейне р. Русской средний показатель ИЗВ равен 23.09, что соответствует классу качества воды «очень грязная». Здесь наблюдается равномерное снижение качества воды от точки Р2 (ИЗВ = 18.46) до точки Р4 (ИЗВ = 27.19). В связи с этим складывается интересная ситуация по отношению к р. Красной. Обе реки расположены в небольшой удаленности друг от друга, протекают в благоприятной зоне, с низким уровнем урбанизации, промышленности и сельского хозяйства, берут свое начало из крупного лесного массива (что, как показывает практика, позитивным образом влияет на качество воды), имеют схожие гидрологические характеристики. При этом р. Красная демонстрирует наименьшую загрязненность из рассмотренных водотоков, в то время как р. Русская, напротив, наибольшую. Исследования, которые будут проведены в следующие гидрологические сезоны, вероятно, позволят ответить на этот вопрос.

В суббассейне р. Писсы средний показатель ИЗВ равен 11.04, что соответствует классу качества воды «очень грязная». Точка П1 расположена в верховье реки, внутри лесного массива около о. Виштынецкое. Такие условия должным образом отразились на качестве воды в реке — ИЗВ составило 2.60, что является наилучшим показателем из всех 16 точек. При выходе из лесного массива, в зоне точки П2, ИЗВ увеличилось до 4.29. Перед входом реки в г. Гусев (точка П3) качество воды значительно ухудшилось, что можно объяснить тем, что в этой локации впадает р. Русская, имеющая схожий расход и очень высокий уровень загрязнения. После прохождения городской черты (точка П4) качество воды улучшилось почти в 2 р., это можно связать с тем, что на этой территории впадает р. Красная, которая, как и р. Русская, имеет схожий с р. Писса расход воды, но в отличие от нее — более высокое качество воды. Это послужило тому, что качество воды в р. Писса до города хуже, чем после него. Такие выводы позволяет сделать то, что К4 и Р4 расположены в местах впадения соответствующих данным маркировкам рек в р. Писса, а П3 и П4 расположены рядом с ними.

С целью детализации ситуации с загрязнениями была построена дифференциация по 6 основным показателям, которые легли в основу почти каждого расчета индекса загрязнения воды. Для этого построим картосхемы пространственного распределения кратности превышения ПДК по ним (рис. 4).

Основным показателем, который вносит свой вклад в загрязнение водотоков, являются нефтепродукты, что подчеркивает потенциальное антропогенное влияние. Резкие изменения по этому показателю происходят после прохождения водотоками крупных по меркам района исследования городов.

На втором месте находятся показатель железа, вносящий серьезный вклад в общую картину загрязнения, что обусловлено высокими концентрациями этого ингредиента в подземных водах, питающих реки [*Глущенко*, 2008; *Валл*, *Ахмедова*, 2021]. Это наблюдается и на рис. 4, где подобное распределение загрязнения можно сопоставить с рельефом — чем ниже отметка, тем больше концентрация железа, т. к. выше влияние обогащенных железом грунтовых вод в питании реки. Но над этим предположением стоит более детально поработать в следующих исследованиях.

Биогенные загрязнения, представленные аммонием и нитритами, распределены равномерно, что предположительно связано с их сельскохозяйственным происхождением. Зачастую источником такого рода загрязнения в регионе выступают вносимые на пахотных землях азотные удобрения или их остатки [*Зотов*, *Спирин*, 2022]. Сельскохозяйственные угодья в равной степени распространены по всей площади водосбора. Превышения $БПК_5$ и растворенного кислорода также имеют равномерный неярко выраженный характер. Исключением может считаться только р. Русская, где скорее всего из-за общей загрязненности эти показатели хуже, чем у других исследуемых рек.

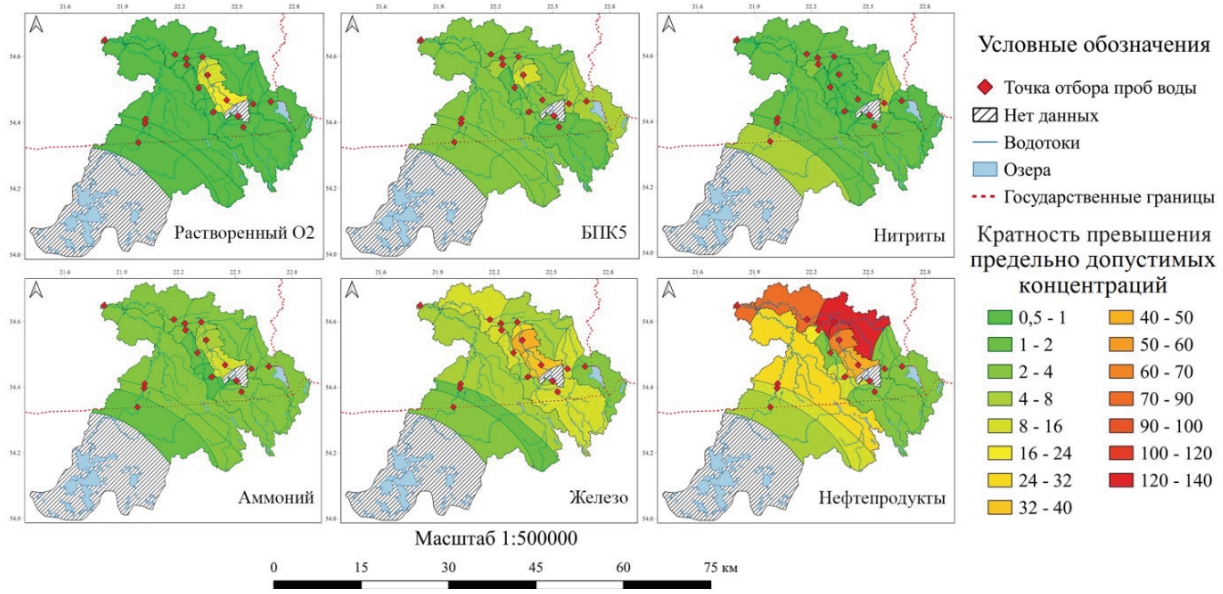


Рис. 4. Картосхемы пространственного распределения кратности превышения ПДК в бассейне р. Англрапы по растворенному кислороду, БПК$_5$, нитритам, аммонию, железу, нефтепродуктам

Fig. 4. Maps of the spatial distribution of the multiplicity of exceeding the MPC in the basin of the Angrapa River for dissolved oxygen, BOD5, nitrites, ammonium, iron, oil products

ВЫВОДЫ

Качество воды в изучаемых реках находится в неудовлетворительном состоянии, несмотря на благоприятные природные условия и местами низкую антропогенную нагрузку присутствующую на большей его части. По точкам отбора проб класс качества воды характеризуется следующим образом: загрязненные (А1–А2–П1–К1–К2), грязные (П2–К2); очень грязные (К3–К4); чрезвычайно грязные (А4–П3–П4–Р2–Р3–Р4). Общая картина загрязнения (за исключением некоторых нюансов) складывается традиционным образом — качество воды от истока к устью ухудшается.

Резкому росту концентраций загрязняющих веществ теоретически способствуют расположенные вдоль русла рек города. На объекте исследования таких городов три: Черняховск, Озерск, Гусев. Также одним из потенциальных загрязнителей можно считать сельскохозяйственный сектор. Но поскольку сельское хозяйство имеет цикличный характер, более детально загрязнение от него можно будет разобрать в весенний и летний гидрологические сезоны. Необходимо упомянуть и о грунтовых водах, сильно влияющих на уровень железа в водотоках.

В качестве основного загрязнителя можно выделить нефтепродукты, кратность превышения ПДК которых колеблется в широком диапазоне — от 2.80 до 124.60 (по всем пробам). Отмечаемые кратности превышения по железу — от 1.94 до 48.49 (по всем пробам). Зафиксированы кратности превышения по биогенным элементам. Превышения концентраций аммония и нитритов хоть и на порядок ниже, чем у нефтепродуктов и железа, но все же остаются достаточно высокими: от 1.12 до 11.28 кратности по аммонию (по 5 из 16 пробам) и от 1.38 до 7.38 по нитриту (по 7 из 16 пробам). Зафиксировано 5-кратное превышение по фосфатам в точке К2.

Проведенное исследование можно считать первым из запланированного авторским коллективом цикла, приуроченного к оценке геоэкологического состояния водотоков Юго-

Восточной части Калининградской области в рамках написания кандидатской диссертации Таран В.С. Исследования рек в последующие гидрологические сезоны позволят выявить уже пространственно-временную динамику загрязнений и более точно определить их причины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ахмедова Н.Р., Великанов Н.Л., Наумов В.А. Оценка качества воды малых водотоков Калининградской области. Вода: химия и экология, 2015. № 10. С. 19–24.

Балдаков Н.А., Кудишин А.В. Автоматизация расчета характеристик водосборного бассейна для решения задач моделирования поверхностного стока. Интерэкспо Гео-Сибирь, 2019. Т. 4. № 1. С. 83–89.

Валл Е.В., Ахмедова Н.Р. Эколого-гидрохимические исследования малых водотоков Калининградской области. Вестник науки и образования Северо-Запада России, 2021. Т. 7. № 4. С. 33–37.

Глущенко А.И. Экологическое состояние и качество подземных вод Калининградского скважинного водозабора. Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки, 2008. № 1. 28 с.

Джамалов Р.Г., Мироненко А.А., Мягкова К.Г., Решетняк О.С. и др. Пространственно-временной анализ гидрохимического состава и загрязнения вод в бассейне Северной Двины. Водные ресурсы, 2019. Т. 46. № 2. С. 149–160.

Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Мухарамова С.С., Хомяков П.В., Шынбергенов Е.А. Картографическая модель бассейновых геосистем малых рек водосбора реки Лены. Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки, 2018. Т. 160. № 1. С. 126–144.

Зотов С.И., Спирин Ю.А. Оценка геоэкологического состояния малых водотоков польдерных земель: методический подход и картографическое обеспечение. ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2022. Т. 28. № 2. С. 597–613.

Зотов С.И., Спирин Ю.А., Таран В.С., Королева Ю.В. Гидрологические особенности и геоэкологическое состояние малых водотоков польдерных территорий Калининградской области. Географический вестник, 2021. № 3 (58). С. 92–106.

Нагорнова Н.Н. Геоэкологическая оценка состояния малых водотоков Калининградской области. Дисс. … канд. геогр. наук. Калининград, 2012. С. 8–19.

Нагорнова Н.Н., Берникова Т.А., Цупикова Н.А. Гидрогеохимическая характеристика малых рек Калининградской области. Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки, 2011. № 7. С. 160–166.

Нагорнова Н.Н., Берникова Т.А., Цупикова Н.А. Формирование гидрологических особенностей малых рек в физико-географических условиях Калининградской области на примере р. Прохладной. Вестн. РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности, 2014. № 4. С. 70–77.

Наумов В.А. Внутригодовое распределение стока рек Калининградской области в 2020 г. Вестник науки и образования Северо-Запада России, 2022. Т. 8. № 3. С. 35–44.

Наумов В.А., Ахмедова Н.Р. Инженерные изыскания в бассейне реки Преголи. Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2017. С. 112–122.
Чумаченко А.Н., Хворостухин Д.П., Морозова В.А. Построение гидрологически-корректной цифровой модели рельефа (на примере Саратовской области). Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле, 2018. Т. 18. № 2. С. 104–109.

Lata L. Catchment delineation for Vjosa River WEAP model, using QGIS software. Journal of International Environmental Application and Science, 2020. V. 15 (4). P. 203–215.

Lämmchen M., Klasmeier J., Hernandez-Leal L., Berlekamp J. Spatial modelling of micro-pollutants in a strongly regulated cross-border lowland catchment. Environmental Processes, 2021. V. 8. P. 973–992.

REFERENCES

Akhmedova N.R., Velikanov N.L., Naumov V.A. Assessment of water quality in shallow watercourses in the Kaliningrad region. Water: Chemistry and Ecology, 2015. No. 10. P. 19–24 (in Russian).

Baldakov N.A., Kudishin A.V. Automatic calculation of the calculation of the catchment solution for solving the problem of flow fraud modeling. Interexpo Geo-Siberia, 2019. V. 4. No. 1. P. 83–89 (in Russian).

Chumachenko A.N., Khvorostukhin D.P., Morozova V.A. Building a hydrologically correct digital terrain model (on the territory of the Saratov region). Bulletin of the Saratov University. New episode. Series: Earth Sciences, 2018. V. 18. No. 2. P. 104–109 (in Russian).

Dzhamalov R.G., Mironenko A.A., Myagkova K.G., Reshetnyak O.S. et al. Spatio-temporal analysis of the hydrochemical composition and dissolution of water in the Northern Dvina basin. Water Resources, 2019. V. 46. No. 2. P. 149–160 (in Russian).

Yermolaev O.P., Maltsev K.A., Mukharamova S.S., Khomyakov P.V., Shynbergenov E.A. Cartographic model of basin geosystems of small rivers in the catchment area of the Lena River. Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series, 2018. V. 160. No. 1. P. 126–144 (in Russian).

Glushchenko A.I. Ecological state and quality of underground waters of the Kaliningrad borehole water intake. IKBFU's Vestnik (Bulletin of the I. Kant Baltic Federal University). Series: Natural and Medical Sciences, 2008. No. 1. 28 p. (in Russian).

Lata L. Determination of watershed boundaries for the WEAP model of the Vjosa River using QGIS software. Journal of International Ecological Applications and Science, 2020. V. 15(4). P. 203–215.

Lämmchen M., Klasmeier J., Hernandez-Leal L., Berlekamp J. Spatial modeling of micropollutants in a strictly regulated transboundary lowland watershed. Ecological Processes, 2021. V. 8. P. 973–992.

Nagornova N.N. Geoecological assessment of the state of shallow watercourses in the Kaliningrad Region. Diss. … PhD of geogr. sciences. Kaliningrad, 2012. P. 8–19 (in Russian).

Nagornova N.N., Bernikova T.A., Tsupikova N.A. Hydrogeochemical characteristics of macro-rivers of the Kaliningrad region. IKBFU's Vestnik (Bulletin of the I. Kant Baltic Federal University). Series: Natural and Medical Sciences, 2011. No. 7. P. 160–166 (in Russian).

Nagornova N.N., Bernikova T.A., Tsupikova N.A. Formation of hydrological features of small rivers in the physical and geographical conditions of the Kaliningrad Region on the territory of the river Prokhladnaya. RUDN Journal of Ecology and Life Safety, 2014. No. 4. P. 70–77 (in Russian).

Naumov V.A. Intra-annual accumulation of river runoff in the Kaliningrad Region in 2020. Journal of Science and Education of the North-West of Russia, 2022. V. 8. No. 3. P. 35–44 (in Russian).

Naumov V.A., Akhmedova N.R. Engineering surveys in the Pregolya River basin. Kaliningrad: Kaliningrad State Technical University, 2017. P. 112–122 (in Russian).

Wall E.V., Akhmedova N.R. Ecological and hydrochemical studies of small watercourses in the Kaliningrad region. Journal of Science and Education of the North-West of Russia, 2021. V. 7. No. 4. P. 33–37 (in Russian).

Zotov S.V., Spirin Yu.A. Assessment of the geoecological state of shallow watercourses in polder lands: a methodological approach and cartographic support. InterCarto. InterGIS, 2022. V. 28. No. 2. P. 597–613 (in Russian).

Zotov S.I., Spirin Yu.A., Taran V.S., Koroleva Yu.V. Hydrological features and geoecological state of shallow watercourses of polder observations in the Kaliningrad region. Geographic Bulletin, 2021. No. 3 (58). P. 92–106 (in Russian).

УДК: 338.012 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-201-216**

А.А. Панкратов[1]

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ РОССИЙСКОЙ ИТ-ОТРАСЛИ: КЛЮЧЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ТЕНДЕНЦИИ

АННОТАЦИЯ

Предлагаемое исследование посвящено анализу современного состояния российской ИТ-отрасли, выявлению ключевых тенденций и проблем в рассматриваемой сфере экономики, применяющей современные достижения в области технологий, новые ресурсы коммуникации, осуществляющей сбор, хранение и передачу информации. В рамках статьи прорабатывается вопрос определения видов экономической деятельности, относящихся к ИТ-сектору, а также рассматриваются ключевые результирующие показатели деятельности ИТ-отрасли Российской Федерации, такие как количество ИТ-компаний и их выручка в разрезе ключевых отраслевых направлений ИТ-сектора и субъектов Российской Федерации. Полученные на основании агрегирования статистических данных системы «СПАРК-Интерфакс» результаты сравниваются с существующими оценками и показателями современного состояния ИТ-отрасли Российской Федерации, выявляются проблемы и причины существенных расхождений приводимых оценок из разных источников, а также предлагаются подходы к решению выявленных проблем. В статье отмечается преобладание сервисно-инфраструктурной направленности российской ИТ-отрасли и второстепенное значение производственно-технологической составляющей, что приводит к преобладанию в современных российских исследованиях изучения производных вопросов развития ИТ-сектора — информатизации и цифровизации общества и экономики, развития сети Интернет и предоставления государственных услуг в электронной форме. Анализ территориальной организации российской ИТ-отрасли выявляет проблемы ее сверхконцентрации в наиболее развитых центрах экономической активности и формирует рекомендации для государственной региональной политики, которая должна предусматривать комплекс инструментов, направленных на сглаживание существующих пространственных различий в части локализации и сосредоточения экономического потенциала российской ИТ-индустрии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИТ-отрасль, информационно-коммуникационные технологии, информационное общество, регионы России, территориальная организация

[1] Московский государственный институт международных отношений (университет) МИД Российской Федерации (МГИМО), Проектный офис по внедрению Стратегии развития МГИМО, пр-т Вернадского, д. 76, Москва, Россия, 119454,
e-mail: **pankratov_aleksey_ml@mail.ru**

Alexey A. Pankratov[1]

ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF THE RUSSIAN IT INDUSTRY: KEY ISSUES AND TRENDS

ABSTRACT

The proposed study is devoted to the analysis of the current state of the Russian IT industry, the identification of key trends and problems in the area under consideration. Within the framework of the article, the issue of determining the types of economic activities related to the IT sector is being worked out, as well as the key resulting indicators of the activity of the IT industry of the Russian Federation, such as the number of IT companies and their revenue in the context of key industry areas of the IT sector and constituent entities of the Russian Federation. The results obtained on the basis of the aggregation of statistical data of the "SPARK-Interfax" system are compared with existing estimates and indicators of the current state of the IT industry in the Russian Federation, problems and causes of significant discrepancies in heterogeneous estimates are identified, and approaches to solving these problems are proposed. The article notes the predominance of the service and infrastructure orientation of the Russian IT industry and the secondary importance of the production and technological component, which leads to the predominance in modern Russian studies of the study of derivative issues of the development of the IT sector — informatization and digitalization of society and the economy, the development of the Internet and the provision of public services in electronic form. An analysis of the territorial organization of the Russian IT industry reveals the problems of its overconcentration in the most developed centers of economic activity and generates recommendations for the state regional policy, which should include a set of tools aimed at smoothing existing spatial differences in terms of localization and concentration of the economic potential of the Russian IT industry.

KEYWORDS: IT industry, information and communication technologies, information society, regions of Russia, territorial organization

ВВЕДЕНИЕ

В современных научных отечественных и зарубежных исследованиях отрасль информационных технологий (далее — ИТ-отрасль) принято относить к высокотехнологичным и относительно новым видам экономической деятельности [*Розанова*, 2009; *Марков*, 2020]. Ключевые направления ИТ-отрасли, к которым относятся электронная промышленность, вычислительная техника, оптико-волоконная техника, программное обеспечение, телекоммуникации, роботостроение и многие другие сформировались начиная с 1970–1980-х гг. в структуре ядра пятого технологического уклада и составили его основу (1970–2010-е гг.) [*Глазьев*, 1993; *Каблов*, 2010]. Синергетическое развитие указанных направлений со временем обеспечило формирование единой производственно-технологической системы — сектора информационных технологий, который в свою очередь составляет одно из ключевых направлений нового — шестого технологического уклада (2010–2040 гг.) [*Бетелин*, 2017; 2018]. В этой связи ИТ-отрасль может рассматриваться не просто как один из видов экономической деятельности, а в качестве индикатора уровня экономического, технологического, инновационного и территориального развития, что повышает научный интерес к изучению данного отраслевого направления.

Другой не менее значимой особенностью ИТ-отрасли является ее высокая экономическая и пространственная динамика [*Zemtsov* et al., 2016]. В силу своей

[1] MGIMO University, 76, Vernadsky ave., Moscow, 119454, Russia,
e-mail: **pankratov_aleksey_ml@mail.ru**

«исторической новизны» ИТ-сектор в долгосрочной перспективе продолжит активное формирование и развитие как в российской, так и мировой экономике. Применительно к хозяйственной системе Российской Федерации, которая по ключевым направлениям все еще отстает от передовых технологически развитых стран, исследование процесса развития ИТ-отрасли представляет особенную актуальность и научный интерес, т. к. на примере российской экономики можно проводить критический анализ ключевых мировых и уже известных трендов развития ИТ-сектора, а также выявлять принципиально новые тенденции, особенности и закономерности, характерные для российской экономической модели.

Другим вектором научных исследований, актуальных для российской экономической системы, является сравнение особенностей развития ИТ-отрасли со сложившимися в прошлые годы в рамках третьего и четвертого технологических укладов индустриальными отраслями — автомобилестроением, судостроением, авиационной промышленностью и др. В рамках направления научного анализа можно более глубоко и детально проработать вопросы, связанные с теорией размещения производительных сил и определить, какие факторы размещения производства характерны ИТ-отрасли и согласуются ли они с классическими факторами размещения [*Зубаревич*, 2010].

Важным направлением особенно актуальным для экономики России является формализация понятия «ИТ-отрасль», поиск ответа на вопрос: что в рамках российской экономической системы подразумевается под «ИТ-отраслью» и какие конкретные виды экономической деятельности к ней относятся [*Абдрахманова* и др., 2019]?

Наконец, анализ территориальной динамики ИТ-сектора может дать принципиально новые результаты для приращения научных знаний в области теорий пространственного развития, в частности — теории диффузии инноваций, определить текущее состояние российской ИТ-индустрии, а также выявить ключевые тенденции в исследуемой сфере [*Бабурин* и др., 2017].

Предлагаемое исследование посвящено анализу современного состояния ИТ-отрасли Российской Федерации — показателей ее развития, особенностей ее территориальной организации, выявлению ключевых тенденций в исследуемой сфере, а также наиболее значимых проблем, ограничивающих ее развитие и затрудняющих возможности научного изучения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проблематика развития ИТ-отрасли в Российской Федерации в последнее время рассматривается и изучается довольно широко [*Плаксин* и др., 2017; *Земцов* и др., 2019; *Ганичев* и др., 2021]. Вместе с тем в российской научной и управленческой практике сформировались определенные особенности и подходы к изучению исследуемой темы. Направления научных исследований во многом определяются повесткой развития ИТ-индустрии, транслируемой исполнительными органами государственной власти, главным образом, в формате документов стратегического планирования [*Абдрахманова* и др., 2009; *Халин* и др., 2018; *Волкова* и др., 2019].

Так, первоначально, начиная с середины 2000-х гг. центральными темами являлись информатизация экономики и общества в Российской Федерации, распространение сети Интернет и развитие дистанционных электронных государственных услуг — так называемое «электронное правительство». Указанным направлениям посвящены отдельные документы стратегического планирования, такие как Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 г.[1], Стратегия развития

[1] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 8 декабря 2011 г. № 2227-р «Об утверждении Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 г.». Электронный ресурс: https://docs.cntd.ru/document/902317973 (дата обращения 28.07.2023).

информационного общества Российской Федерации на 2017–2030 гг.[1], национальный проект «Цифровая экономика»[2], Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 г.[3] и многие другие документы. Именно с учетом этого в России определялась и формировалась тематика изучения вопросов, связанных с деятельностью ИТ-сектора, широко исследовались производные сервисно-инфраструктурные направления в структуре исследуемого сектора экономики.

Рассматриваемые особенности проявились в формировании в структуре системы государственной статистки специализированных индикаторов и показателей, отражающих процессы развития информационного общества в Российской Федерации[4]. Таким образом, основной вектор научного и управленческого изучения исследуемой тематики, в первую очередь, затрагивал не базовые производственно-отраслевые, а надстроечные — сервисные элементы ИТ-индустрии. С другой стороны, в российской управленческой практике сектор ИКТ в рамках системы государственной статистики стал рассматриваться как отдельный и обособленный вид экономической деятельности лишь начиная с 2016 г., ранее данный вид деятельности относился к сектору инфраструктурных, т. е. обеспечивающих отраслей — сектору «Транспорт и связь»[5].

Несмотря на то, что Минцифры (Минкомсвязью) России в 2015 г. был утвержден перечень собирательных классификационных группировок, составляющих сектор ИКТ и сектор контента и средств массовой информации[6] в сложившихся условиях особенно актуальной остается проблема формализации понятия «ИТ-отрасль» в условиях российской экономической модели, определение конкретных отраслевых направлений и видов экономической деятельности, которые к ней относятся, а также разработка макроэкономических показателей, эффективно и репрезентативно оценивающих данные отраслевые направления.

В рамках настоящего исследования в качестве ключевых видов деятельности, относящихся к ИТ-сектору Российской Федерации, в соответствии с классификатором ОКВЭД-2 рассматриваются 4 отрасли, а именно производство компьютеров, электронных и оптических изделий, деятельность в сфере телекоммуникаций, разработка компьютерного программного обеспечения, деятельность в области информационных технологий (табл. 1).

---

1 Указ Президента Российской Федерации от 9 мая 2017 г. № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 г.». Электронный ресурс: https://base.garant.ru/71670570 (дата обращения 28.07.2023).

2 Паспорт национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации». Утвержден президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам (протокол от 24 декабря 2018 г.). Электронный ресурс: http://static.government.ru/media/files/urKHm 0gTPPnzJlaKw3M5cNLo6gczMkPF.pdf (дата обращения

3 28.07.2023). Указ Президента Российской Федерации от 10 октября 2019 г. № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» (вместе с «Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 г.»). Электронный ресурс: http://www.consultant.ru/ document/ cons_doc_LAW_3 35184/1f32224a00901db9cf44793e9a5e35567a4212c7

4 (дата обращения 28.07.2023). Росстат. Мониторинг развития информационного общества в Российской Федерации. Электронный ресурс: https://rosstat.gov.ru/statistics/infocommunity (дата

5 обращения 28.07.2023).
Росстат. Статистический сборник «Регионы России: социально-экономические показатели».

6 Электронный ресурс: https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204 (дата обращения 28.07.2023).
Приказ Минкомсвязи России от 7 декабря 2015 г. № 515 «Об утверждении собирательных классификационных группировок «Сектор информационно-коммуникационных технологий» и «Сектор контента и средств массовой информации»». Электронный ресурс: https://base.garant.ru/71309918/ (дата обращения 28.07.2023).

По указанным отраслям из системы «СПАРК-Интерфакс»[1] была собрана статистическая информация о деятельности зарегистрированных в Российской Федерации ИТ-компаний в разрезе субъектов Российской Федерации, содержащая данные об объеме выручки данных компаний в 2018–2021 гг. и их количестве. При этом привязка компании к тому или иному субъекту Российской Федерации в рамках исследования осуществлялась на основании классификатора системы «СПАРК-Интерфакс» «регион регистрации». В подавляющем большинстве случаев регион регистрации и регион реальной деятельности компаний совпадают между собой, в связи с чем в рамках исследования локализации ИТ-предприятий на территории регионов России возможными несовпадениями регистрации и реальной производственной деятельности можно пренебречь.

Табл. 1. Отрасли, относимые к ИТ-сектору Российской Федерации в соответствии с классификатором ОКВЭД-2
Table 1. Industries related to the IT sector of the Russian Federation in accordance with the OKVED-2 classifier

Код	Расшифровка	Дочерний код	Расшифровка
C	Обрабатывающие производства	26	Производство компьютеров, электронных и оптических изделий
J	Деятельность в области информации и связи	61	Деятельность в сфере телекоммуникаций
		62	Разработка компьютерного программного обеспечения, консультационные услуги в данной области и другие сопутствующие услуги
		63	Деятельность в области информационных технологий

**Источник: ОКВЭД-2, составлено автором*

С учетом сформированной базы статистических данных было определено количество российских компаний, относящихся к ИТ-сектору, измерен объем выручки ИТ-отрасли Российской Федерации, а также определены номинальные темпы роста рассматриваемого показателя как в целом по ИТ-сектору, так и по его отдельным отраслевым направлениям. Помимо этого, данные по выручке и количеству компаний были декомпозированы в разрезе субъектов Российской Федерации, на основании чего была определена территориальная организация экономической активности российской ИТ-отрасли и выявлены ключевые тенденции в исследуемой сфере. В целях получения более репрезентативных результатов в части анализа территориальной организации российской ИТ-отрасли показатели объема выручки ИТ-компаний субъектов Российской Федерации были соотнесены с показателями ВРП, на основании чего был рассчитан аналитический показатель, отражающий вклад выручки ИТ-отрасли региона в показатель объема его экономики. Также в целях анализа динамических тенденций территориального развития ИТ-отрасли были рассчитаны показатели прироста выручки российской ИТ-отрасли в разрезе субъектов Российской Федерации в период 2018–2021 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По данным статистической системы «СПАРК-Интерфакс» в ИТ-секторе Российской Федерации по состоянию на 2021 г. было зарегистрировано более 49,5 тыс. компаний с

[1] «СПАРК-Интерфакс» — база статистических данных, содержащая информацию обо всех официально зарегистрированных в Российской Федерации компаниях и ИП. Электронный ресурс: https://spark-interfax.ru/ (дата обращения 28.07.2023).

ненулевой выручкой. Приводимые оценки значительно ниже официальных данных, что может свидетельствовать о неполном охвате базы «СПАРК-Интерфакс» российских ИТ-компаний, а также отсутствии статистических данных по ряду компаний. Так, в результате реализации налогового маневра в ИТ-отрасли с 2021 г. количество аккредитованных Минцифры России ИТ-компаний возросло более чем в 2 р. с 12 до 30 тыс., при этом за март – август 2022 г. было зарегистрировано более 5 тыс. новых ИТ-компаний[1], а общее число действующих ИТ-компаний в России в 2022 г. превысило отметку в 73 тыс.[2] В то же время рассматриваемый беспрецедентный рост количества новых ИТ-компаний может быть связан не с реальным формированием новых ИТ-бизнесов, а с оформлением в качестве отдельных обособленных юридических лиц уже существовавших ИТ-подразделений действующих компаний с целью получения ими предоставляемых государством налоговых льгот.

Тем не менее, указанная выборка дает понимание реальной ситуации как в части концентрации предприятий по отраслевым направлениям ИТ-сектора, так и в части их территориальной локализации. В частности, наибольшее количество компаний — около 32 тыс. или более 64 % от их общего количества в российской ИТ-индустрии функционирует в отрасли разработки программного обеспечения, около 10 тыс. компаний (или около 20 %) специализируются на деятельности в области информационных технологий, более 6 тыс. компаний (или около 13 %) работают в области телекоммуникаций и наименьшее количество компаний — около 1,7 тыс. компаний работают в отрасли микроэлектроники и производства компьютеров. Указанная статистика в количественном отношении подтверждает тезис о сервисно-инфраструктурной специализации российской ИТ-отрасли и гораздо меньшей значимости производственно-технологического направления в рамках ее структуры (табл. 2).

Табл. 2. Количество компаний с ненулевой выручкой в отраслях ИТ-сектора в 2021 г.
Table 2. Number of companies with non-zero revenue in IT sectors in 2021

Отрасль	Количество компаний, ед.	В %
Производство компьютеров, электронных и оптических изделий (26)	1 665	3,4
Деятельность в сфере телекоммуникаций (61)	6 301	12,7
Разработка компьютерного программного обеспечения, консультационные услуги в данной области и другие сопутствующие услуги (62)	31 878	64,3
Деятельность в области информационных технологий (63)	9 704	19,6
Всего	49 548	100,0

**Источник: рассчитано и составлено автором на основании данных «СПАРК-Интерфакс»*

С точки зрения территориальной организации компаний ИТ-сектора, то их подавляющая доля — около 65 % — приходится на первые 10 регионов — лидеров по числу ИТ-компаний, к которым по состоянию на 2021 г. относятся г. Москва, г. Санкт-Петербург, Московская область, Республика Татарстан, Свердловская и Новосибирская области, Краснодарский край, Самарская, Нижегородская и Ростовская области. При этом особенно выделяется вклад г. Москвы как в целом по ИТ-сектору Российской Федерации, так и по его отдельным отраслевым направлениям (табл. 3).

1 В России удвоилось число новых ИТ-компаний. Электронный ресурс: https://www. cnews.ru/ news/ top/2022-11-17_v_it_i_ne_vyjtichislo_it-kompanij (дата обращения 28.07.2023).

2 Численность и оборот ИТ-компаний в РФ растут, рентабельность активов снижается. Электронный ресурс: https://www.interfax.ru/business/866443 (дата обращения 28.07.2023).

Совокупно по рассматриваемым отраслям, относимых в рамках настоящего исследования к ИТ-сектору, выручка российских ИТ-компаний на протяжении 2018–2021 гг. возросла с 5,0 до 6,6 трлн руб. (2018 г. — 5,0 трлн руб.; 2019 г. — 5,5 трлн руб.; 2020 г. — 6,1 трлн руб.; 2021 г. — 6,6 трлн руб.) — таким образом, прирост в 2018–2021 гг. составил более 30 %. Данные оценки несколько превышают располагаемые в открытых источниках оценочные данные роста объема выручки российских ИТ-компаний. Так, информационное агентство «Интерфакс» на основании той же базы статистических данных «СПАРК-Интерфакс» в статье от 5 октября 2022 г. отмечало, что по итогам 2021 г. совокупная выручка ИТ-компаний выросла на 23 %, до 3,868 трлн руб., рост оборота сохранялся и в первой половине 2022 г.[1] При этом «Интерфакс» не указывает, какие конкретные отраслевые направления учитывались при расчете выручки российских ИТ-компаний — возможно, рассматривалась только software-отрасль (разработка программного обеспечения). В то же время по оценкам курирующего развитие российской ИТ-отрасли заместителя Председателя Правительства Российской Федерации вице-премьера Д.Н. Чернышенко по итогам 2022 г. объем выручки российских ИТ-компаний в 2022 г. составил 2,38 трлн руб., что на 616 млрд руб. больше по сравнению с 2021 г.[2] Указанные существенные разночтения могут свидетельствовать о наличии системной проблемы, связанной с отсутствием общепринятого подхода к функциональному определению понятия ИТ-сектор в Российской Федерации, что отражается на несогласованности существующих количественных оценок объема экономики российской ИТ-отрасли [*Мусаев* и др., 2021].

Табл. 3. Концентрация компаний ИТ-сектора и его отраслей в первых 10 регионах, в т. ч. в г. Москве
Table 3. The concentration of companies in the IT sector and its industries in the first 10 regions, including Moscow

Отрасль	% компаний топ-10 регионов	в т. ч. % компаний г. Москвы
Производство компьютеров, электронных и оптических изделий (26)	70,6	33,2
Деятельность в сфере телекоммуникаций (61)	56,1	23,9
Разработка компьютерного программного обеспечения, консультационные услуги в данной области и другие сопутствующие услуги (62)	66,6	34,1
Деятельность в области информационных технологий (63)	62,6	31,4
Всего	**64,6**	**32,2**

**Источник: рассчитано и составлено автором на основании данных «СПАРК-Интерфакс»*

При оценке объема экономики российской ИТ-отрасли на основании данных о выручке ИТ-компаний и темпов ее прироста также следует принимать во внимание тот факт, что рассматриваемые показатели являются не столь репрезентативными индикаторами, отражающими реальный объем экономики ИТ-отрасли. Как неоднократно отмечалось выше, в силу инфраструктурно-сервисной специфики российской ИТ-индустрии и высокой доли используемых на российском ИТ-рынке зарубежных товаров и услуг, высокие объемы выручки ИТ-компаний, как и высокие темпы ее прироста, могут

[1] Численность и оборот ИТ-компаний в РФ растут, рентабельность активов снижается. Электронный ресурс: https://www.interfax.ru/business/866443 (дата обращения 28.07.2023).

[2] ИТ-рынок России. Электронный ресурс: https://www.tadviser.ru/ (дата обращения 28.07.2023).

быть связаны не с реальным объемом деятельности российских ИТ-компаний, а с увеличением дороговизны и операционных затрат при использовании зарубежных ИТ-товаров и программных компонентов, на основе которых в т. ч. реализуются отечественные ИТ-продукты и разработки. Фиксируемая рядом статистических и информационных источников высокая положительная динамика выручки российских ИТ-компаний в 2022 г., также отмечаемая федеральными органами исполнительной власти как достижение в области импортозамещения, в реальности может быть связана с удорожанием всех операционных и инвестиционных затрат ИТ-компаний в связи с введенными западными странами санкциями против Российской Федерации.

Другой проблемой, характерной исследуемой сфере, является частое использование вместо понятия «объем экономики ИТ-отрасли» понятия «объем ИТ-рынка», означающего совокупный объем продаж ИТ-товаров и услуг. Понятие «объем ИТ-рынка» особенно характерно для деятельности консалтинговых организаций и преимущественно используется как результирующий макроэкономический показатель в их исследованиях. Так, по данным «IDC»[1] объем ИТ-рынка России в 2022 г. вследствие ухода западных компаний сократился на 39 % с 31,2 до 19,1 млрд долл. (или с 2,3 трлн руб. до 1,3 трлн руб.)[2], при этом по оценкам Минцифры России потери ушедших с российского рынка зарубежных ИТ-компаний составили до 700 млрд руб. (более 10 млрд долл.).

Таким образом, значимым фактором выявленных существующих разночтений также может рассматриваться проблема двойного счета, когда одновременно в рамках статистической отчетности одной компании учитывается выручка от производственной деятельности данной компании на внутреннем рынке и ее внешнеэкономическая деятельность, связанная с покупкой и дистрибуцией данной компанией импортных ИТ-товаров и продуктов[3].

В структуре 4 исследуемых отраслей ИТ-сектора наибольший объем выручки соответствует двум отраслям — деятельности в сфере телекоммуникаций (2,3 трлн руб.) и разработке компьютерного программного обеспечения (3,2 трлн руб.). Для последней отрасли также характерны наиболее высокие темпы прироста объемов выручки в период 2018–2021 гг. — более 63 %. Наиболее характерной тенденцией, которая в т. ч. отражает сервисно-инфраструктурную специфику российской ИТ-индустрии, является сокращение выручки компаний обрабатывающего сектора, специализирующихся на производстве компьютеров, электронных и оптических изделий почти на 40 % — с 517 млрд руб. в 2018 г. до 311 млрд руб. в 2021 г. (табл. 4).

Данное обстоятельство свидетельствует о том, что производственно-технологическая основа — так называемое «железо», на базе которой в классическом понимании должен выстраиваться сектор информационных технологий — представляет собой главным образом импортную продукцию, и ситуация в данной сфере не меняется в сторону повышения доли отечественных разработок [*Бетелин*, 2015]. Так, по данным Минпромторга России, доля импорта на российском рынке электроники в отраслях

---

1 International Data Corporation (IDC) — международная исследовательская и консалтинговая компания, основанная в 1964 г. и занимающаяся изучением мирового рынка информационных технологий и телекоммуникаций.

2 Изменение структуры IT-рынка по итогам 2022 г. — льготы, развитие, импортозамещение. Аналитический обзор Группы «ДЕЛОВОЙ ПРОФИЛЬ» от 1 марта 2023 г. Электронный ресурс: https://delprof.ru/upload/ibloc k/3b0/Analitika_DELOVOY-PROFIL_Izmenenie-struktury-IT_rynka.pdf (дата обращения 28.07.2023).

3 Следует отметить, что в системе «СПАРК-Интерфакс» торговля программным обеспечением, офисной техникой и оборудованием и пр. относится к видам деятельности: «торговля оптовая и розничная»; «ремонт автотранспортных средств и мотоциклов» и «предоставление прочих видов услуг», которые в рамках настоящего исследования не рассматривались.

машиностроения составляет более 90 %, при этом в госзакупках доля отечественных производителей электроники не превышает 20 %[1].

Табл. 4. Динамика выручки компаний ИТ-сектора и его отраслей в 2018–2021 гг., млрд руб.
Table 4. Dynamics of revenue of companies in the IT sector and its industries in 2018–2021, billion rubles

Отрасль	2018	2019	2020	2021	Прирост 2021–2018, %
Производство компьютеров, электронных и оптических изделий (26)	517	443	481	311	−39,78
Деятельность в сфере телекоммуникаций (61)	1 960	2 094	2 154	2 261	15,35
Разработка компьютерного программного обеспечения, консультационные услуги в данной области и другие сопутствующие услуги (62)	1 945	2 306	2 701	3 172	63,06
Деятельность в области информационных технологий (63)	578	689	786	847	46,50
Всего	5 000	5 533	6 122	6 591	31,81

**Источник: рассчитано и составлено автором на основании данных «СПАРК-Интерфакс»*

Регионами-лидерами по объему выручки компаний ИТ-сектора Российской Федерации по состоянию на 2021 г. являются г. Москва, г. Санкт-Петербург, Московская область, Республика Татарстан, Свердловская область, Пермский край, Новосибирская и Нижегородская области, Краснодарский край и Республика Башкортостан. Рассматриваемые регионы в 2021 г. сосредоточивали более 91 % выручки ИТ-отрасли Российской Федерации, в т. ч. г. Москва — 69 %. Многочисленные тезисы о наличии процессов диффузии инноваций и о тенденции территориальной диверсификации экономического потенциала высокотехнологичных отраслей, в т. ч. ИТ-отрасли [*Zemtsov* et al., 2022] статистическими данными системы «СПАРК-Интерфакс» не подтверждаются. С 2018 г. территориальная концентрация ИТ-отрасли в топ-10 регионах — лидерах по объему выручки стабильно возрастала: в 2018 г. рассматриваемые регионы сосредоточивали 89,9 % выручки российской ИТ-отрасли, в 2019 г. — 90,2 %, в 2020 г. — 90,9 %, в 2021 г. — 91,0 %.

В разрезе исследуемых отраслей ИТ-сектора, наиболее диверсифицированной в территориальном отношении, является отрасль производства компьютеров, электронных и оптических изделий, в рамках которой на рассматриваемые регионы-лидеры в 2021 г. пришлось более 70 % выручки компаний, в т. ч. на долю г. Москвы — более 38 %. Данное обстоятельство может объясняться историческими особенностями формирования и развития исследуемой отрасли во второй половине XX в., когда в рамках советской плановой экономической системы обеспечивалось территориально диверсифицированное размещение предприятий электронной промышленности в крупнейших городах — научных центрах СССР [*Борисов*, 2020]. В то же время, в современных условиях в рамках текущей экономической модели при анализе территориальной организации электронной промышленности прослеживаются аналогичные тенденции пространственной концентрации экономической активности, характерные другим отраслям ИТ-сектора. Так, территориальная концентрация выручки компаний в рамках электронной промышленности на протяжении рассматриваемого периода также существенно возросла: в 2018 г. на первые 10 регионов-лидеров приходилось 67 % совокупной выручки отрасли, в 2021 г. — около

[1] Минпромторг назвал ключевые проблемы в сфере микроэлектроники. Электронный ресурс: https://www.rbc.ru/economics/13/09/2022/63200dfd9a79475323e78308 (дата обращения 28.07.2023).

71 %. Все остальные рассматриваемые отрасли ИТ-сектора являются высоко-концентрированными в территориальном отношении — вклад лидирующих регионов по объему выручки ИТ-компаний составляет около и более 90 % (табл. 5).

Табл. 5. Динамика вклада топ-10 регионов-лидеров в общий объем выручки ИТ-сектора и его отраслей в 2018–2021 гг., %
Table 5. Dynamics of the contribution of the top 10 leading regions to the total revenue of the IT sector and its industries in 2018–2021, %

Отрасль	2018	2019	2020	2021
Производство компьютеров, электронных и оптических изделий (26)	67,1	69,8	73,5	70,7
Деятельность в сфере телекоммуникаций (61)	96,1	94,9	95,8	95,7
Разработка компьютерного программного обеспечения, консультационные услуги в данной области и другие сопутствующие услуги (62)	89,2	89,7	90,0	89,7
Деятельность в области информационных технологий (63)	91,3	90,9	91,6	91,1
Всего	89,9	90,2	90,9	91,0

**Источник: рассчитано и составлено автором на основании данных «СПАРК-Интерфакс»*

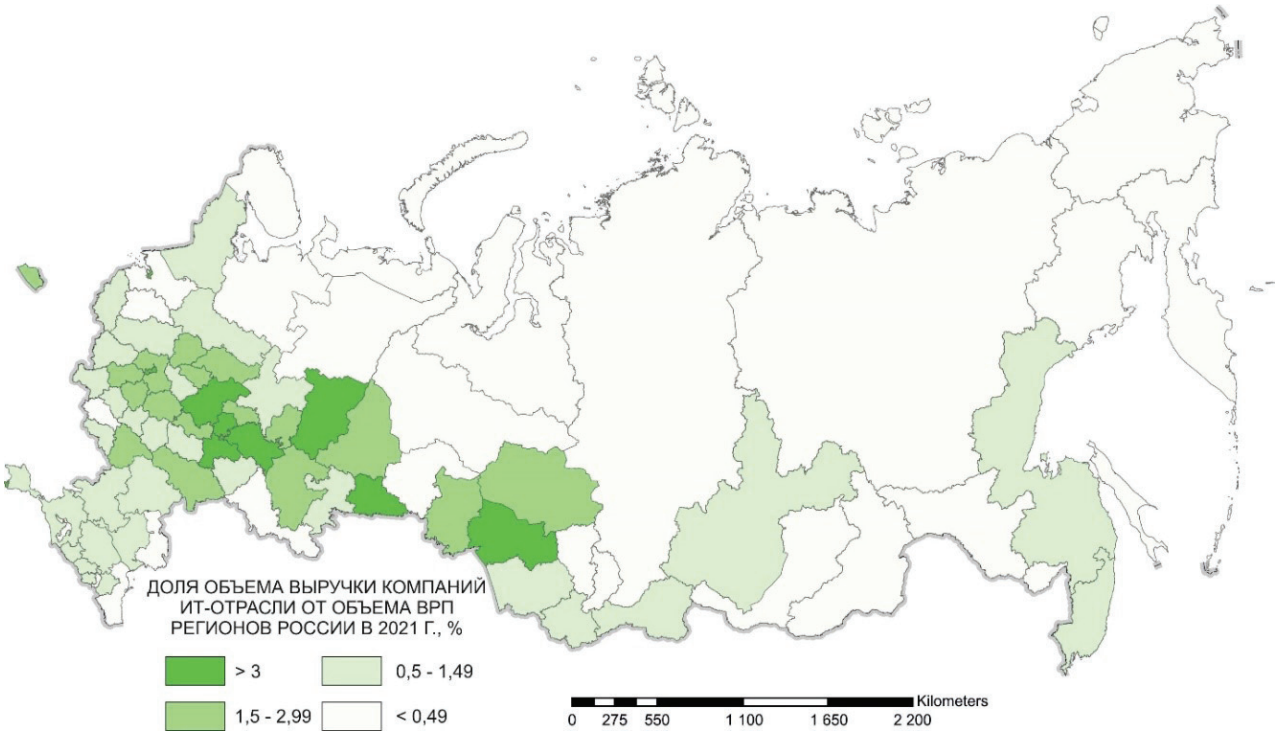
Рассмотрение относительных показателей, оценивающих масштаб развития ИТ-отрасли в субъектах Российской Федерации, дает несколько иную картину в части анализа территориальной организации ИТ-отрасли и специализации регионов на данном виде экономической активности. В рамках исследования для решения указанной задачи рассматривается аналитический показатель, рассчитываемый как отношение объема выручки ИТ-компаний субъекта Российской Федерации к объему его ВРП по состоянию на 2021 г. С точки зрения экономической специализации на деятельности ИТ-отрасли выделяются следующие субъекты Российской Федерации, для которых доля объема выручки ИТ-отрасли от объема ВРП в 2021 г. превысила 3 %: г. Москва, г. Санкт-Петербург, Новосибирская область, Пермский край, г. Севастополь, Чувашская Республика, Республика Татарстан, Курганская, Ульяновская, Нижегородская области (рис. 1).

В дополнение к выборке регионов с наиболее высоким объемом ИТ-отрасли, которые преимущественно являются крупногородскими и обладают развитой инновационно-промышленной экономикой, к группе регионов с высокой долей выручки ИТ-компаний относительно показателя ВРП добавляются Курганская и Ульяновская области, а также Чувашская Республика. Первые два региона специализируются на оборонно-промышленном производстве (авиастроение и военное транспортное машиностроение), что является значимым фактором для кооперационного развития ИТ-индустрии, Чувашская Республика, в свою очередь, является примером целенаправленной поддержки ИТ-отрасли на уровне регионального правительства: в 2018 г. в регионе создан ИТ-кластер регионального уровня[1], а в 2021 г. после двух лет обсуждения разработана и утверждена региональная Стратегия цифровой трансформации Чувашской Республики[2].

[1] Официальный сайт Ассоциация «ИТ-кластер Чувашской Республики». Электронный ресурс: https:// it21.org/ (дата обращения 28.07.2023).

[2] Распоряжение Кабинета министров Чувашской Республики от 20 августа 2021 г. No. 739-р «Об утверждении Стратегии в области цифровой трансформации отраслей экономики, социальной сферы и государственного управления в Чувашской Республике». Электронный ресурс: https:// docs.cntd.ru/ document/574848338 (дата обращения 28.07.2023).

На протяжении рассматриваемого периода 2018–2021 гг. территориальное развитие российской ИТ-индустрии характеризовалось высокой неравномерностью. В среднем номинальный прирост выручки компаний российской ИТ-отрасли в 2018–2021 гг. составил около 32 % (табл. 4). При этом выручка ИТ-компаний 38 субъектов Российской Федерации в 2018–2021 гг. прирастала более высокими темпами по сравнению со среднероссийским показателем. Таким образом, более половины субъектов Российской Федерации развивались медленнее среднероссийской динамики, и тем самым сокращали свой вклад в результирующие показатели объема экономики ИТ-индустрии. С учетом этого, территориальному развитию российской ИТ-отрасли характерна тенденция к усилению пространственной концентрации, локализация ИТ-отрасли в крупнейших и наиболее развитых центрах экономической активности. Среди всех субъектов Российской Федерации также выделяется 17 регионов, для которых объем выручки ИТ-компаний в 2018–2021 гг. и вовсе сократился. Данный факт еще более отражает неравномерность территориальной динамики развития и усиление пространственной дифференциации субъектов Российской Федерации между собой. Регионы-лидеры по приросту компаний выручки ИТ-индустрии следует также разделить на 2 группы: регионы с высоким приростом вследствие эффекта низкой базы и специализирующиеся на ИТ-отрасли регионы со значительным накопленным экономическим потенциалом ИТ-индустрии и высокой экономической динамикой (рис. 2).



** Источник: рассчитано и составлено автором на основании данных Росстата и «СПАРК-Интерфакс»*

Рис. 1. Доля объема выручки компаний ИТ-отрасли от объема ВРП субъектов Российской Федерации в 2021 г., %

Fig. 1. The share of revenue of IT companies in the volume of GRP of constituent entities of the Russian Federation in 2021, %

** Источник: рассчитано и составлено автором на основании данных «СПАРК-Интерфакс»*

Рис. 2. Прирост выручки компаний ИТ-отрасли России в субъектах Российской Федерации в 2018–2021 гг., %
Fig. 2. Growth in revenue of IT companies in Russia in the constituent entities of the Russian Federation in 2018–2021, %

Затрагивая вопрос концентрации экономической активности и факторов размещения производительных сил следует отметить, что размещение более «старшей» электронной промышленности в значительной степени менее территориально сконцентрировано по сравнению с более «новыми» отраслями, относящимися к видам экономической деятельности в области информации и связи [*Панкратов* и др., 2021]. Таким образом, отрасли, сложившиеся уже в рамках рыночной экономической системы, в большей степени зависимы от факторов выгодности экономико-географического положения, агломерационных эффектов, возникающих в структуре центров экономического роста, наличия высококвалифицированных кадров, а также развитого платежеспособного спроса [*Лавриненко* и др., 2019; *Pankratov* et al., 2021]. Более того, в условиях рыночной экономики и неравномерности пространственного развития преимущества наиболее развитых территорий в значительной степени усиливаются, что приводит к возрастанию концентрации на данных территориях экономической активности и производственного потенциала российской ИТ-индустрии.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование привело к формированию нескольких значимых выводов, которые обладают особенной ценностью с точки зрения возможного запуска научно-практической дискуссии относительно проблем развития российской ИТ-отрасли.

Во-первых, выявленные разночтения в измерении объема экономики ИТ-отрасли Российской Федерации актуализируют проблематику выработки единого подхода к определению функционального и отраслевого содержания рассматриваемого вида экономической

деятельности, а также разработки единой методики измерения экономического потенциала российской ИТ-индустрии. Также в рассматриваемом отношении важно провести точное разграничение между результирующими показателями, характеризующими деятельность ИТ-отрасли — объемом экономики ИТ-сектора и объемом ИТ-рынка.

Во-вторых, в рамках исследования показано преобладание подходов к изучению российской ИТ-отрасли с позиций развития сервисно-инфраструктурных направлений, связанных с информатизацией и цифровизацией экономики и общества, в то время как вопросы выстраивания производственно-технологической основы развития российской ИТ-индустрии все еще продолжают оставаться второстепенными. Для полноценного развития и идентификации деятельности ИТ-отрасли как отдельного сектора российской экономики в первую очередь необходимо рассматривать и прорабатывать вопросы развития производственной базы ИТ-сектора — микроэлектронной, радиоэлектронной, а также специализированной станкоинструментальной промышленности, иными словами — формирования национальной технологической основы ИТ-отрасли, на базе которой должны разворачиваться процессы цифровизации, информатизации, развития аддитивных технологий и искусственного интеллекта. Без перемещения ключевого вектора научного поиска в плоскость производственно-технологической тематики невозможно обоснование целесообразности процессов импортозамещения и последующего достижения технологического суверенитета страны в области ИТ-индустрии.

В-третьих, результаты проведенного исследования содержат выводы и рекомендации для проведения государственной экономической и региональной политики. Проработка вопроса о территориальной организации и факторах размещения ИТ-отрасли показывает, что данный сектор российской экономики характеризуется крайне высокой территориальной концентрацией, экономический потенциал которого сосредоточен главным образом в границах Московского столичного региона. При этом концентрация отрасли в регионах-лидерах на протяжении исследуемого периода стабильно возрастает. Факты, установленные в рамках исследования, свидетельствуют о том, что применительно к российской ИТ-индустрии классические теории размещения производительных сил, а также пространственные закономерности трансферта технологий и диффузии инноваций в сложившихся условиях неприменимы и не работают. С учетом данного вывода становится очевидной целесообразность реализации государственной региональной политики, направленной на сглаживание сложившихся неравномерных условий пространственного развития российской ИТ-индустрии. В естественных условиях рыночной среды, если не предпринимать каких-либо стимулирующих инструментов и программ, наиболее значимым фактором размещения экономической активности ИТ-индустрии будет оставаться повышенная норма прибыли, которую в условиях российской экономической системы могут обеспечить только крупнейшие городские агломерации. Данная ситуация влечет в долгосрочной перспективе весьма негативные эффекты, когда все наиболее качественные и эффективные ресурсы будут сосредоточиваться в крупнейших городах, при этом отставание от них остальных территорий страны будет только усиливаться.

Изучение ИТ-сектора Российской Федерации также особенно важно с точки зрения того, что рассматриваемый сектор российской экономики играет роль индикатора процессов инновационного и технологического развития и продолжает свое активное формирование на современном этапе. Именно поэтому научно-исследовательский интерес к вопросам развития российской ИТ-индустрии со временем будет только возрастать. Решение обозначенных в рамках настоящего исследования проблем будет способствовать выходу научного понимания исследуемой области знаний на новый уровень теоретико-практической проработанности, а также открытию новых направлений научного поиска в исследуемой сфере.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-78-01236).

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was supported by RSF (project No. 23-78-01236).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абдрахманова Г.И., Вишневский К.О., Гохберг Л.М. и др. Что такое цифровая экономика? Тренды, компетенции, измерение. Доклад к XX Апрельской международной научной конференции по проблемам развития экономики и общества, Москва, 9–12 апр. 2019 г. НИУ ВШЭ. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2019. 82 с.

Абдрахманова Г.И., Ковалева Г.Г. Тенденции развития информационных и коммуникационных технологий. Форсайт, 2009. № 4 (12). С. 44–55.

Бабурин В.Л., Земцов С.П. Моделирование диффузии инноваций и типология регионов России на примере сотовой связи. Известия Российской академии наук. Серия географическая, 2017. № 4. С. 17–30. DOI: 10.7868/S037324441710002.

Бетелин В.Б. Проблемы и перспективы формирования цифровой экономики в России. Вестник Российской академии наук, 2018. Т. 88. № 1. С. 3–9. DOI: 10.7868/S086958731801 0012.

Бетелин В.Б. Суперкомпьютерные технологии в России: состояние и проблемы развития. Вестник Российской академии наук, 2015. Т. 85. № 11. С. 971–983. DOI: 10.7868/S0869587 315110031.

Бетелин В.Б. Цифровая экономика: навязанные приоритеты и реальные вызовы. Государственный аудит. Право. Экономика, 2017. № 3/4. С. 22–25.

Борисов В.П. Революция в электронике и формирование отечественной высокотехнологичной отрасли промышленности. Управление наукой: теория и практика, 2020. Т. 2. № 2. С. 129–149. DOI: 10.19181/smtp.2020.2.2.6.

Волкова А.А., Плотников В.А., Рукинов М.В. Цифровая экономика: сущность явления, проблемы и риски формирования и развития. Управленческое консультирование, 2019. № 4. С. 38–49. DOI: 10.22394/1726-1139-2019-4-38-49.

Глазьев С.Ю. Теория долгосрочного технико-экономического развития. М.: ВлаДар, 1993. 310 с.

Земцов С.П., Баринова В.А., Семенова Р.И. Риски цифровизации и адаптация региональных рынков труда в России. Форсайт, 2019. № 2 (13). С. 84–96. DOI: 10.17323/2500-2597.2019.2.84.96.

Земцов С.П., Демидова К.В., Кичаев Д.Ю. Распространение Интернета и межрегиональное цифровое неравенство в России: тенденции, факторы и влияние пандемии. Балтийский регион, 2022. № 4 (14). С. 57–78. DOI: 10.5922/2079-8555-2022-4-4.

Зубаревич Н.В. Регионы России: неравенство, кризис, модернизация. М.: Независимый институт социальной политики, 2010. 160 с.

Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад. Наука и жизнь, 2010. № 4.

Лавриненко П.А., Михайлова Т.Н., Ромашина А.А., Чистяков П.А. Агломерационные эффекты как инструмент регионального анализа. Проблемы прогнозирования, 2019. № 3 (174). С. 50–60. DOI: 10.1134/S1075700719030109.

Марков Р.А. Современное состояние информационно-коммуникационных технологий в России. Естественно-гуманитарные исследования, 2020. № 29 (3). С. 211–217. DOI: 10.24411/2309-4788-2020-10260.

Мусаев Р.А., Панкратов А.А. Подходы к формированию эффективной системы реализации кластерной политики в сфере информационных технологий. Проблемы теории и практики управления, 2021. № 5. С. 60–77. DOI: 10.46486/0234-4505-2021-5-60-77.

Панкратов А.А., Мусаев Р.А., Бадина С.В. Оценка потенциала кластеризации ИТ-отрасли России в 2005–2018 гг. ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2021. Т. 27. № 1. С. 44–59. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-44-59.

Плаксин С.М., Абдрахманова Г.И., Ковалева Г.Г. Интернет-экономика в России: подходы к определению и оценке. Форсайт, 2017. Т. 11. № 1. С. 55–65. DOI: 10.17323/2500-2597.2017.1.55.65.

Розанова Н.М. Экономический анализ отрасли информационных технологий. Terra Economicus, 2009. Т. 7. № 3. С. 42–57.

Халин В.Г., Чернова Г.В. Цифровизация и ее влияние на российскую экономику и общество: преимущества, вызовы, угрозы и риски. Управленческое консультирование, 2018. № 10. С. 46–63. DOI: 10.22394/1726-1139-2018-10-46-63.

Pankratov A.A., Musaev R.A., Badina S.V. Approaches to identifying, measuring and predicting cluster effects. Studies on Russian Economic Development, 2021. V. 32. No. 3. P. 312–317. DOI: 10.1134/s1075700721030114.

Zemtsov S.P., Barinova V.A., Pankratov A.A., Kutsenko E.S. Potential high-tech clusters in Russian regions: From current policy to new growth areas. Foresight-Russia, 2016. V. 10. No. 3. P. 34–52. DOI: 10.17323/1995-459X.2016.3.34.52.

REFERENCES

Abdrakhmanova G.I., Kovaleva G.G. Trends in the development of information and communication technologies. Foresight, 2009. No. 4 (12). P. 44–55 (in Russian).

Abdrakhmanova G.I., Vishnevsky K.O., Gokhberg L.M., etc. What is the digital economy? Trends, competencies, measurement. Report to the XX April International Scientific Conference on the Problems of Development of the Economy and Society, Moscow, 9–12 April, 2019. Moscow: Publishing House of the Higher School of Economics, 2019. 82 p. (in Russian).

Baburin V.L., Zemtsov S.P. Modeling the Diffusion of Innovations and the Typology of Russian Regions on the Example of Cellular Communications. Izvestia RAN. Seriya Geograficheskaya (News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series), 2017. No. 4. P. 17–30 (in Russian). DOI: 10.7868/S037324441710002.

Betelin V.B. Problems and prospects for the formation of the digital economy in Russia. Herald of the Russian Academy of Sciences, 2018. V. 88. No. 1. P. 3–9 (in Russian). DOI: 10.7868/S0869587318010012.

Betelin V.B. Supercomputer technologies in Russia: state and development problems. Herald of the Russian Academy of Sciences, 2015. V. 85. No. 11. P. 971–983 (in Russian). DOI: 10.7868/S0869587315110031.

Betelin V.B. Digital economy: imposed priorities and real challenges. State Audit. Right. Economy, 2017. No. 3/4. P. 22–25 (in Russian).

Borisov V.P. Revolution in electronics and the formation of the domestic high-tech industry. Science Management: Theory and Practice, 2020. V. 2. No. 2. P. 129–149. DOI: 10.19181/smtp.2020.2.2.6.

Glazyev S.Yu. The theory of long-term technical and economic development. Moscow: VlaDar, 1993. 310 p. (in Russian).

Kablov E.N. The sixth technological order. Science and life, 2010. No. 4 (in Russian).

Khalin V.G., Chernova G.V. Digitalization and its impact on the Russian economy and society: advantages, challenges, threats and risks. Administrative Consulting, 2018. No. 10. P. 46–63 (in Russian). DOI: 10.22394/1726-1139-2018-10-46-63.

Lavrinenko P.A., Mikhailova T.N., Romashina A.A., Chistyakov P.A. Agglomeration effects as a tool for regional analysis. Problems of Forecasting, 2019. No. 3 (174). P. 50–60 (in Russian). DOI: 10.1134/S1075700719030109.

Markov R.A. The current state of information and communication technologies in Russia. Natural Humanitarian Research, 2020. No. 29 (3). P. 211–217 (in Russian). DOI: 10.24411/2309-4788-2020-10260.

Musaev R.A., Pankratov A.A. Approaches to the formation of an effective system for the implementation of cluster policy in the field of information technology. International Journal of Management Theory and Practice, 2021. No. 5. P. 60–77 (in Russian). DOI: 10.46486/0234-4505-2021-5-60-77.

Pankratov A.A., Musaev R.A., Badina S.V. Approaches to identifying, measuring and predicting cluster effects. Studies on Russian Economic Development, 2021. V. 32. No. 3. P. 312–317. DOI: 10.1134/s1075700721030114.

Pankratov A.A., Musaev R.A., Badina S.V. Assessing the clustering potential of the Russian IT industry in 2005–2018. InterCarto. InterGIS, 2021. V. 27. No. 1. P. 44–59 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-44-59.

Plaksin S.M., Abdrakhmanova G.I., Kovaleva G.G. Internet economy in Russia: Approaches to definition and evaluation. Foresight, 2017. V. 11. No. 1. P. 55–65 (in Russian). DOI: 10.17323/2500-2597.2017.1.55.65.

Rozanova N.M. Economic analysis of the information technology industry. Terra Economicus, 2009. V. 7. No. 3. P. 42–57 (in Russian).

Volkova A.A., Plotnikov V.A., Rukinov M.V. Digital economy: Essence of the phenomenon, problems and risks of formation and development. Administrative Consulting, 2019. No. 4. P. 38–49 (in Russian). DOI: 10.22394/1726-1139-2019-4-38-49.

Zemtsov S.P., Barinova V.A., Pankratov A.A., Kutsenko E.S. Potential high-tech clusters in Russian regions: From current policy to new growth areas. Foresight, 2016. V. 10. No. 3. P. 34–52. DOI: 10.17323/1995-459X.2016.3.34.52.

Zemtsov S.P., Barinova V.A., Semenova R.I. Risks of digitalization and adaptation of regional labor markets in Russia. Foresight, 2019. No. 2(13). P. 84–96 (in Russian). DOI: 10.17323/2500-2597.2019.2.84.96.

Zemtsov S.P., Demidova K.V., Kichaev D.Y. Internet diffusion and interregional digital divide in Russia: trends, factors, and the influence of the pandemic. Baltic Region, 2022. V. 14. No. 2. P. 57–78 (in Russian). DOI: 10.5922/2079-8555-2022-4-4.

Zubarevich N.V. Regions of Russia: inequality, crisis, modernization. Moscow: Independent Institute for Social Policy, 2010. 160 p. (in Russian).

УДК: 528.9 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-217-239**

Г.Г. Побединский[1], **В.И. Обиденко**[2], **П.И. Маркеева**[3]

НОРМАТИВНО-ПРАВОВОЕ И КАРТОГРАФО-ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГРАНИЦ СУБЪЕКТОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

АННОТАЦИЯ

В представленной работе выполнен анализ международных и национальных правовых и технических актов, регулирующих установление, изменение и кодирование территорий и границ различного уровня, а также вопросы пространственной привязки тематической информации. Для решения этих задач проанализированы документы ООН, стандарты международной организации по стандартизации ISO и Европейского союза NUTS. В процессе исследований рассмотрено российское законодательство и подзаконные акты о государственной границе, об административных границах 1 уровня (субъекты Российской Федерации) и 2 уровня (муниципалитеты) внутри субъектов Российской Федерации. Авторами предложено выделить в качестве отдельного уровня (1+) территории и границы федеральных округов, не являющихся единицами нового административно-территориального деления страны, но участвующих в федеральном статистическом наблюдении. Показано, что границы субъектов Российской Федерации подвержены изменениям, но имеющееся законодательное регулирование установления, контроля и изменения границ субъектов Федерации явно не является достаточным. Сложность решения проблемы установления, контроля и изменения границ субъектов Российской Федерации проиллюстрирована историей разработки, рассмотрения и отклонения проекта федерального закона «Об изменении административных границ субъектов Российской Федерации». Впоследствии рассмотрен порядок установления и изменения границ, а также вопросы точности геодезических и картографических работ при установлении, изменении и отображении границ. Проанализированы также недостатки рекомендаций по геодезическому обеспечению процесса установления границ субъектов Российской Федерации в письмах Росреестра.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: административные и кадастровые границы, границы субъектов Российской Федерации, пространственная привязка тематической информации

[1] Межрегиональная общественная организация «Российское общество геодезии, картографии и землеустройства», Волгоградский пр-т, д. 45с1, Москва, Россия, 109316, *e-mail:* **pobedinskij-gg@yandex.ru**

[2] ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», ул. Плахотного, д. 10, Новосибирск, Россия, 630108, *e-mail:* **ovi62@yandex.ru**

[3] ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», ул. Ильинская, д. 65, Нижний Новгород, Россия, 603000, *e-mail:* **linamarkeeva@gmail.com**

Gennady G. Pobedinsky[1], **Vladimir I. Obidenko**[2], **Polina I. Markeeva**[3]

REGULATORY AND CARTOGRAPHIC AND GEODETIC SUPPORT FOR CHANGING THE BORDERS OF THE SUBJECTS OF THE RUSSIAN FEDERATION

ABSTRACT

The paper analyzes international and national legal and technical acts regulating the establishment, modification and coding of territories and borders of various levels, regulating the issues of spatial reference of thematic information. UN documents, standards of the International Organization for Standardization ISO and the European Union NUTS are analyzed. The Russian legislation and by-laws on the state border, on the administrative borders of the 1st level (subjects of the Russian Federation) and the 2nd level within the subjects of the Russian Federation are considered. It is proposed to single out as a separate level 1+ territories and borders of federal districts that are not a new administrative-territorial division of the country, but participate in federal statistical observation. It is shown that the borders of the subjects of the Russian Federation are subject to changes, but the existing legislative regulation of the establishment, control and modification of the borders of the subjects of the Federation is clearly insufficient. The complexity of solving the problem of establishing, controlling and changing the borders of the subjects of the Russian Federation is illustrated by the history of the development, consideration and rejection of the draft federal law "On changing the administrative borders of the Subjects of the Russian Federation". The procedure for establishing and changing borders, as well as issues of accuracy of geodetic and cartographic work in establishing, changing and displaying borders are considered. The shortcomings of the recommendations on geodetic support of the process of establishing the borders of the subjects of the Russian Federation in the letters of the Rosreestr are analyzed.

KEYWORDS: administrative and cadastral borders, borders of the subjects of the Russian Federation, spatial reference of thematic information

ВВЕДЕНИЕ

Пространственная привязка статистических данных в значительной части осуществляется с использованием территорий и границ государств, единиц их административного деления, кодов государств и их районов. Неупорядоченность государственных границ приводит к затруднениям в работе организаций ООН, осуществляющих интеграцию тематических данных со статистической информацией, в определении метрических параметров территорий [*Idrizi* et al., 2012]. Так, например, Всемирная организация здравоохранения (World Health Organization) на сайте Flu News Europe (Новости гриппа в Европе) была вынуждена сделать специальную оговорку о границах Косово: «Административные границы включают пространственную характеристику Косово, это обозначение не наносит ущерба положению о статусе и

[1] Interregional Public Organization "Russian Society of Geodesy, Cartography and Land Management", 45s1, Volgogradsky ave., Moscow, 109316, Russia, *e-mail:* **pobedinskij-gg@yandex.ru**

[2] Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo str., Novosibirsk, 630108, Russia, *e-mail:* **ovi62@yandex.ru**

[3] Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Ilyinskaya str., Nizhny Novgorod, 603000, Russia, *e-mail:* **linamarkeeva@gmail.com**

соответствует Резолюции 1244 (1999) Совета Безопасности Организации Объединенных Наций и заключению Международного суда по Декларации независимости Косово»[1].

В Программе ООН «Границы второго административного уровня» (SALB), основной целью которой является сбор, поддержание и совместное использование геопространственных данных об административных единицах и границах первого и второго уровня в м-бе 1: 1 000 000, сделано специальное примечание: «Используемые обозначения и представление материалов программы SALB Организации Объединенных Наций не подразумевают выражения какого бы то ни было мнения со стороны Секретариата Организации Объединенных Наций относительно правового статуса какой-либо страны, территории, города или района или их властей, или относительно делимитации их границ»[2].

Обычно страны имеют несколько уровней административного деления. Как правило, общими названиями основных (крупнейших) административных единиц являются: штаты (субнациональные, а не суверенные государства), провинции, земли, области, мухафазы, кантоны, префектуры, округа, регионы, департаменты и эмираты. Они в свою очередь часто подразделяются на более мелкие административные единицы, известные под такими названиями, как округа, комаркас, районы, которые далее подразделяются на муниципалитеты, коммуны или общины, составляющие наименьшие единицы деления (органы местного самоуправления). Точное количество уровней административного деления и их структура в значительной степени различаются в зависимости от страны (а иногда и в пределах одной страны). Обычно чем меньше страна (по площади или численности населения), тем меньше уровней административного деления она имеет [*Туровский*, 2006].

Вопросы административно-территориального деления России рассмотрены в значительном количестве публикаций, но в основном эти публикации касаются вопросов истории формирования административно-территориального деления России [*Шульгина*, 2009; *Евдокимов*, 2010], правового статуса, функций и правового закрепления [*Забелина*, 2013; *Шугрина*, 2013; *Чертков*, 2019], тенденций и перспектив изменения административно-территориального деления России [*Файбусович*, *Мартынов*, 2006; *Бозо*, *Михеева*, 2014; *Данилко*, 2014], в т. ч. образования и эволюции федеральных округов [*Заяц*, 2000; *Родоман*, 2000; *Шульгина*, *Халатов*, 2008], влиянию политических, социальных и экономических факторов на административно-территориальное устройство России [*Романов*, 2006; *Туровский*, 2006; *Гладкий*, 2007; *Белоусов*, 2011; *Бозо*, *Михеева*, 2015].

Значительно меньше публикаций, касающихся вопросов урегулирования территориальных проблем (споров) между субъектами Российской Федерации [*Евлоев*, 2019; *Джамиль*, 2020]. Наличие территориального спора между Ивановской и Костромской областями упомянуты без раскрытия подробностей в работе [*Забелина*, 2013]. Вопросы о решении территориальных проблем между Москвой и Московской областью, Еврейской автономной областью и Амурской областью, Костромской и Вологодской областями, Ивановской и Нижегородской областями, изменении границы города федерального значения Санкт-Петербурга рассмотрены с указанием причин проблем, постановлений Совета Федерации Федерального Собрания в работе [*Шугрина*, 2013]. В ней на основании анализа действующих нормативных правовых актов и складывающейся правоприменительной практики выделены 8 стадий производства по изменению границ между субъектами Российской Федерации от возникновения потребности изменения

---

1 Flu News Europe (Новости гриппа в Европе). Электронный ресурс: https://flunewseurope.org/ (дата обращения 20.02.2023).

2 UN Programme. Borders of the second administrative level (SALB). Программа ООН «Границы второго административного уровня». Электронный ресурс: https://www.unsalb.org/home (дата обращения 20.02.2023).

границ и выдвижения соответствующей инициативы до реализации решения об изменении границ и обжалования или опротестования принимаемых на разных этапах решений. Предлагаемая схема работ по изменению границ между субъектами Российской Федерации завершается делимитацией границы (уточнении нового картографического описания) и не предусматривает ее демаркацию.

Учитывая проводимые в настоящее время работы Росреестра о внесении данных о границах субъектов Российской Федерации в Единый государственный реестр недвижимости (ЕГРН), важным элементом качества установления границ субъектов Российской Федерации является точность их пространственного положения, которая в необходимой и достаточной степени должна обеспечивать однозначную геопространственную привязку статистических данных и исключать любые противоречия в политической и хозяйственной деятельности смежных регионов страны.

Целью настоящей работы является анализ международных и национальных правовых и технических актов, регулирующих установление, изменение и кодирование территорий и границ 1 уровня, обосновывающих необходимую и достаточную точность установления и изменения границ субъектов Российской Федерации, обеспечивающую не только геопространственную привязку статистических данных, но также хозяйственную деятельность смежных регионов.

В связи с проведением в настоящее время Росреестром работ по установлению и внесению в Единый государственный реестр недвижимости границ между субъектами Российской Федерации данная тема является актуальной.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Существующее административно-территориальное устройство России и количество уровней административного деления обусловлены обширностью территории нашей страны. Высшим уровнем границ нашего государства является государственная граница, которая на отдельных участках может быть сухопутной или водной (морской, речной, озерной), а проходящая по линии границы вертикальная плоскость определяет пределы государственной территории Российской Федерации в воздушном пространстве и в недрах Земли.

Российское законодательство о государственной границе состоит из Конституции Российской Федерации[1], пяти Федеральных конституционных законов о принятии в Российскую Федерацию и образовании в ее составе новых субъектов Российской Федерации, международных договоров Российской Федерации, Закона Российской Федерации «О Государственной границе Российской Федерации»[2]. Подзаконными актами являются Межгосударственный классификатор стран мира (МКСМ)[3], Межгосударственный стандарт Коды названий стран[4] и Общероссийский классификатор стран мира (ОКСМ)[5].

Следующим (первым) уровнем границ являются границы субъектов Российской Федерации. Российское законодательство о границах 1-го уровня основано на Конституции Российской Федерации[2], 11 Федеральных конституционных законах о принятии в

---

1 Конституция Российской Федерации: Принята всенародным голосованием 12 декабря 1993 г. с изменениями, одобренными в ходе общероссийского голосования 1 июля 2020 г.

2 Закон Российской Федерации от 1 апреля 1993 г. № 4730-1 «О Государственной границе Российской Федерации».

3 Межгосударственный классификатор стран мира (МКСМ). МК (ИСО 3166) 004-97.

4 Межгосударственный стандарт. ГОСТ 7.67-2003 (ИСО 3166-1:1997) Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Коды названий стран.

5 Общероссийский классификатор стран мира (ОКСМ). ОК (МК (ИСО 3166) 004-97) 025-2001.

Российскую Федерацию, изменении наименований и территорий субъектов Российской Федерации и таких подзаконных актах, как Общероссийский классификатор экономических регионов (ОКЭР)[1], Общероссийский классификатор объектов административно-территориального деления (ОКАТО)[2], Общероссийский классификатор территорий муниципальных образований (ОКТМО)[3].

Образованные в 2000 г. по Указу Президента Российской Федерации «О полномочном представителе Президента Российской Федерации в федеральном округе»[4] федеральные округа не являлись новым административно-территориальным делением страны, но действующая редакция «Общероссийского классификатора экономических регионов»[5] включает коды, наименования и состав 8 федеральных округов: Центральный, Северо-Западный, Приволжский, Уральский, Северо-Кавказский, Южный, Сибирский и Дальневосточный. Поскольку к территориям и границам федеральных округов отнесены различные статистические данные, целесообразно рассматривать уровень федеральных округов как дополнительный уровень административно-территориального деления 1+.

Границы 2-го уровня внутри субъектов Российской Федерации означают границы, в пределах которых реализуются полномочия органов местного самоуправления. Установление границ 2-го уровня относится к компетенции органов государственной власти субъектов Российской Федерации, определяется в законах субъектов Российской Федерации и регламентируется Указом Президиума Верховного Совета РСФСР от 17 августа 1982 г. «О порядке решения вопросов административно-территориального устройства РСФСР»[6], который действует в части, не противоречащей законодательству Российской Федерации, и Федеральным законом «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации»[7]. Подзаконными актами являются Общероссийский классификатор объектов административно-территориального деления (ОКАТО)[8], Общероссийский классификатор территорий муниципальных образований (ОКТМО)[9].

Требования к точности пространственного положения границ различного уровня определены Основными положениями по картографическому обеспечению делимитации[10] и Основными положениями по топографо-геодезическому и картографическому обеспечению демаркации государственной границы Российской федерации[11], Правилами контроля отображения границ на картах, предназначенных для открытого опубликования и

---

1 Общероссийский классификатор экономических регионов (ОКЭР). ОК 024-95.

2 Общероссийский классификатор объектов административно-территориального деления (ОКАТО). ОК 019-95.

3 Общероссийский классификатор территорий муниципальных образований (ОКТМО). ОК 033-2013

4 Указ Президента Российской Федерации от 13 мая 2000 г. № 849 «О полномочном представителе Президента Российской Федерации в федеральном округе».

5 Общероссийский классификатор экономических регионов (ОКЭР). ОК 024-95.

6 Указ Президиума Верховного Совета РСФСР от 17 августа 1982 г. «О порядке решения вопросов административно-территориального устройства РСФСР».

7 Федеральный закон от 6 октября 2003 г. № 131-ФЗ «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации».

8 Общероссийский классификатор объектов административно-территориального деления (ОКАТО). ОК 019-95.

9 Общероссийский классификатор территорий муниципальных образований (ОКТМО). ОК 033-2013

10 ГКИНП (ГНТА)-05-253-01. Основные положения по картографическому обеспечению делимитации государственной границы Российской Федерации.

11 ГКИНП (ГНТА)-14-272-03. Основные положения по топографо-геодезическому и картографическому обеспечению демаркации государственной границы Российской Федерации.

с пометкой «для служебного пользования»[1], Приказом Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии[2], «Рекомендациями по решению проблемных вопросов, возникающих у органа регистрации прав при исправлении реестровых ошибок»[3], письмом Росреестра «О типовых ошибках при подготовке землеустроительной документации по описанию местоположения границ между субъектами Российской Федерации»[4].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

О порядке установления и изменения границ

В работе «О системе классификации и кодирования территорий в Российской Федерации» были проанализированы системы классификации и кодирования административных и особо выделенных территорий Российской Федерации различного уровня для реализации пространственной привязки статистической информации к территориям, имеющим пространственное описание. Был сделан вывод о том, что для организации взаимодействия тематических баз данных различных органов государственного управления необходимо однозначное определение территориальных объектов Российской Федерации в единой системе классификации и кодирования. Это потребует доработки и согласования классификаторов ОКЭР, ОКАТО и ОКТМО [*Побединский* и др., 2020].

Основная цель установления границ состоит в том, что границы определяют пределы осуществления публичной власти соответствующего уровня, не допуская вмешательства властных органов смежного территориального образования.

В статье 67 Конституции Российской Федерации закреплено, что границы между субъектами Российской Федерации могут быть изменены с их взаимного согласия[5]. С этой целью высшими должностными лицами субъектов Российской Федерации (руководителями высших исполнительных органов государственной власти субъектов Российской Федерации) заключается соответствующее соглашение об изменении границ, которое утверждается законодательными (представительными) органами государственной власти этих субъектов.

Для утверждения изменения границ между субъектами Российской Федерации в соответствии со статьей 145 Регламента Совета Федерации[6] в Совет Федерации представляются следующие документы:

---

1 ГКИНП (ОНТА)-14-270-03 Правила контроля отображения границ на картах, предназначенных для открытого опубликования и с пометкой «для служебного пользования».

2 Приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 23 октября 2020 г. № П/0393 «Об утверждении требований к точности и методам определения координат характерных точек границ земельного участка, требований к точности и методам определения координат характерных точек контура здания, сооружения или объекта незавершенного строительства на земельном участке, а также требований к определению площади здания, сооружения, помещения, машиноместа».

3 Рекомендации по решению проблемных вопросов, возникающих у органа регистрации прав при исправлении реестровых ошибок. Доведены письмом Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 24 декабря 2021 г. № 8-03900/21@.

4 Письмо Росреестра от 19 июня 2020 г. № 18-02326/20@ «О типовых ошибках при подготовке землеустроительной документации по описанию местоположения границ между субъектами Российской Федерации».

5 Конституция Российской Федерации: Принята всенародным голосованием 12 декабря 1993 г. с изменениями, одобренными в ходе общероссийского голосования 1 июля 2020 г.

6 Регламент Совета Федерации. Принят постановлением Совета Федерации Федерального Собрания Российской Федерации от 30 января 2002 г. № 33-СФ (в ред. 17.01.2023).

- соглашение (договор) об изменении границ, подписанное высшими должностными лицами субъектов Российской Федерации, границы между которыми предполагается изменить, и утвержденное законодательными (представительными) органами государственной власти этих субъектов Российской Федерации;
- обоснование изменения границ, согласованное субъектами Российской Федерации (пояснительная записка, содержащая обоснование целесообразности изменения границ между субъектами Российской Федерации, сведения о передаваемых территориях, перечень расположенных на них административно-территориальных и муниципальных образований, копии документов о результатах выявленного в соответствии с законодательством субъектов Российской Федерации мнения населения, проживающего на соответствующих территориях, по данному вопросу);
- карта местности с нанесенными на ней линией границы между субъектами Российской Федерации и предлагаемой линией границы между ними (картографическое изображение линии границы);
- заключение Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии по соглашению (договору) об изменении границ.

Соглашение (договор) об изменении границ должно содержать картографическое описание линии границы между субъектами Российской Федерации, образующейся в результате осуществляемого изменения границ. Картографическое описание линии границы может быть оформлено в виде приложения к соглашению (договору) об изменении границ[1].

Границы субъектов Российской Федерации не нуждаются в международном признании, и поэтому не требуется и международно-правового регулирования их установления и изменения. Это внутреннее дело Российской Федерации.

Немаловажной проблемой является отсутствие определенности в вопросе об установлении пределов территорий субъектов Российской Федерации. При этом границы многих субъектов Российской Федерации не отмечены на местности, а также не во всех субъектах существуют приложения к Уставу с указанием границ. Более того, в некоторых субъектах Российской Федерации существуют значительные расхождения между описанием (картографическим, координатным) границ и их реальным прохождением на местности.

Но самой главной проблемой являются споры о границах между регионами. В целях разрешения данной проблемы Министерство экономического развития Российской Федерации и Федеральная кадастровая палата разработала Рекомендации о заключении соглашений об установлении границ [*Чертков*, 2019].

В данных рекомендациях разработчики стремились решить проблемы единообразия и «совместимости» установления границ. Но они не учли многие нюансы, например: на территории Московской области заключены соглашения об описании местоположения границ, которые позволяют сопредельным регионам совместно и единообразно описать уже установленную и признанную границу. Таким образом, заключать соглашения об уже установленных границах представляется неразумным.

Кроме того, разработчики рекомендаций не учли так называемый «человеческий фактор». Само начало процедуры обсуждения положения границ субъектов Российской Федерации порождает ситуацию спора по этому вопросу, поскольку и органы публичной власти, и сами жители с наибольшей вероятностью будут использовать недостаточно

[1] Регламент Совета Федерации. Принят постановлением Совета Федерации Федерального Собрания Российской Федерации от 30 января 2002 г. № 33-СФ (в ред. 17.01.2023).

урегулированные ситуации в пользу «своего субъекта». При этом имеют место быть и случаи, когда жители географически отрезаны от административных центров и инфраструктуры «своего» региона и имеют сложившуюся связь с соседним регионом.

Сложность решения проблемы установления и изменения границ субъектов Российской Федерации можно проиллюстрировать историей разработки, рассмотрения и отклонения проекта федерального закона «Об изменении административных границ субъектов Российской Федерации»[1]. Первая редакция законопроекта была представлена в Государственную Думу 22 мая 2002 г. Комитет Государственной Думы по делам Федерации и региональной политике, назначенный ответственным, 12 ноября 2002 г. принял решение о представлении законопроекта в Совет Государственной Думы. В январе 2003 г. состав инициаторов законопроекта был дополнен, и 15 января 2003 г. внесена новая редакция законопроекта (депутаты Л.А. Иванченко, Ю.М. Конев, В.Н. Лысенко, О.В. Шеин, В.Н. Южаков).

Советом Государственной Думы 20 мая 2003 г. принято решение внести законопроект на рассмотрение Государственной Думы. Рассмотрение законопроекта Государственной Думой состоялось дважды, 11 июня 2003 г. и 9 сентября 2003 г. На заседании 11 июня 2003 г. депутат А.Г. Чехоев из фракции Коммунистической партии Российской Федерации внес предложение исключить рассмотрение законопроекта в первом чтении из повестки заседания. Результаты голосования: за — 132 чел. (29,3 %), против — 4 чел. (0,9 %), воздержалось — 0 чел. (0,0 %); голосовало — 136 чел., не голосовало — 314 чел. (69,8 %). Решение об исключении законопроекта из повестки не принято.

Рассмотрение Государственной Думой законопроекта в первом чтении состоялось 9 сентября 2003 г. Заместитель председателя Комитета по делам Федерации и региональной политике, один из авторов законопроекта Юрий Михайлович Конев в своем докладе отметил: «Сегодня я могу показать вам спорную карту России (примерно 36 спорных вопросов в Российской Федерации по межсубъектным границам). И если вы думаете, что мы писали закон по изменению границ для того, чтобы разжечь пожар, то как раз суть этого законопроекта совершенно в другом… Первоначально у нас был законопроект об административных границах субъектов Федерации. После согласования с родственным комитетом Совета Федерации мы договорились, что мы должны сделать законопроект не о границах, а об изменении границ между субъектами Российской Федерации… Необходимость принятия федерального закона вытекает из положений части 3 статьи 67 и пункта «а» части 1 статьи 102 Конституции Российской Федерации... Да, действительно, в Конституции, в статье 67 записано, что границы между субъектами Российской Федерации могут быть изменены с их взаимного согласия. И все. А каков механизм этого изменения? Что, каждый субъект Федерации должен свой закон издавать по этому поводу? И как эти законы будут стыковаться? Должен быть федеральный закон, который прописывал бы механизм. И мы постарались прописать закон таким образом, чтобы это был закон прямого действия, который прописывает весь механизм возможного изменения административных границ между субъектами Федерации… По состоянию на 12 ноября 2002 г. от 36 субъектов Федерации получены отзывы, 32 субъекта Федерации высказались положительно, за принятие, 4 субъекта Федерации высказались против»[2].

---

1 Законопроект № 208899-3 «Об изменении административных границ субъектов Российской Федерации». Электронный ресурс: https://sozd.duma.gov.ru/bill/208899-3 (дата обращения 15.01.2023).

2 Фрагмент стенограммы заседания Государственной Думы от 9 сентября 2003 г. № 251. Пункт 9. «Рассмотрение в первом чтении проекта федерального закона № 208899-3 «Об изменении административных границ субъектов Российской Федерации». Электронный ресурс: https://sozd.duma.gov.ru/bill/208899-3 (дата обращения 16.01.2023).

Результаты голосования были обескураживающими: за — 49 чел. (10,9 %), против — 22 чел. (4,9 %), воздержалось — 0 чел. (0,0 %). Голосовали 71 чел., не голосовали 379 чел. (84,2 %). Проект федерального закона «Об изменении административных границ субъектов Российской Федерации» не был принят в первом чтении, т. к. 84,2 % депутатов Государственной Думы проигнорировали голосование.

Установление границ субъектов Российской Федерации предполагает определенную правовую процедуру. Соответствующая процедура складывается из двух дополняющих друг друга процессов: делимитации и демаркации.

Делимитация внутренних границ публично-территориальных образований представляет собой обозначение на специальных картах и описание по ним прохождения линии границы, составляющих неотъемлемую часть соответствующего нормативного правового акта. Демаркация такой границы представляет собой обозначение и оборудование границы на местности. Кроме юридического определения и установления границ на местности, делимитация и демаркация означают государственное признание границ субъектов Российской Федерации. При их отсутствии также могут происходить территориальные споры. Между процедурами делимитации и демаркации могут быть существенные временные разрывы. Границы могут быть установлены в нормативных правовых документах, но не установлены на местности. Более того, многие участки границ субъектов Российской Федерации, а также их административно-территориальных единиц и муниципальных образований, не прошли демаркации до настоящего времени [*Забелина*, 2013].

При рассмотрении проблемы соотношения административно-территориального устройства субъектов Российской Федерации и территориальной организации местного самоуправления необходимо основываться на правовой позиции Конституционного Суда Российской Федерации. В его Постановлении от 24 января 1997 г. № 1-П и Определении от 15 мая 2007 г. № 406-О-П указывается, что «из федеративной природы государственности России в том виде, как она закреплена в статьях 1 (часть 1), 11 (часть 2), 66 (часть 1), 71, 72, 73, 76 и 77 Конституции Российской Федерации вытекает, что в ведении Российской Федерации находится федеративное устройство, а в ведении республик, входящих в состав Российской Федерации — их территориальное устройство. Вопросы территориальных основ местного самоуправления, формирования муниципальных образований с одной стороны, и административно-территориального устройства субъектов Российской Федерации — с другой, будучи связанными между собой, имеют самостоятельное значение и, обладая собственным юридическим содержанием, относятся к различным сферам ведения. Первый — к совместному ведению Российской Федерации и ее субъектов, второй — к исключительному ведению субъектов Российской Федерации» [Практика применения…, 2020].

Еще более конкретно разграничивает вопросы административно-территориального устройства субъектов Российской Федерации и территориальной организации местного самоуправления Постановление Конституционного Суда Российской Федерации от 24 января 1997 г. № 1-П, в котором сделан вывод «пока границы самого субъекта Российской Федерации не установлены (не определены), границы муниципальных образований также нельзя рассматривать как установленные в границах этого субъекта Российской Федерации, сопредельных с соседним субъектом Российской Федерации» [*Евлоев*, 2019].

Таким образом, позиция Конституционного Суда Российской Федерации однозначно предполагает не только делимитацию границ субъектов Российской Федерации на картах соответствующего масштаба, но также демаркацию этих границ, особенно на спорных территориях.

Финансово-экономическим обоснованием от 22 мая 2002 г. к проекту федерального закона «Об изменении административных границ субъектов Российской Федерации», исходя из протяженности границ между субъектами Российской Федерации 82 000 км, предусматривалась установка 246 000 межевых знаков (3 знака на каждый километр границы), включая точки стыков границ 3 и более субъектов Российской Федерации. Предусматривалось согласование установленной границы как минимум с 4 смежными территориями. Определение координат межевых знаков предусматривалось с использованием спутниковых геодезических приемников[1].

В докладе заместителя председателя Комитета по делам Федерации и региональной политике Ю.М. Конева при рассмотрении проекта федерального закона «Об изменении административных границ субъектов Российской Федерации» 9 сентября 2003 г. отмечалось: «Я знаю, что некоторые фракции возмутило то, что в него включены понятие межевых знаков, возможность установления межевых знаков. Но статья 17 законопроекта четко определяет, что по согласованию субъектов Федерации межевые знаки могут быть поставлены, а можно их и не ставить. Я действительно считаю, что, может быть, не стоит ставить межевые знаки, но в законопроекте это прописано: хочешь — ставь, хочешь — не ставь»[2].

17 декабря 2001 г. был принят федеральный конституционный закон «О порядке принятия в Российскую Федерацию и образования в ее составе нового субъекта Российской Федерации»[3]. В соответствии с законом новый субъект может быть создан в результате присоединения к Российской Федерации иностранного государства или его части, а также путем объединения двух и более граничащих между собой регионов.

В статье 65 Конституции Российской Федерации[4] приведен перечень всех субъектов Российской Федерации, перечень 10 федеральных конституционных законов о принятии в Российскую Федерацию, изменении наименований и территорий субъектов Российской Федерации и перечень 7 Указов Президента Российской Федерации «О включении новых наименований субъектов Российской Федерации в статью 65 Конституции Российской Федерации».

Пять федеральных конституционных законов вносят изменения не только в границы субъектов Российской Федерации, но также в государственную границу Российской Федерации. Это такие законы, как «О принятии в Российскую Федерацию Республики Крым и образовании в составе Российской Федерации новых субъектов — Республики Крым и города федерального значения Севастополя»[5], «О принятии в Российскую Федерацию Донецкой Народной Республики и образовании в составе Российской

---

1 Финансово-экономическое обоснование от 22 мая 2002 г. к проекту федерального закона «Об изменении административных границ субъектов Российской Федерации». Электронный ресурс: https://sozd.duma.gov.ru/bill/208899-3#bh_histras (дата обращения 15.01.2023).

2 Фрагмент стенограммы заседания Государственной Думы от 9 сентября 2003 г. № 251. Пункт 9. Рассмотрение в первом чтении проекта федерального закона № 208899-3 «Об изменении административных границ субъектов Российской Федерации». Электронный ресурс: https://sozd.duma.gov.ru/bill/208899-3 (дата обращения 16.01.2023).

3 Федеральный конституционный закон от 17 декабря 2001 г. № 6-ФКЗ «О порядке принятия в Российскую Федерацию и образования в ее составе нового субъекта Российской Федерации».

4 Конституция Российской Федерации: Принята всенародным голосованием 12 декабря 1993 г. с изменениями, одобренными в ходе общероссийского голосования 1 июля 2020 г.

5 Федеральный конституционный закон от 21 марта 2014 г. № 6-ФКЗ «О принятии в Российскую Федерацию Республики Крым и образовании в составе Российской Федерации новых субъектов — Республики Крым и города федерального значения Севастополя».

Федерации нового субъекта — Донецкой Народной Республики»[1], «О принятии в Российскую Федерацию Луганской Народной Республики и образовании в составе Российской Федерации нового субъекта — Луганской Народной Республики»[2], «О принятии в Российскую Федерацию Запорожской области и образовании в составе Российской Федерации нового субъекта — Запорожской области»[3], «О принятии в Российскую Федерацию Херсонской области и образовании в составе Российской Федерации нового субъекта — Херсонской области»[4].

Федеральным конституционном законом «О принятии в Российскую Федерацию Республики Крым и образовании в составе Российской Федерации новых субъектов — Республики Крым и города федерального значения Севастополя» установлено, что пределы территории новых субъектов Российской Федерации Республики Крым и города федерального значения Севастополя определяются границами территории Республики Крым и территории города федерального значения Севастополя, существовавшими на день принятия в Российскую Федерацию Республики Крым и образования в составе Российской Федерации новых субъектов. Граница Республики Крым на суше, сопряженная с территорией Украины, является Государственной границей Российской Федерации.

Федеральными конституционными законами установлено, что пределы территории новых субъектов Российской Федерации Донецкой Народной Республики и Луганской Народной Республики определяются границами их территории, установленными конституциями республик на день их образования и на день их принятия в Российскую Федерацию и образования в составе Российской Федерации новых субъектов. Границы республик, сопряженные с территорией иностранного государства, являются Государственной границей Российской Федерации.

Федеральными конституционными законами установлено, что пределы территории новых субъектов Российской Федерации Запорожской области и Херсонской области определяются границами их территории, существовавшими на день их принятия в Российскую Федерацию и образования в составе Российской Федерации новых субъектов. Границы областей, сопряженные с территорией иностранного государства, являются Государственной границей Российской Федерации.

Пять федеральных конституционных законов вносят изменения только в границы субъектов Российской Федерации. Это такие законы, как «Об образовании в составе Российской Федерации нового субъекта Российской Федерации в результате объединения Пермской области и Коми-Пермяцкого автономного округа»[5], «Об образовании в составе Российской Федерации нового субъекта Российской Федерации в результате объединения Красноярского края, Таймырского (Долгано-Ненецкого) автономного округа и

---

1 Федеральный конституционный закон от 4 октября 2022 г. № 5-ФКЗ «О принятии в Российскую Федерацию Донецкой Народной Республики и образовании в составе Российской Федерации нового субъекта — Донецкой Народной Республики».

2 Федеральный конституционный закон от 4 октября 2022 г. № 6-ФКЗ «О принятии в Российскую Федерацию Луганской Народной Республики и образовании в составе Российской Федерации нового субъекта — Луганской Народной Республики».

3 Федеральный конституционный закон от 4 октября 2022 г. № 7-ФКЗ «О принятии в Российскую Федерацию Запорожской области и образовании в составе Российской Федерации нового субъекта — Запорожской области».

4 Федеральный конституционный закон от 4 октября 2022 г. № 8-ФКЗ «О принятии в Российскую Федерацию Херсонской области и образовании в составе Российской Федерации нового субъекта — Херсонской области».

5 Федеральный конституционный закон от 25 марта 2004 г. № 1-ФКЗ «Об образовании в составе Российской Федерации нового субъекта Российской Федерации в результате объединения Пермской области и Коми-Пермяцкого автономного округа».

Эвенкийского автономного округа»[1], «Об образовании в составе Российской Федерации нового субъекта Российской Федерации в результате объединения Камчатской области и Корякского автономного округа»[2], «Об образовании в составе Российской Федерации нового субъекта Российской Федерации в результате объединения Иркутской области и Усть-Ордынского Бурятского автономного округа»[3], «Об образовании в составе Российской Федерации нового субъекта Российской Федерации в результате объединения Читинской области и Агинского Бурятского автономного округа»[4].

Федеральными конституционными законами установлено, что границы новых субъектов Российской Федерации Пермского края, Красноярского края, Камчатского края, Забайкальского края и Иркутской области совпадают с их границами на день принятия соответствующих федеральных конституционных законов и охватывают территории объединившихся субъектов Российской Федерации.

Продолжающийся процесс изменения границ субъектов Российской Федерации в настоящее время подтверждает актуальность исследования.

О точности геодезических и картографических работ при установлении и изменении границ

Приказом Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии[5] средняя квадратическая погрешность определения координат (местоположения) характерных точек границы установлена 0,1–0,5 м для застроенных территорий и 2,5–5,0 м для прочих категорий земель.

В «Рекомендациях по решению проблемных вопросов, возникающих у органа регистрации прав при исправлении реестровых ошибок»[6] приведены требования к картографическому материалу в целях применения его для исправления реестровых ошибок и средние квадратические погрешности при определении координат характерных точек границ фотограмметрическим либо картометрическим методом. При определении координат характерных точек по аналоговому картографическому материалу величина средней квадратической погрешности принимается равной 0,0012 м в масштабе соответствующей карты, при использовании цифровых карт — 0,0007 м в масштабе соответствующей карты, при использовании цифровых фотокарт, ортофотопланов —

---

1 Федеральный конституционный закон от 14 октября 2005 г. № 6-ФКЗ «Об образовании в составе Российской Федерации нового субъекта Российской Федерации в результате объединения Красноярского края, Таймырского (Долгано-Ненецкого) автономного округа и Эвенкийского автономного округа».

2 Федеральный конституционный закон от 12 июля 2006 г. № 2-ФКЗ «Об образовании в составе Российской Федерации нового субъекта Российской Федерации в результате объединения Камчатской области и Корякского автономного округа».

3 Федеральный конституционный закон от 30 декабря 2006 г. № 6-ФКЗ «Об образовании в составе Российской Федерации нового субъекта Российской Федерации в результате объединения Иркутской области и Усть-Ордынского Бурятского автономного округа».

4 Федеральный конституционный закон от 21 июля 2007 г. № 5-ФКЗ «Об образовании в составе Российской Федерации нового субъекта Российской Федерации в результате объединения Читинской области и Агинского Бурятского автономного округа».

5 Приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 23 октября 2020 г. № П/0393 «Об утверждении требований к точности и методам определения координат характерных точек границ земельного участка, требований к точности и методам определения координат характерных точек контура здания, сооружения или объекта незавершенного строительства на земельном участке, а также требований к определению площади здания, сооружения, помещения, машиноместа».

6 Рекомендации по решению проблемных вопросов, возникающих у органа регистрации прав при исправлении реестровых ошибок. Доведены письмом Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 24 декабря 2021 г. № 8-03900/21@.

0,0005 м в масштабе соответствующего материала. При использовании картографического материала м-ба 1: 2 000 средние квадратические погрешности на местности составят 2,4, 1,4 и 1,0 м на местности соответственно.

Требования к порядку установления и точности определения государственной границы и границ субъектов Российской Федерации могут существенно отличатся от требований к точности определения границ земельных участков. Особый статус административно-территориальных границ отмечен в пункте 11 «Порядка кадастрового деления территории Российской Федерации» — приложении № 1 к приказу Минэкономразвития России[1]. Приказом определено, что изменение описания местоположения границ между субъектами Российской Федерации, границ муниципальных образований и населенных пунктов, элементов планировочной структуры, как и прекращение существования, образование новых и изменение субъектов Российской Федерации, муниципальных образований и населенных пунктов, элементов планировочной структуры не влечет изменения кадастрового деления.

Постановлением Правительства Российской Федерации[2] установлены особые требования для государственной границы и границ субъектов Российской Федерации. Так, например, пункт 2 Правил определяет, что границы объектов землеустройства и/или отдельные части таких границ, совпадающие с государственной границей Российской Федерации, на местности не устанавливаются. Пункт 4 Правил определяет, что при установлении на местности границ между субъектами Российской Федерации узловые точки таких границ закрепляются долговременными межевыми знаками. Пункт 9 Правил определяет, что при выявлении пересечения границ между субъектами Российской Федерации с границами земельных участков, сведения о которых содержатся в государственном кадастре недвижимости, установление на местности таких границ приостанавливается. Информация о наличии указанных пересечений направляется в Федеральную службу государственной регистрации, кадастра и картографии либо в соответствующий территориальный орган этой Службы.

При установлении и определении на местности государственной границы приняты следующие виды работ:

- делимитация;
- демаркация;
- проверка прохождения линии границы (редемаркация).

Делимитацией границ называется определение положения и направления линии государственной границы по соглашению между сопредельными государствами. Порядок осуществления делимитации и ее картографического обеспечения определен Основными положениями[3]. Основными положениями не определены масштаб «делимитационной» топографической карты и точность положения и направления линии государственной границы. Эти вопросы решаются Межгосударственной комиссией индивидуально для каждого участка государственной границы.

Демаркация границ в международном праве — установление линии государственной границы на местности путем обозначения ее пограничными знаками. Порядок осуществления демаркации и ее топографо-геодезического и картографического

---

1 Приказ Министерства экономического развития Российской Федерации от 24 ноября 2015 г. № 877 «Об утверждении порядка кадастрового деления территории Российской Федерации, порядка присвоения объектам недвижимости кадастровых номеров, номеров регистрации, реестровых номеров границ».

2 Постановление Правительства Российской Федерации от 20 августа 2009 г. № 688 «Об утверждении Правил установления на местности границ объектов землеустройства».

3 ГКИНП (ГНТА)-05-253-01. Основные положения по картографическому обеспечению делимитации государственной границы Российской Федерации.

обеспечения определен Основными положениями[1]. Основными положениями не определены масштаб «демаркационной» топографической карты и точность положения и направления линии государственной границы. Эти вопросы решаются Межгосударственной комиссией индивидуально для каждого участка государственной границы. Тем не менее, пунктом 2.4.1 Основных положений установлены следующие требования по точности выполнения работ:

- в качестве исходных (для производства топографических работ и определения координат пограничных знаков) принимаются имеющиеся на местности пункты геодезической сети России и сопредельного государства 1-го, 2-го, 3-го и 4-го классов;
- координаты точек полевой подготовки аэроснимков и основных пограничных знаков определяются относительно исходных пунктов со средними квадратическими ошибками, обычно не превышающими ± 5 м;
- методы определения координат могут быть как традиционными (триангуляция и полигонометрия, засечками, проложением ходов), так и новейшими, с использованием средств и методов спутниковой геодезии.

Большинство официальных тематических данных, входящих в систему федерального статистического наблюдения, пространственно привязаны методом косвенной географической привязки к центрам или границам административных территорий различного уровня. Использование географических идентификаторов для пространственной привязки регламентируется ГОСТ Р 70316-2022[2].

Правилами контроля отображения границ на картах[3] установлены общие требования по контролю за правильным отображением на картографических материалах Государственной границы Российской Федерации, границ субъектов Российской Федерации и другой информации об объектах местности.

Правилами установлено, что для контроля правильности отображения границ в числе прочих используются карты-эталоны м-бов 1: 500 000 и 1: 1 000 000 для проверки государственных границ, дежурная справочная карта м-ба 1: 100 000 для проверки границ субъектов и дежурные экземпляры справочников административно-территориального устройства субъектов Российской Федерации для границ административно-территориальных единиц.

Исходя из масштабов карт-эталонов, дежурной справочной карты и средней квадратической погрешности определения границ картометрическим методом равной 0,0012 м в масштабе соответствующей карты можно определить, что контроль правильности отображения границ на картах может быть осуществлен со средними квадратическими погрешностями 600–1200 м на местности для государственной границы и 120 м на местности для границ субъектов Российской Федерации.

Данной точности достаточно для пространственной привязки тематической информации в соответствии с требованиями национального стандарта Российской Федерации ГОСТ Р 70316-2022[4], но учитывая, что в мультимасштабных картах,

---

1 ГКИНП (ГНТА)-14-272-03. Основные положения по топографо-геодезическому и картографическому обеспечению демаркации государственной границы Российской Федерации.

2 ГОСТ Р 70316-2022 Пространственные данные. Пространственная привязка по географическим идентификаторам.

3 ГКИНП (ОНТА)-14-270-03 Правила контроля отображения границ на картах, предназначенных для открытого опубликования и с пометкой «для служебного пользования»

4 ГОСТ Р 70316-2022 Пространственные данные. Пространственная привязка по географическим идентификаторам.

используемых в современных ГИС, наиболее крупными масштабами являются 1: 50 000 и 1: 25 000, представляется целесообразным применять данные о положении границ субъектов Российской Федерации со средними квадратическими погрешностями 60–30 м на местности, что соответствует точности делимитации. Более высокая точность необходима только для определения кадастровых границ и внесения этих данных в Единый государственный реестр недвижимости (ЕГРН).

Проводимые в настоящее время работы Росреестра о внесении данных о границах субъектов Российской Федерации в Единый государственный реестр недвижимости предназначены, в числе прочего, для устранения отмеченного Конституционным судом Российской Федерации противоречия: «пока границы самого субъекта Российской Федерации не установлены (не определены), границы муниципальных образований также нельзя рассматривать как установленные в границах этого субъекта Российской Федерации, сопредельных с соседним субъектом Российской Федерации» [*Евлоев*, 2019].

Оценка корректности государственного регулирования в вопросе точности пространственного описания границ субъектов Российской Федерации осуществлялась путем исследования требований письма Росреестра[1], определяющего допустимую погрешность пересчета координат ее характерных точек из одной системы координат в другую при составлении метрического описания границы. При этом оценивалась обоснованность этих требований с точки зрения возможности их исполнения в условиях применения в Российской Федерации для ведения ЕГРН местных систем координат, имеющих различную по однородности и точности геодезическую основу.

Следует отметить, что одним из важных моментов при установлении границы между субъектами Российской Федерации является ее однозначное координатное описание, что можно однозначно реализовать в единой государственной системе координат. Однако в соответствии с действующим законодательством метрическое описание границ субъектов Российской Федерации при ведении ЕГРН осуществляется в местных системах координат (МСК), установленных в отношении кадастровых округов, с определенными для них параметрами перехода к единой государственной системе координат[2]. Таким образом, описание единого объекта — границы между смежными субъектами Российской Федерации, осуществляемое в двух МСК этих регионов — является в этом смысле ущербным решением. Даже в том случае, если в смежных субъектах РФ используются МСК, базирующиеся на идентичной государственной системе координат (ГСК), например — СК-42, пересчет координатного описания границы из СК-42 в созданные на ее основе МСК (МСК-NN_42) будет содержать в себе ошибки. Это приводит к тому, что единый объект — граница между смежными субъектами Российской Федерации — будучи пересчитанной из СК-42 в МСК-NN_42 смежных регионов, превращается фактически в три границы, несовпадение в пространстве координат характерных точек которых происходит на величины, равные ошибкам пересчета из ГСК в МСК-NN_42. При этом в соответствии с существующей методикой выполнения землеустроительных работ по установлению границ между субъектами Российской Федерации[3], граница субъекта Российской Федерации, представленная в двух МСК-NN_42 соседних регионов, должна быть пересчитана в ГСК-2011 с проверкой допуска на расхождения координат характерных точек. Таким образом, в

---

1 Письмо Росреестра от 19.06.2020 г. № 18-02326/20@ «О типовых ошибках при подготовке землеустроительной документации по описанию местоположения границ между субъектами Российской Федерации».

2 Федеральный закон от 13 июля 2015 г. № 218-ФЗ «О государственной регистрации недвижимости»

3 Письмо Росреестра от 19.06.2020 г. № 18-02326/20@ «О типовых ошибках при подготовке землеустроительной документации по описанию местоположения границ между субъектами Российской Федерации».

ГСК-2011 появляется еще две версии координатного описания границы между субъектами Российской Федерации (а всего 5), несовпадение координат характерных точек которых в пространстве равны погрешностям пересчета их координат из исходной ГСК в МСК-NN_42 и далее в ГСК-2011.

В условиях такого неоднозначного координатного описания границ между субъектами Российской Федерации регулятор стремится к минимизации расхождений координат характерных точек, представленных в различных системах координат. В письме Росреестра[1] это требование сформулировано следующим образом: «…при этом ошибки в значениях координат при пересчете из одной системы координат в другую при использовании легитимных параметров (ключей) перечета не должны превышать 0,03 м». Здесь важно отметить, что в приведенной цитате дословно речь идет об ошибке пересчета координат характерных точек из одной системы координат в другую, при этом по смыслу авторами письма имеется ввиду (и это подтверждено практикой проведения пространственной экспертизы принимаемых Росреестром документов по установлению границ между субъектами Российской Федерации), что и их координаты в конечной системе координат (ГСК-2011), будучи преобразованными из МСК смежных объектов, также не должны различаться на величину более чем 0,03 м. Однако при всей понятности стремления регулятора к минимизации расхождений в пространственном описании нескольких вариантов границ, данное требование является неисполнимым и в общем случае неполным.

Невозможность исполнения требований Письма[2] заключается в том, что пересчет из одной системы координат в другую, допуск на ошибку которого в нем определен в 3 см, осуществляется не напрямую, а в несколько этапов. Для того, чтобы осуществить требуемое сравнение в ГСК-2011 координаты идентичной характерной точки границы между смежными субъектами Российской Федерации, где используются МСК-01_42 и МСК-02_42 (номера МСК соседних регионов даны условно), требуется осуществить пересчеты из МСК-01_42 в СК-42, затем из СК-42 в ГСК-2011 и одновременно из МСК-02_42 в СК-42, затем из СК-42 в ГСК-2011.

Средняя квадратическая погрешность, которая допускается при пересчетах из МСК в ГСК-2011, (исходя из установленной в письме[3] погрешности на 1 пересчет в 3 см) вычисляется по формулам (1, 2):

из МСК-01_42:

$$M_{01\_42} = \sqrt{M_1^2 + M_2^2} = \sqrt{3.0^2 + 3.0^2} = 4.24 \text{ см} \quad (1),$$

из МСК-02_42:

---

1 Письмо Росреестра от 19 июня 2020 г. № 18-02326/20@ «О типовых ошибках при подготовке землеустроительной документации по описанию местоположения границ между субъектами Российской Федерации».

2 Письмо Росреестра от 19 июня 2020 г. № 18-02326/20@ «О типовых ошибках при подготовке землеустроительной документации по описанию местоположения границ между субъектами Российской Федерации».

3 Письмо Росреестра от 19 июня 2020 г. № 18-02326/20@ «О типовых ошибках при подготовке землеустроительной документации по описанию местоположения границ между субъектами Российской Федерации».

$$M_{02\_42} = \sqrt{M_3^2 + M_4^2} = \sqrt{3.0^2 + 3.0^2} = 4.24 \text{ см} \quad (2).$$

При сравнении координат характерной точки границы в ГСК-2011 должна рассматриваться допустимая общая средняя квадратическая погрешность преобразования координат из исходной СК (соответствующая МСК субъекта Российской Федерации) в целевую СК (ГСК-2011), а именно — между МСК-01_42 и МСК-02_42 (3):

$$M_{01\_42-02\_42} = \sqrt{M_{01\_42}^2 + M_{02\_42}^2} = \sqrt{4.24^2 + 4.24^2} = 6.0 \text{ см} \quad (3).$$

Таким образом, даже в том случае, если полностью соблюдены все требования письма, МСК смежных субъектов Российской Федерации основаны на идентичной ГСК (в приведенном примере это СК-42) и на всех этапах пересчета существовали бы легитимные параметры (ключи) перечета, требование письма[1] является некорректным (избыточным и невыполнимым). При установленном допуске на 1 пересчет в 3 см даже в самом идеальном случае, когда смежные субъекты имеют единую материнскую ГСК и наличии всех необходимых параметров (ключей) перечета, общая средняя квадратическая погрешность координат характерной точки границы между смежными субъектами Российской Федерации будет составлять 6 см.

В то же время для преобразований между системами координат СК-42, СК-95 и ГСК-2011 отсутствуют легитимные параметры (ключи) пересчета необходимой точности. Так, преобразование между этими системами координат может быть осуществлено с применением параметров перехода, установленных ГОСТ 32453-2017[2], в т. ч. между СК-42 и ГСК-2011 (точность порядка 10 м), СК-95 и ГСК-2011 (точность порядка 1 м), СК-42 и СК-95 (точность порядка 10 м).

Однако вышеназванные параметры в данном случае неприемлемы по точности, поэтому для задачи установления границы между субъектами Российской Федерации можно констатировать отсутствие легитимных параметров преобразования между системами координат СК-95, СК-42, ГСК-2011.

В условиях отсутствия возможности установления строгих математических зависимостей (ключей) между действующей (ГСК-2011) и отмененными государственными системами координат (СК-42, СК-95), другим способом получения координат характерной точки границы в ГСК-2011 на основе их координат в СК-42/СК-95 является метод построения цифровых моделей разностей координат между соответствующими системами координат, который применяется в ПО, разработанном ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД». Этот метод основан на интерполяции разностей координат пунктов ГГС в соответствующих системах координат. При этом по итогам интерполяции строятся модели (матрицы) деформации координат (далее — матрицы), устанавливающие связь по каждой из осей координат между следующими СК: СК-42–ГСК-2011, СК-95–ГСК-2011, СК-95–СК-42.

---

[1] Письмо Росреестра от 19 июня 2020 г. № 18-02326/20@ «О типовых ошибках при подготовке землеустроительной документации по описанию местоположения границ между субъектами Российской Федерации».

[2] ГОСТ 32453-2017. Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек.

Погрешность интерполяции координат в целевой СК на основе координат характерной точки границы в исходной СК по матрице каждой из осей координат может достигать величин до 10 см (шаг интерполяции матриц — 1' (порядка 2 км на местности), а скорость изменения разностей координат по каждой из осей координат на территории отдельных субъектов Российской Федерации может достигать 1 см на 200 м).

С учетом этого погрешность преобразования может достигать:

А) из СК-42 (базовая СК для МСК-NN_42) в ГСК-2011 (4):

$$M_{42-2011} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} = \sqrt{10.0^2 + 10.0^2} = 14.14 \text{ см} \quad (4),$$

Б) из СК-95 (базовая СК для МСК-NN_95) в ГСК-2011 (5):

$$M_{95-2011} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} = \sqrt{10.0^2 + 10.0^2} = 14.14 \text{ см} \quad (5).$$

При сравнении координат характерных точек границы в ГСК-2011 должна рассматриваться допустимая общая СКО преобразования координат из исходных СК смежных субъектов, являющихся базовыми для МСК субъектов (СК-42 и СК-95) в целевую СК (ГСК-2011), а именно (6):

$$M_{общ} = \sqrt{M_{42-2011}^2 + M_{95-2011}^2} = \sqrt{14.14^2 + 14.14^2} = 20.0 \text{ см} \quad (6).$$

Иными словами, при установлении границы между смежными субъектами Российской Федерации, в которых МСК ведения ЕГРН основывается на разных ГСК (СК-42 и СК-95) и где отсутствуют легитимные параметры пересчета между ГСК, СКО пересчета может достигать 0,2 м.

Таким образом, требования письма[1] (в части точности пересчета из одной системы координат в другую в случае, если они распространяются на величину расхождения координат в ГСК-2011, полученных путем преобразования из МСК смежных субъектов Российской Федерации), являются неисполнимыми даже при наличии легитимных ключей перехода между такими системами координат. Также в этом письме не урегулированы требования по точности преобразований координат характерных точек границы для случая отсутствия таких легитимных ключей перехода.

ВЫВОДЫ

Продолжающийся процесс изменения границ субъектов Российской Федерации в настоящее время приводит к необходимости внесения корректировок в структуры баз данных тематической (статистической) информации и, соответственно, корректировок пространственной привязки такой информации, что подтверждает актуальность исследования.

[1] Письмо Росреестра от 19 июня 2020 г. № 18-02326/20@ «О типовых ошибках при подготовке землеустроительной документации по описанию местоположения границ между субъектами Российской Федерации».

Полная определенность в вопросе о пределах территорий субъектов Российской Федерации на сегодняшний день отсутствует. Имеющееся законодательное регулирование установления и изменения границ субъектов Федерации явно является недостаточным. Вопросы изменения границ между субъектами Федерации не уточняются в федеральном законодательстве. Но при этом пункт 4 статьи 49 Федерального закона «Об общих принципах организации публичной власти в субъектах Российской Федерации»[1] устанавливает, что «на федеральные органы государственной власти не могут быть возложены полномочия органов государственной власти субъекта Российской Федерации по принятию конституции (устава) субъекта Российской Федерации и поправок к ней (к нему), по установлению системы органов государственной власти субъекта Российской Федерации, по изменению статуса субъекта Российской Федерации и по изменению границ между субъектами Российской Федерации».

В Российской Федерации уже был разработан проект Федерального закона «Об изменении административных границ субъектов Российской Федерации», и в 2002 г. был внесен в Государственную Думу. Основное внимание при разработке законопроекта было уделено именно процедурным вопросам и разграничению полномочий. Тем не менее, Государственная Дума в 2002 г. отклонила рассматриваемый законопроект в первом чтении. В частности против принятия законопроекта выступило Правительство Российской Федерации, указав, что вопрос об изменении границ между субъектами Федерации регламентируется Конституцией Российской Федерации, которая предоставляет право изменения этих границ самим субъектам с их взаимного согласия.

В целях решения проблем юридической техники описания границ субъектов Российской Федерации и преодоления проблемы одностороннего определения границ Министерством экономического развития Российской Федерации и Федеральной кадастровой палатой были разработаны Рекомендации о заключении соглашений об установлении границ. Разработчики стремились к решению проблемы единообразия и «совместности» установления границ. Вместе с тем сам подход вызывает категорическое возражение. В практике субъектов Российской Федерации уже заключены многочисленные соглашения об описании местоположения границ. Такое соглашение дает возможность сопредельным регионам совместно и единообразно описать уже установленную и признанную границу. Заключать соглашение об установлении уже давно установленных границ представляется юридическим нонсенсом.

Попытки регулирования правовых и технических проблем установления, уточнения и изменения административных границ субъектов Российской Федерации путем издания Росреестром писем и рекомендаций, относящих данную проблему к вопросам уточнения границ земельных участков, представляются неправомерными. Эта практика противоречит выводам Постановления Конституционного Суда Российской Федерации от 24 января 1997 г. № 1-П: «пока границы самого субъекта Российской Федерации не установлены (не определены), границы муниципальных образований также нельзя рассматривать как установленные в границах этого субъекта Российской Федерации, сопредельных с соседним субъектом Российской Федерации». Порядок действий, изложенный в работе [*Шугрина*, 2013], законодательно не закреплен и не включает этапа демаркации границ. Требования к точностным параметрам делимитации и демаркации границ субъектов Российской Федерации отсутствуют.

Координатное описание границ между субъектами Российской Федерации наиболее целесообразно осуществлять в единой государственной системе координат. В этом случае

[1] Федеральный закон от 21 декабря 2021 г. № 414-ФЗ «Об общих принципах организации публичной власти в субъектах Российской Федерации».

единый объект — граница между смежными субъектами Российской Федерации — будет сформирована безальтернативно в виде единого метрического описания в государственной системе координат, что абсолютно исключало бы любые противоречия в политической и хозяйственной деятельности смежных регионов страны и обеспечивало однозначную геопространственную привязку статистических данных. Использование для этих целей МСК, в которых ведется ЕГРН, и которые базируются на разной геодезической основе (СК-42/СК-95), делают координатное описание границы многовариантным (до 5 вариантов).

Решение перечисленных проблем видится в подготовке федерального закона и соответствующих подзаконных актов, которые бы решали все вопросы, касающиеся делимитации и демаркации границ субъектов Российской Федерации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке Межрегиональной общественной организации «Российское общество геодезии, картографии и землеустройства».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was performed with the support of the Interregional Public Organization “Russian Society of Geodesy, Cartography and Land Management”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белоусов В.М. Административно-территориальная таксономия российского пространства и эффект масштаба. Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Общественные науки, 2011. № 2. С. 56–60.

Бозо Н.В., Михеева Г.В. Альтернативный вариант административно-территориального деления в РФ. Идеи и идеалы, 2014. № 2 (20). С. 70–79.

Бозо Н.В., Михеева Г.В. Влияние изменений в административно-территориальном делении РФ на социальные и экономические показатели. Вестник Томского государственного университета, 2015. № 400. С. 190–197.

Гладкий Ю.Н. Территориальное укрупнение регионов России и экономический федерализм. Известия Русского географического общества, 2007. Т. 139. Вып. 5. С. 15–21.

Данилко Р.Г. Оценка современных вариантов административно-территориального деления Российской Федерации. Региональная экономика: теория и практика, 2014. № 21 (348). С. 29–37.

Джамиль Э.З. Праворегулирующий потенциал Постановления Конституционного суда Российской Федерации от 6 декабря 2018 г. 44-П. Вестник Костромского государственного университета, 2020. Т. 26. № 1. С. 212–216. DOI: 10.34216/1998-0817-2020-26-1-212-216.

Забелина М.В. Границы субъектов Российской Федерации: Понятие, статус, функции, правовое закрепление. Право и политика, 2013. № 1 (157). С. 18–26. DOI: 10.7256/1811-9018.2013.01.3.

Заяц Д.В. Начало новой административно-территориальной реформы? География, 2000. № 21. С. 1–2.

Евдокимов С.И. Административно-территориальные преобразования в России: оценка исторического опыта. Псковский регионологический журнал, 2010. № 10. С. 23–28.

Евлоев И.М. Постановление Конституционного Суда России о границах между субъектами Российской Федерации: разрешение спора или усугубление проблемы? Комментарий к

Постановлению от 6 декабря 2018 г. № 44-П. Сравнительное конституционное обозрение, 2019. № 1 (128). С. 92–106. DOI: 10.21128/1812-7126-2019-1-92-106.

Побединский Г.Г., Вьюшков М.В., Белых Ю.Р. О системе классификации и кодирования территорий в Российской Федерации. Геодезия и картография, 2020. Т. 81. № 5. С. 41–53. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-959-5-41-53.

Практика применения законодательства о местном самоуправлении в разъяснениях Комитета Государственной Думы по федеративному устройству и вопросам местного самоуправления. Ответы на вопросы по положениям Федерального закона от 6 октября 2003 г. № 131-ФЗ «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации». Принципы территориальной организации местного самоуправления. Территория муниципальных образований (ст. 10). Местное право, 2020. № 1. С. 83–104.

Родоман Б.Б. Перспективы эволюции федеральных округов. Российские регионы и центр: взаимодействие в экономическом пространстве. М.: Институт географии РАН, 2000. С. 36–41.

Романов М.Т. Проблемы экономического районирования и административно-территориального устройства России в новых условиях. Известия РАН. Серия географическая, 2006. Вып. 3. С. 57–66.

Туровский Р.Ф. Политическая регионалистика: учеб. пособие для вузов. М.: Издательский дом ВШЭ, 2006. 780 с.

Файбусович Э.Л., Мартынов В.Л. Тенденции и перспективы изменения административно-территориального деления России. Псковский регионологический журнал, 2006. № 2. С. 28–36.

Чертков А.Н. Границы субъектов Российской Федерации: установление, уточнение, изменение. Право и политика, 2019. № 11. С. 67–75. DOI: 10.7256/2454-0706.2019.11.31270.

Шугрина Е.С. Особенности изменения границ субъектов Российской Федерации в материалах правоприменительной практики. Конституционно-правовой статус Иркутской области в составе России: история, современное состояние, перспективы развития. Материалы Всероссийской научно-практической конференции, 2013. С. 97–115.

Шульгина О.В. Особенности, этапы и факторы формирования административно-территориального деления России. Проблемный анализ и государственно-управленческое проектирование, 2009. Т. 2. № 5. С. 38–48.

Шульгина О.В., Халатов В.Ю. География федеральных округов России. Профильная школа, 2008. № 1. С. 29–36.

Idrizi B., Meha M., Ismaili F., Nikolli P. Calculation of the National area of the republic of Kosova. Web resource: https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2012/papers/ts02m/TS02M_idrizi_meha_et_al_6050.pdf (дата обращения 10.07.2023).

REFERENCES

Belousov V.M. Administrative-territorial taxonomy of the Russian space and the scale effect. News of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Social Sciences, 2011. No. 2. P. 56–60 (in Russian).

Bozo N.V., Mikheeva G.V. An alternative version of administrative-territorial division in the Russian Federation. Ideas and Ideals, 2014. No. 2 (20). P. 70–79 (in Russian).

Bozo N.V., Mikheeva G.V. Influence of changes in the administrative-territorial division of the Russian Federation on social and economic indicators. Tomsk State University Journal, 2015. No. 400. P. 190–197 (in Russian).

Chertkov A.N. Borders of the subjects of the Russian Federation: establishment, clarification, change. Law and Politics, 2019. No. 11. P. 67–75 (in Russian). DOI: 10.7256/2454-0706.2019.11.31270.

Danilko R.G. Evaluation of modern variants of the administrative-territorial division of the Russian Federation. Regional Economics: Theory and Practice, 2014. No. 21 (348). P. 29–37 (in Russian).

Evdokimov S.I. Administrative-territorial transformations in Russia: Assessment of historical experience. Pskov Regionological Journal, 2010. No. 10. P. 23–28 (in Russian).

Evloev I.M. Resolution of the Constitutional Court of Russia on the borders between the subjects of the Russian Federation: dispute resolution or aggravation of the problem? Comment to Resolution No. 44-P of December 6, 2018. Comparative Constitutional Review, 2019. No. 1 (128). P. 92–106 (in Russian). DOI: 10.21128/1812-7126-2019-1-92-106.

Faibusovich E.L., Martynov V.L. Trends and prospects of changes in the administrative-territorial division of Russia. Pskov Regionological Journal, 2006. No. 2. P. 28–36 (in Russian).

Gladkiy Yu.N. Territorial consolidation of Russian regions and economic federalism. Izvestiya Russkogo Geograficheskogo Obshestva (News of Russian Geographical Society), 2007. V. 139. Iss. 5. P. 15–21 (in Russian).

Idrizi B., Meha M., Ismaili F., Nikolli P. Calculation of the National area of the republic of Kosova. Web resource: https://www.fig.net/resources/proceedings/figproceedings/fig2012/papers/ts02m/TS02M_idrizi_meha_et_al_6050.pdf (accessed 10.07.2023).

Jamil E.Z. Law-regulating potential of the Resolution of the Constitutional Court of the Russian Federation of December 6, 2018 44-P. Vestnik of Kostroma State University, 2020. V. 26. No. 1. P. 212–216 (in Russian). DOI: 10.34216/1998-0817-2020-26-1-212-216.

Pobedinsky G.G., Vyushkov M.V., Belykh Yu.R. About the system of classification and coding of territories in the Russian Federation. Geodesy and Cartography, 2020. V. 81. No. 5. P. 41–53 (in Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2020-959-5-41-53.

Rodoman B.B. Prospects for the evolution of federal districts. Russian Regions and the Center: Interaction in the Economic Space. Moscow: Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, 2000. P. 36–41 (in Russian).

Romanov M.T. Problems of economic zoning and administrative-territorial structure of Russia in new conditions. Izvestia RAN. Seriya Geograficheskaya (News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series), 2006. Iss. 3. P. 57–66 (in Russian).

Shugrina E.S. Features of changing the boundaries of the constituent entities of the Russian Federation in the materials of law enforcement practice. Constitutional and legal status of the Irkutsk Region as part of Russia: History, current state, development prospects. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, 2013. P. 97–115 (in Russian).

Shulgina O.V. Features, stages and factors of the formation of the administrative-territorial division of Russia. Problem Analysis and State-management Design, 2009. V. 2. No. 5. P. 38–48 (in Russian).

Shulgina O.V., Khalatov V.Yu. Geography of the Federal districts of Russia. Profile School, 2008. No. 1. P. 29–36 (in Russian).

The practice of applying legislation on local self-government in the explanations of the State Duma Committee on Federal Structure and Local Self-Government Issues. Answers to questions on the provisions of Federal Law No. 131-FZ of October 6, 2003 “On the General Principles of the Organization of Local Self-government in the Russian Federation”. Principles of territorial organization of local self-government. The territory of municipalities (Article 10). Local law, 2020. No. 1. P. 83–104 (in Russian).

Turovsky R.F. Political regionalism: studies. Handbook for universities. Moscow: Publishing House of the Higher School of Economics, 2006. 780 p. (in Russian).

Zabelina M.V. Borders of the subjects of the Russian Federation: Concept, status, functions, legal consolidation. Law and Politics, 2013. No. 1 (157) P. 18–26 (in Russian). DOI: 10.7256/1811-9018.2013.01.3.

Zayats D.V. The beginning of a new administrative-territorial reform? Geography, 2000. No. 21. P. 1–2 (in Russian).

УДК: 528.9:004.043 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-240-254**

А.С. Затолокин[1], **Ю.В. Петров**[2]

ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ ESG-ПОВЕСТКИ В СОСТАВЕ ГЕОПОРТАЛОВ

АННОТАЦИЯ

Сбалансированное социально-экономическое развитие территории, ее предприятий и общества в целом в значительной мере основано на нефинансовых критериях, заложенных в основе ESG-повестки. Охрана окружающей среды, социальные и управленческие векторы развития предпринимательского сообщества и территории сегодня представляются в составе геопорталов, при этом разные имеющиеся решения и их совокупности имеют разнообразный формат как на территории российских регионов, так и за рубежом. Цель исследования: разработать механизмы информационного геопортального обеспечения ESG-стратегирования для регионального развития. Задачи исследования: рассмотреть иностранный и отечественный опыт реализации геопорталов в рамках ESG стратегии; дать анализ состоянию государственных информационных ресурсов под цели ESG в модельном регионе; выделить приоритетные цели ESG-развития для модельного региона. Объектом исследования, на примере которого выполнено моделирование результатов, является территория Тюменской области (без автономных округов). Предметом исследования выступила организация экологического мониторинга в регионе под цели ESG-повестки. Методы исследования: пространственно-временное представление геоданных и сравнительный. По результатам сравнения геопортальных решений в РФ и за рубежом выполнена дифференцированная оценка функциональных решений геопорталов под принципы ESG-повестки. Отмечены достоинства реализации под рассматриваемую специализацию китайских геопорталов, ориентированных на интерактивное представление территории. На примере Тюменской области (без автономных округов) рассмотрены геопорталы, функционирующие для территориальных общностей людей на областном и федеральном уровнях, выполнено их сопоставление с отечественными и зарубежными аналогами. По итогам исследования предложены механизмы представления информации в составе геопорталов под задачи ESG: 1) интеграция существующих геоинформационных ресурсов в одном региональном окне отображения геопортала с возможностью регламентированного подключения; 2) отображение метаданных, позволяющих пользователю ориентироваться в параметрах информационной ценности данных; 3) отображение для каждой территориальной общественной системы региона его уникальных эколого-социально-управленческих характеристик, учитывающих синтез глобализации и локализации для конкретной территориальной общности людей (внедрение глокализации).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геопортал, ESG-повестка, территориальная общественная система, территориальная общность людей, глокализация

[1] Тюменский государственный университет, Институт наук о Земле, ул. Осипенко, д. 2, Тюмень, Россия, 625003, *e-mail:* **zatolokin2000@bk.ru**

[2] Тюменский государственный университет, Институт наук о Земле, ул. Осипенко, д. 2, Тюмень, Россия, 625003, *e-mail:* **y.v.petrov@utmn.ru**

Alexander S. Zatolokin[1], **Yuriy V. Petrov**[2]

PRINCIPLES OF IMPLEMENTATION OF THE ESG AGENDA AS PART OF GEOPORTALS

ABSTRACT

The balanced socio-economic development of the Territory, its enterprises and society as a whole is largely based on non-financial criteria laid down in the basis of the ESG agenda. Environmental protection, social and managerial vectors of the development of the business community and the territory today are represented as part of geoportals, while the very diversity of available solutions and their aggregates have a diverse format, both in the Russian regions and abroad. The purpose of the study: to develop mechanisms for information geoportal support of ESG-strategizing for regional development. Research objectives is to consider foreign and domestic experience in the implementation of geoportals within the ESG strategy; to analyze the state of state information resources for the purposes of ESG in the model region; and to identify priority ESG development goals for the model region. The object of the study, on the example of which the simulation of the results was performed, is the territory of the Tyumen region (without autonomous districts). The subject of the study was the organization of environmental monitoring in the region for the purposes of the ESG agenda. Research methods: spatial-temporal representation of geodata and comparative. According to the results of comparison of geoportal solutions in the Russian Federation and abroad, a differentiated assessment of functional solutions of geoportals under the principles of the ESG agenda was performed. The advantages of implementing Chinese geoportals focused on interactive representation of the territory for the considered specialization are noted. Using the example of the Tyumen Region (without autonomous districts), geoportals functioning for territorial communities of people at the regional and federal levels are considered, their comparison with domestic and foreign analogues is carried out. Based on the results of the study, mechanisms for presenting information as part of geoportals for ESG tasks are proposed: 1) integration of existing geoinformation resources in one regional geoportal display window with the possibility of regulated connection; 2) displaying meta-information in the data that allows the user to navigate the parameters of the information value of the data; 3) displaying for each territorial social system of the region its unique ecological, social and managerial characteristics, taking into account the synthesis of globalization and localization for a specific territorial community of people (introduction of glocalization).

KEYWORDS: geoportal, ESG-agenda, territorial public system, territorial community of people, glocalization

ВВЕДЕНИЕ

Перемещение капитала в современном мире подчиняется влиянию многочисленных разнородных факторов, одним из значимых в ряду которых является реализация ESG-принципов на территории. Управление охраной окружающей среды, социальными и корпоративными характеристиками конкретной территории в определенное время, обеспечивающее гармоничное пространственное развитие, раскрывает основное предназначение данной повестки [*Eliwa* et al., 2021; *Shaikh*, 2021; *Khan*, 2022]. Для страхования

[1] Tyumen State University, Institute of Earth Sciences, 2, Osipenko str., Tyumen, 625003, Russia, *e-mail:* **zatolokin2000@bk.ru**

[2] Tyumen State University, Institute of Earth Sciences, 2, Osipenko str., Tyumen, 625003, Russia, *e-mail:* **y.v.petrov@utmn.ru**

инвестиционных рисков предпринимательское сообщество ориентируется на открытые в информационном отношении территориальные общественные системы, гарантирующие приверженность своим долгосрочным программным целям. Значащим фактором в принятии управленческих инвестиционных решений является время, поэтому уже на начальном этапе обсуждения идеи необходима оперативность информационного (а точнее — геоинформационного) обеспечения легитимными, корректными, актуальными, полными, соотносимыми данными. И речь в данном случае идет не только, наверное, и не столько об инвестиционном потенциале (в этом направлении инвестор будет ориентироваться на сложившиеся отраслевые механизмы), сколько об основных инвестиционных рисках в ESG-направлениях. Инструментарием, позволяющим существенно повысить скорость информационного первичного выбора инвестора определенной территориальной общественной системы [*Столбов*, *Шарыгин*, 2016], выступает функционирование геопорталов [*Mhangara* et al., 2019; *Echlouchi* et al., 2020; *Jiang* et al., 2020; *Ogryzek* et al., 2020].

Объектом исследования, на примере которого выполнено моделирование результатов, является территория Тюменской области (без автономных округов). Предметом исследования выступила организация экологического мониторинга в регионе под цели ESG-повестки. Цель исследования: разработать механизмы информационного геопортального обеспечения ESG-стратегирования для регионального развития.

Задачи исследования:

1. Рассмотреть зарубежный и отечественный опыт реализации геопорталов в рамках ESG стратегии;
2. Дать анализ состоянию государственных информационных ресурсов под цели ESG в модельном регионе;
3. Выделить приоритетные цели ESG-развития для модельного региона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовали следующие категории материалов:

- нормативная правовая база РФ и отдельных международных институтов;
- официальные сайты органов государственной власти стран и регионов;
- статистические и публикационные данные.

При исследовании применялись следующие методы: пространственно-временного представления геоданных и сравнительный.

Методология исследования построена на определении территориальной общественной системы низового уровня в границах региона, что позволяет выделить базовые приоритеты для ESG-повестки для определенной локации. Концептуальные границы территориальных общественных систем формируются на основе выделения локаций определенных территориальных общностей людей, для которых присуще свое сформировавшееся отношение к организации природопользования [*Михайлов*, *Рунге,* 2019; *Адаев*, 2021].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зарубежный и отечественный опыт в области геопортальных решений под ESG-повестку

Современная всеобъемлющая цифровизация государственного, частного и корпоративного секторов территориальных общественных систем уже сегодня привела к формированию новых объективных явлений, включая интернет вещей, кастомизацию и искусственный интеллект. Всеобщая цифровизация обеспечивает экономический рост в тех отраслях, где она применяется за счет снижения операционных затрат на сбор, обработку, систематизацию информации, а также за счет расширения рынка сбыта соответствующих

товаров и услуг; границы этих рынков уже ограничиваются только в юридической плоскости [*Жуков*, *Раттур,* 2022; *Шелепов*, 2022; *Razumovskiy*, *Moseykin*, 2022]. Геопортал в этом процессе выступает наконечником, на котором замыкается результат государственной цифровизации, в отдельных случаях внедряются элементы кастомизации госуслуг под определенные слои населения (анонсированная государством проактивная социальная политика), а в современных геополитических реалиях оформляется глокализация [*Попов*, 2017; *Романова*, 2018; *Сорокин*, *Попова*, 2022]. Сами экологические, социальные, экономические, технологические условия различаются на планете для разных сообществ, поэтому уровень реализации геопортальных решений резко дифференцирован.

Зарубежный опыт

Рассмотрены примеры двух ведущих товаропроизводителей и потребителей — Европейского Союза и КНР. Именно в данных центрах мировой торговли наиболее востребованы механизмы ESG, в т. ч. благодаря наличию гигантского товарооборота между ними и высоким уровнем конкурентной борьбы. Данное сопоставление также корректно в условиях отмечаемой глокализации, которая активно стала внедряться и в Евросоюзе, и в Китае [*Mills*, 2009; *Bieda*, *Cienciala*, 2021].

Так, в Евросоюзе используют геопортал INSPIRE[1], в котором можно по определенному компоненту, например, по загрязнению воды рассмотреть отчет той или иной страны за определенный год. Однако эта информация предоставляется не всеми и возникают определенные лакуны при построении прогноза. Проблема в функционировании ресурса заключается в том, что интеграция в единую систему происходит достаточно медленно, т. к. у стран есть собственные государственные геопорталы (например, у Германии[2], Швейцарии[3], Финляндии[4]). При этом их содержание очень разнообразно, и есть те, которые сильно продвинулись в рамках ESG-стратегии, с предоставлением актуальной и географически насыщенной информации.

В Китае за последние годы в части экологической повестки отмечаем высокий прогресс. В стране создан геопортал с данными по социально-экономическим аспектам, но при этом также существует и отдельный портал по экологическому мониторингу, который отражает сегодняшнее положение дел в области охраны окружающей среды в провинциях страны. Это соответствует основным критериям в области соблюдения ESG[5,6,7], которые предъявляют финансовые учреждения к территориям и предприятиям. С учетом того, что в КНР государственное управление ориентировано на исполнение центральных директив, то, соответственно, государственные информационные системы гарантируют соответствие действительности представленных данных. К этому следует добавить и усиление

---

1 INSPIRE Geoportal. Электронный ресурс: https://inspire-geoportal.ec.europa.eu (дата обращения 05.02.23).

2 Geoportal.de. Электронный ресурс: https://www.geoportal.de/Themen/Klima_und_Wetter/1_Hochwasser_und_ Starkregen.html (дата обращения 05.02.23).

3 The federal geoportal Switzerland. Электронный ресурс: https://www.geo.admin.ch/en/home.html (дата обращения 05.02.23).

4 MapSite Finland. Электронный ресурс: https://www.maanmittauslaitos.fi/en/e-services/mapsite (дата обращения 05.02.23).

5 MINISTRY OF ECOLOGY AND ENVIRONMENT THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. Электронный ресурс: https://english.mee.gov.cn (дата обращения 05.02.23).

6 China National Environmental Monitoring Centre. Электронный ресурс: http://www.cnemc.cn (дата обращения 05.02.23).

7 National Platform for Common Geospatial Information Service. Электронный ресурс: https://www.tianditu.gov.cn (дата обращения 05.02.23).

экологического вектора в КНР, что стало следствием повышения благосостояния граждан и техногенного пресса на окружающую среду.

Результаты сравнительного анализа государственных геоинформационных систем, отражающих эколого-социально-управленческие аспекты территориального развития и представленные в общедоступном формате, отражены в таблице 1. Эти значения отражают итоги тестирования функциональных возможностей геопорталов, проведенные магистрантами Тюменского госуниверситета в рамках программы курса «Эколого-правовые основы и геоэкологические принципы организации природопользования» [*Синдирева*, *Петров*, 2021].

Табл. 1. Соотношение ведущих геопортальных решений под задачи ESG-повестки
Table 1. The ratio of the leading geoportal solutions for the tasks of the ESG agenda

Страна	Преимущества	Недостатки
Германия	1. Гласность — большое количество тематических слоев 2. Дата добавления или обновления информации 3. Указаны пункты стационарных наблюдений с их актуальной информацией при наведении 4. Возможность накладывать слои	1. Для добавления слоя нужно выходить назад в каталог и добавлять
Швейцария	1. Гласность — большое количество тематических слоев 2. Дата добавления или обновления информации 3. Слои с наблюдениями и прогнозами на 10–100 лет 4. Возможность накладывать слои	1. Нет передачи информации в режиме реального времени
Финляндия	1. Гласность — большое количество тематических слоев 2. Дата добавления или обновления информации 3. Возможность накладывать слои	1. Нет передачи информации в режиме реального времени
Китай	1. Дата добавления или обновления информации 2. Указаны пункты стационарных наблюдений с их актуальной информацией при наведении	1. Информация по экологическому мониторингу находится на отдельном сайте от основного геопортала, из-за чего невозможно накладывать слои

Отечественный опыт

Отечественный опыт разработки геопорталов под цели ESG богат инициативными разработками, как на федеральном, так и на региональном уровне [*Алексеенко* и др., 2019; *Ямашкин* и др., 2019; *Bychkov* et al., 2019; *Beshentsev* et al., 2019; *Rakova* et al., 2021]. При этом следует отметить, что и отдельные муниципалитеты, корпорации, некоммерческие организации также иногда участвуют в данном процессе [*Кошкарев*, 2017; *Yakubailik* et al.,

2018]. Вместе с тем непосредственного позиционирования геопортальных решений с повесткой ESG нет в формате документальной нормативной правовой верификации, что не позволяет их практически использовать при взаимодействии с заинтересованными акторами и стейк-холдерами в мировом сообществе. Технологические решения существенно опережают юридическое сопровождение, которое, в силу высокой неопределенности, требует существенной проработки — прежде всего на уровне подзаконных нормативных правовых актов: положений, регламентов, руководств и т. п. Соответственно, в регионах, отличающихся более высоким спросом на эколого-социально-управленческие характеристики, соответствующая практика предложений, внедрения и использования геопортальных решений выше.

В качестве примеров практики приведем решения столичного региона. Портал Мосэкомониторинга, на котором в режиме реального времени отражена характеристика окружающей среды в Москве, выполненная на основе обработки результатов конкретных приведенных замеров с указанием соответствующих временных отметок. Данная государственная информационная система имеет значительную историю накопления материалов и корректировок программного обеспечения. Последнее изменение геопортала датировано 2018 г. Отличительной характеристикой, востребованной потребителями, является открытый доступ к этим данным[1,2,3,4]. В соседней Московской области ситуация уже отличается. На региональном геопортале отсутствуют вкладки с актуальными характеристиками экологического состояния[5].

В целом, по данным сайта GISGeo[6], в половине субъектов РФ отсутствуют геопорталы. В некоторых регионах они еще на стадии перехода к активному промышленному использованию. При этом можно отметить регионы, для территориальной общности людей которых принципиально остры экологические аспекты жизнедеятельности. В них сегодня возникло понимание в необходимости создания геоинформационного позиционирования своих характеристик, например, в Свердловской области, отразившей в публичной сфере в сентябре 2022 г. запуск тестовой эксплуатации своего геопортала[7].

Однако следует иметь в виду, что в российской терминологии под «геопорталом» понимают два разных сервиса: в контексте инфраструктур пространственных данных это инструмент поиска пространственных данных и геосервисов по метаданным (это единственная абсолютно необходимая функция «истинного» геопортала) и средство веб-картографирования с функциями поиска и визуализации объектов интерактивной веб-карты или ее слоев. С этой точки зрения подавляющее число геопорталов, упоминаемых в статье или на портале GISGeo, являются чисто визуализационно-картографическими. Таков и геопортал Тюменской области, обсуждаемый в статье. Увы, с полисемией термина «геопортал» бороться бессмысленно, но различать два значения этого термина необходимо.

---

1 Мосэкомониторинг. Электронный ресурс: https://mosecom.mos.ru (дата обращения 05.02.23).

2 «Геопортал Подмосковья»: как работает сервис и для чего он нужен. Электронный ресурс: https://mosreg.ru/sobytiya/obzory/geoportal-podmoskovya-kak-rabotaet-servis-i-dlya-chego-on-nuzhen (дата обращения 05.02.23).

3 Власти Москвы запустили новую версию сайта «Мосэкомониторинга». Электронный ресурс: https://www.rbc.ru/rbcfreenews/5aa5aaac9a79475271aae2a7 (дата обращения 05.02.23).

4 Станция экомониторинга, меняющая цвет при загрязнении, появилась в Москве. Электронный ресурс: https://ria.ru/20210120/ekomonitoring-1594476355.html (дата обращения 05.02.23)

5 Геопортал Подмосковья. Электронный ресурс: https://rgis.mosreg.ru/v3/#/map?bbox=36.48903, 55.74989, 37.20201,55.92856&layers=381,342 (дата обращения 05.02.23).

6 Федеральные геопорталы. Электронный ресурс: https://gisgeo.org/geoportaly/federalnye/ (дата обращения 05.02.23).

7 Геопортал Свердловской области введен в тестовую эксплуатацию. Электронный ресурс: https://midural.ru/news/list/document203101/ (дата обращения 05.02.23).

Состояние государственных информационных ресурсов под цели ESG в Тюменской области

Государственные Геопорталы, охватывающие территорию Тюменской области, систематизированы и оценены (табл. 2). Наиболее существенным вопросом из повестки эколого-социально-управленческих решений для большинства региональных территориальных общественных систем выступает обращение с отходами производства и потребления. Именно отходы в последнее время волнуют достаточное количество населения, учитывая, что с 2021 г. продлен на 3 года срок работы устаревших полигонов, что вызывает соответствующее беспокойство со стороны прилегающих территориальных общностей людей. Вследствие этого наблюдается понижение Тюменской области в рейтинге регионов, т. к. данный формальный подход противоречит повестке ESG и вызывает соответствующее отторжение у респондентов.

Табл. 2. Оценка геопортальных решений Тюменской области под задачи ESG-повестки
Table 2. Evaluation of geoportal solutions of the Tyumen region for the tasks of the ESG agenda

Геопортал	Нормативная правовая база	Преимущества	Недостатки
Геопортал Тюменской области[1]	Распоряжение Департамента информатизации Тюменской области от 4 сентября 2020 г. N 22-р «Об утверждении Положения о геоинформационной системе Тюменской области»	1. Обеспечение достоверности информации 2. Доступность и легкость в обращении 3. Актуальность	1. Нет информации о том когда были последние обновления слоев 2. Нет информации экологического мониторинга 3. Нет возможности накладывать слои разных картографических сервисов
Публичная кадастровая карта России[2]	Федеральный закон от 13 июля 2015 г. N 218-ФЗ «О государственной регистрации недвижимости», ст. 12	1. Доступность	1. Наложения информации 2. Нет интеграции с местными геопорталами

Следует отметить, что на базе геопортала отсутствуют актуальные данные со стационарных постов наблюдения за состоянием атмосферного воздуха, из-за чего невозможно получить данные в режиме реального времени, а также в свободном доступе составить свой прогноз, что свидетельствует об ограниченной гласности для эффективного внедрения ESG-стратегии в регион.

Графическим представлением недостатков публичной кадастровой карты является наложение границ, которые для региона представлены даже на уровне регионального представления, когда между границами Тюменской и Омской областей образуются лакуны (рис. 1), которые не идентифицируются ни с одним из регионов. Данное обстоятельство ограничивает инвестиционную привлекательность территории, т. к. существенно повышает инвестиционные риски при наложении разных видов землепользования.

[1] Геопортал Тюменской области. Электронный ресурс: https://gis.72to.ru/ (дата обращения 05.02.23).

[2] Публичная кадастровая карта. Электронный ресурс: https://pkk.rosreestr.ru (дата обращения 05.02.23).

Графическое представление примера несоответствия местоположений объектов на Геопортале Тюменской области представлены на рисунке 2. Когда подключены несколько слоев, то отображается только один — «Границы земель лесного фонда», который перекрывает другие слои, что присуще и другим тематическим направлениям. Представленный фрагмент лесоустройства Абатского сельского урочища Абатского районного лесничества отражает сразу 2 примера юридических несоответствий, которые непосредственно отражают дисбаланс по эколого-социально-управленческим характеристикам: 1) границы квартальной сети и контуров выделов не соответствуют границам Тюменской области — на примере видны ареалы кварталов и отдельные выделы, которые отображаются за границами Тюменской области; 2) границы лесоустройства не учитывают «анклавы» и «эксклавы», в результате чего у выделенного на примере квартала возникает область юридической неопределенности лесных параметров для территории (севернее «анклава» Омской области в Абатском районе Тюменской области).

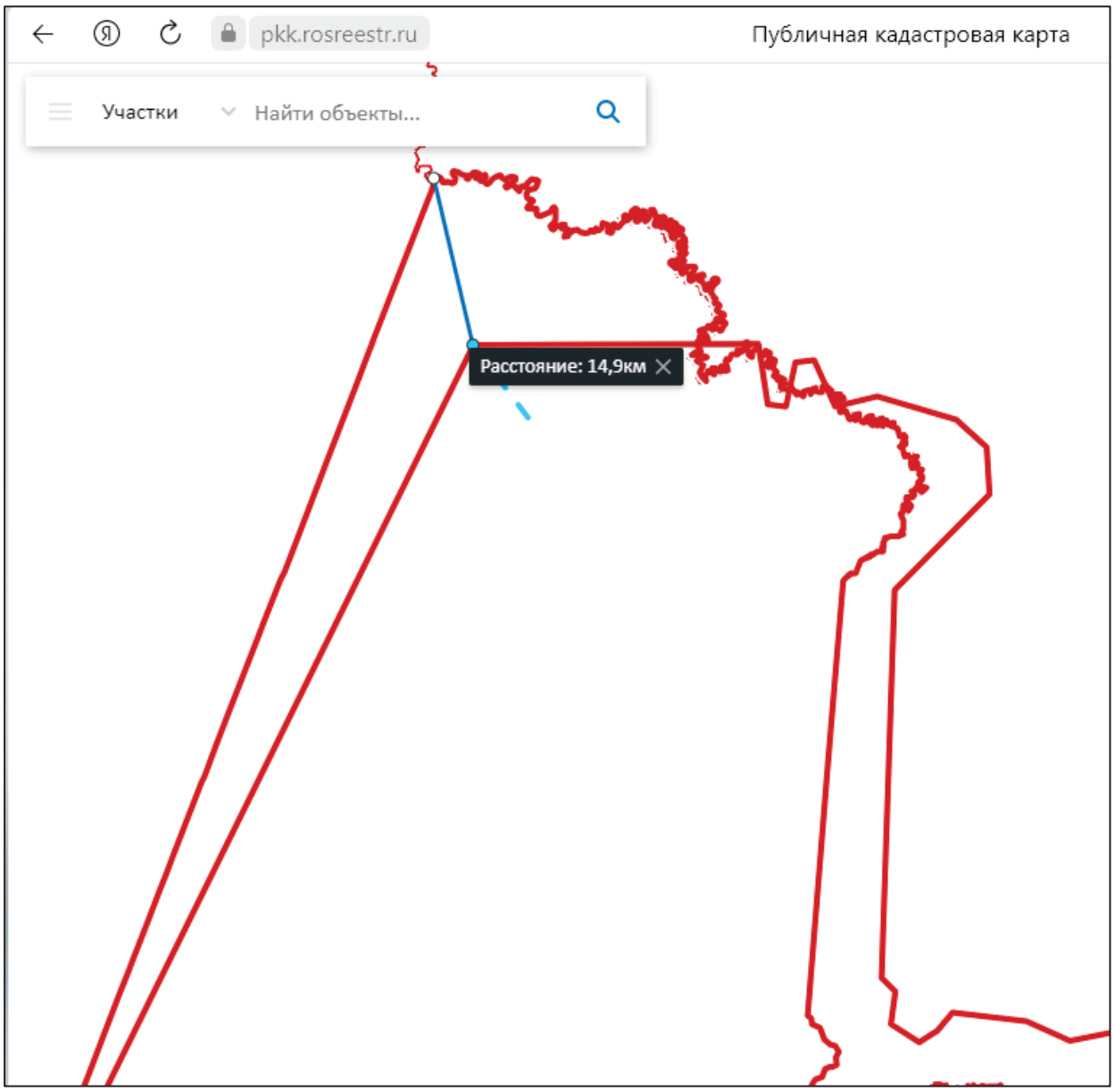


Рис. 1. Наложения региональных границ на публичной кадастровой карте
Fig. 1. Overlaying regional borders on a public cadastral map

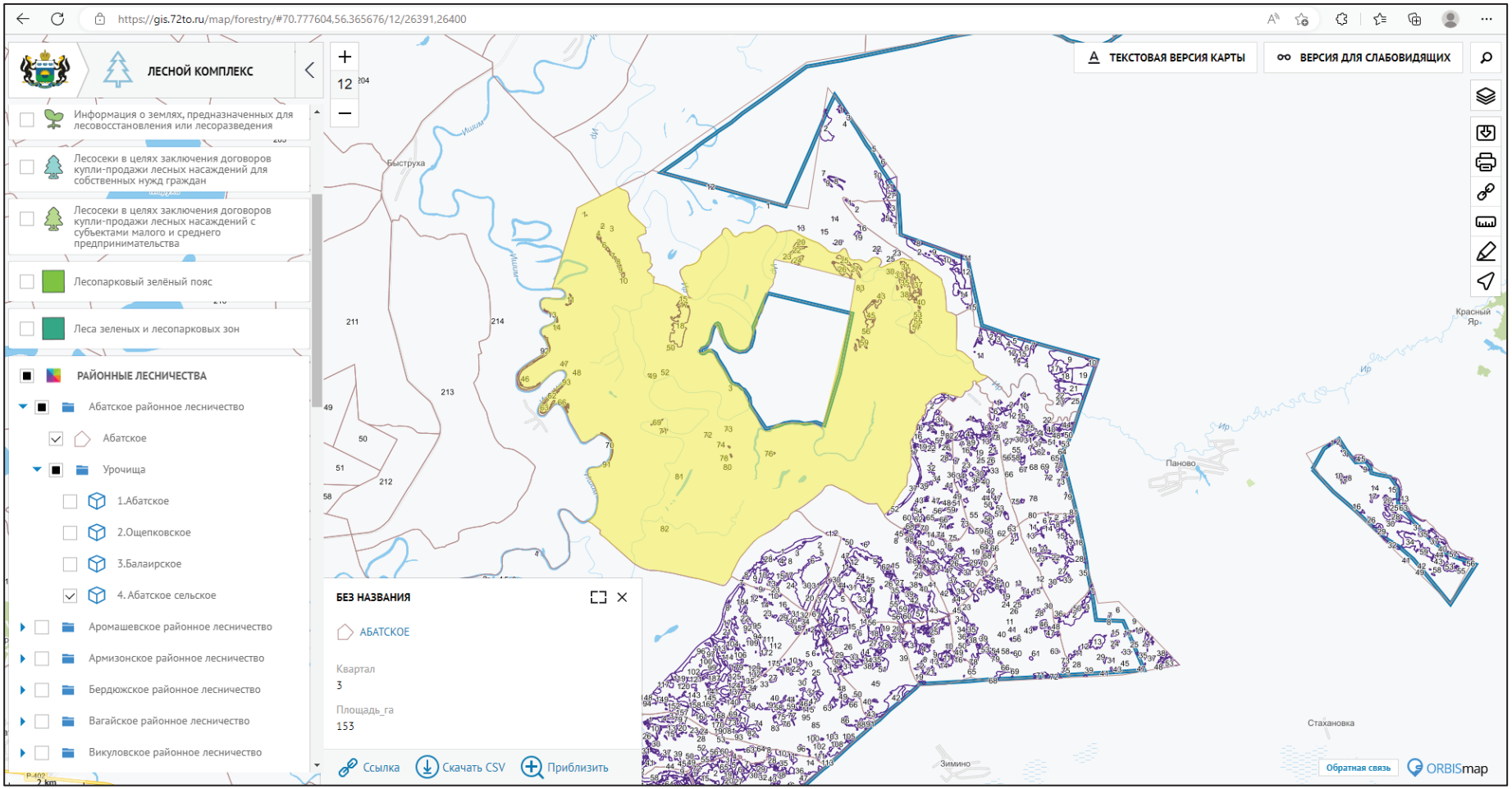


Рис. 2. Наложение слоев на геопортале Тюменской области
Fig. 2. Overlay layers on the geoportal of the Tyumen region

Приоритетные цели ESG-развития для Тюменской области

В связи с полученными нами сведениями выдвигается ряд следующих мер по улучшению геопортала Тюменской области:

1. Реализация возможности открытия всех векторных слоев в одном окне представления, а не отдельных слоев для отдельных карт;

2. Создание в рамках геопортала новых слоев по экологическому мониторингу, в которых будут указаны точные места стационарных постов, а также актуальные данные с указанием, когда данные были обновлены в последний раз;

3. Верификация проблем с наложением и перекрытием границ и слоев;

4. Указание метаданных на геопортале — за какой период приведены данные с возможностью переключения по определенным годам и месяцам.

Пример реализации представления на геопортале приоритетов конкретной территориальной общественной системе представлен на рис. 3. Определенная общность людей (жители сельского поселения, стойбища КМНС, населенных пунктов на межселенной территории и т. д.) получают доступ к локализованной (глокализованной) информации в картографическом разрезе [*Багина*, 2021]. Так, на представленном примере отображена территория планируемой организации особо охраняемой природной территории, а также пространственное представление объектов размещения отходов производства и потребления в конкретном муниципалитете.

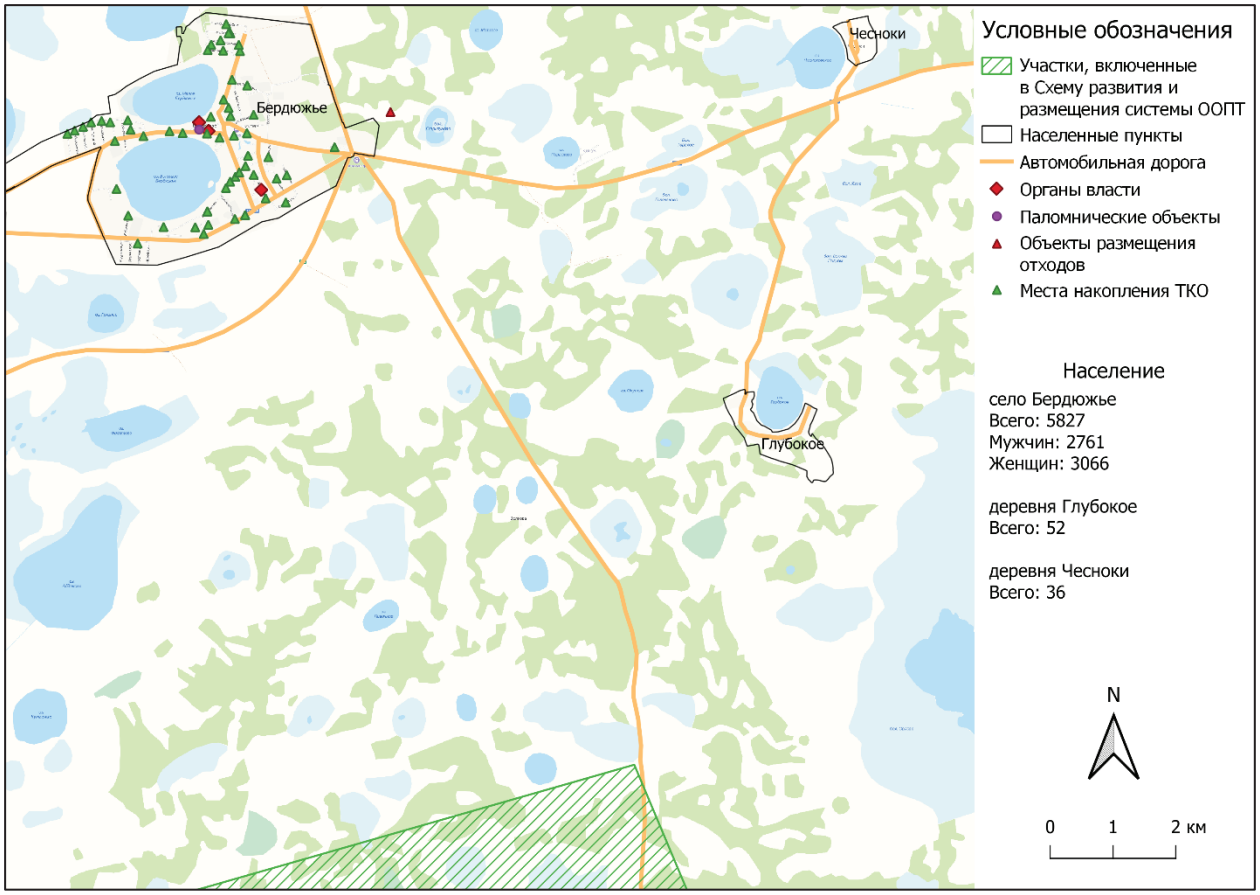


Рис. 3. Пример представления локальной территориальной общественной системы на геопортале под цели ESG-повестки

Fig. 3. An example of the representation of a local territorial public system on a geoportal for the purposes of the ESG agenda

В контексте приведенного примера отражены экологические параметры территории, которые актуальны для жизнедеятельности в настоящее время данной территориальной общности, социальные параметры, отражающие идентификацию каждого относительно своей принадлежности (национальной, конфессиональной, гендерной, трудовой и т. п.), включая соответствующее соблюдение сохранности объектов культурного наследия. Отражается также система организации управления, которая в формате геопортала может быть успешно реализована через инструмент подачи заявлений, обращений и жалоб на организацию государственного и муниципального управления. Обратная связь по линии «заявитель-оператор-заявитель» позволяет внедрять в цифровом пространстве уже элементы глубокой кастомизации.

ВЫВОДЫ

Развитие геопорталов, отражающих параметры ESG-повестки, в мире и РФ происходит крайне неравномерно, сфокусировано вокруг основных баз потребителей. Ведущие мировые центры, представленные в общедоступном формате, находятся в Европейском Союзе и КНР, ведущие отечественные — в столице. В Тюменской области развитие геопортальных технологий представлено на государственном уровне, но требуются соответствующие управленческие решения, направленные на возможность непосредственного использования результатов поиска в ESG-менеджменте.

По итогам исследования предлагаются следующие механизмы представления информации в составе геопорталов под задачи ESG: 1) интеграция существующих геоинформационных ресурсов в одном региональном окне отображения геопортала с возможностью регламентированного подключения; 2) отображение метаданных, позволяющих пользователю ориентироваться в параметрах информационной ценности данных; 3) отображение для каждой территориальной общественной системы региона его уникальных эколого-социально-управленческих характеристик, учитывающих синтез глобализации и локализации для конкретной территориальной общности людей (внедрение глокализации).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Адаев В.Н.* Юганские ханты на Демьянке: формирование локальной идентичности. Вестник археологии, антропологии и этнографии, 2021. № 3(54). С. 176–186. DOI: 10.20874/2071-0437-2021-54-3-14.
2. *Алексеенко Н.А., Кошкарев А.В., Курамагомедов Б.М., Медведев А.А.* Геопорталы российских особо охраняемых природных территорий. Геодезия и картография, 2019. № 5. С. 34–46. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-947-5-34-46.
3. *Багина Е.* О глокализации естественной и искусственной. Проект Байкал, 2021. Т. 18. № 69. С. 24–31. DOI 10.51461/projectbaikal.69.1841.
4. *Жуков В.И., Раттур М.В.* Некоторые вопросы трансформации права в эпоху цифровизации: действующие нормы, отклонения и вектор развития. Государство и право, 2022. № 10. С. 129–140. DOI: 10.31857/S102694520022605-6.
5. *Кошкарев А.В.* Образовательные геопорталы: данные и сервисы. Геодезия и картография, 2017. Спецвыпуск. С. 33–40. DOI: 10.22389/0016-7126-2017-33-40.
6. *Михайлов В., Рунге Й.* Идентификация человека. Территориальные общности и социальное пространство: опыт концептуализации. Социологические исследования, 2019. № 1. С. 52–62. DOI: 10.31857/S013216250003747-4.

7. *Попов М.Е.* Политика социокультурной интеграции: основные теоретические подходы. Полис. Политические исследования, 2017. № 1. С. 99–115. DOI: 10.17976/jpps/2017.01.09.

8. *Романова О.А.* Приоритеты промышленной политики России в контексте вызовов четвертой промышленной революции. Часть 2. Экономика региона, 2018. Т. 14. № 3. С. 806–819. DOI: 10.17059/2018-3-9.

9. *Синдирева А.В., Петров Ю.В.* Эколого-правовые основы и геоэкологические принципы организации природопользования. Омск: КАН, 2021. 116 с.

10. *Сорокин П.С., Попова Т.А.* Качество человеческого капитала — ответ на вызовы социальной политики в условиях деструктурации. Журнал исследований социальной политики, 2022. Т. 20. № 1. С 157–168. DOI: 10.17323/727-0634-2022-20-1-157-168.

11. *Столбов В.А., Шарыгин М.Д.* Региональный потенциал и региональный капитал: «возможное» – «реальное» – «необходимое». Экономика региона, 2016. Т. 12. № 4. С. 1014–1027. DOI: 10.17059/2016-4-4.

12. *Шелепов А.В.* Влияние политики лидеров цифровизации — членов «Группы двадцати» на механизмы международного регулирования и условия развития цифровой экономики. Вестник международных организаций, 2022. Т. 17. № 1. С. 96–113. DOI: 10.17323/1996-7845-2022-01-04.

13. *Ямашкин С.А., Ямашкин А.А., Зарубин О.А.* Проблемы проектирования геопортальных интерфейсов. Геодезия и картография, 2019. № 2. С. 46–56. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-944-2-46-56.

14. *Beshentsev A.N., Ayurzhanaev A.A., Lubsanov A.A.* Problems and prospects of interstate geoinformation interaction in the zone of the Silk Road. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2019. V. 25. Part 1. P. 114–121. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-114-121.

15. *Bieda A., Cienciała A.* Towards a Renewable Energy Source Cadastre — A Review of Examples from around the World. Energies, 2021. V. 14. P. 8095. DOI: 10.3390/en14238095.

16. *Bychkov I.V., Fedorov R.K., Avramenko Y.V., Shumilov A.S., Shigarov A.O., Ruzhnikov G.M., Verhozina A.V., Emelyanova N.V., Sorokovoi A.A.* Technology of Information and Analytical Support for Interdisciplinary Environmental Studies in the Baikal Region. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, 2019. P. 116–124. DOI: 10.1007/978-3-030-11720-7_16.

17. *Echlouchi K., Ouardouz M., Bernoussi A.S., Boulaassal H.* Smart Geoportal for Efficient Governance: A Case Study Municipality of M'diq. Lecture Notes in Networks and Systems, 2020. V. 92. P. 237–245. DOI: 10.1007/978-3-030-33103-0_24.

18. *Eliwa Y., Aboud A., Saleh A.*ESG practices and the cost of debt: Evidence from EU countries. Critical Perspectives on Accounting, 2021. V. 79. P. 102097. DOI: 10.1016/j.cpa.2019.102097.

19. *Jiang H., van Genderen J., Mazzetti P., Koo H., Chen M.* Current status and future directions of geoportals. International Journal of Digital Earth, 2020. V. 13. No. 10. P. 1093–1114. DOI: 10.1080/17538947.2019.1603331.

20. *Khan M.A.* ESG disclosure and Firm performance: A bibliometric and meta-analysis. Research in International Business and Finance, 2022. V. 61. P. 101668. DOI: 10.1016/j.ribaf.2022.101668.

21. *Mhangara P., Lamba A., Mapurisa W., Mudau N.* Towards the Development of Agenda 2063 Geo-Portal to Support Sustainable Development in Africa. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019. V. 8. No. 9. P. 399. DOI: 10.3390/ijgi8090399.
22. *Mills J.W.* Spatial decision support in a post-disaster environment: A community-focused approach. Cartographica, 2009. V. 44. No. 1. P. 17–31. DOI: 10.3138/carto.44.1.17.
23. *Ogryzek M., Tarantino E., Rząsa K.* Infrastructure of the Spatial Information in the European Community (INSPIRE) Based on Examples of Italy and Poland. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020. V. 9. No. 12. P. 755. DOI: 10.3390/ijgi9120755.
24. *Rakova V., Bolsunovskaya M., Zorin A., Fedorov V., Novikova Y.* Digitalisation for Improving Population Well-Being in the Arctic Area. Communications in Computer and Information Science. 2021. V. 1445. P. 105–117. DOI: 10.1007/978-3-030-84845-3_7.
25. *Razumovskiy D.V., Moseykin Yu.N.* Digitalizacion en America Latina y oportunidades para empresas rusas. Iberoamerica, 2022. No. 1. P. 5–37. DOI: 10.37656/s20768400-2022-1-01.
26. *Shaikh I.* Environmental, social, and governance (ESG) practice and firm performance: An international evidence. Journal of Business Economics and Management, 2022. V. 23. No. 1. P. 218–237. DOI: 10.3846/jbem.2022.16202.
27. *Yakubailik O.E., Kadochnikov A.A., Tokarev A.V.* WEB Geographic Information System and the Hardware and Software Ensuring Rapid Assessment of Air Pollution. Optoelectronics, Instrumentation and data Processing, 2018. V. 54. No. 3. P. 243–249. DOI: 10.3103/S8756699018030056.

REFERENCES

1. *Adaev V.N.* The Khanty of the Yugan River in the Demyanka River basin: formation of local identity. Vestnik arheologii, antropologii i etnografii, 2021. No. 3 (54). P. 176–186 (in Russian). DOI: 10.20874/2071-0437-2021-54-3-14.
2. *Alekseenko N.A., Koshkarev A.V., Kuramagomedov B.M., Medvedev A.A.* Geoportals of Russian nature's protected areas**.** Geodesy and Carthography, 2019. No. 5. P. 34–46 (in Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2019-947-5-34-46.
3. *Bagina E.* On natural and artificial glocalization. Project Baikal, 2021. V. 18. No. 69. P. 24–31 (in Russian). DOI 10.51461/projectbaikal.69.1841.
4. *Beshentsev A.N., Ayurzhanaev A.A., Lubsanov A.A.* Problems and prospects of interstate geoinformation interaction in the zone of the Silk Road. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2019. V. 25. Part 1. P. 114–121. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-114-121.
5. *Bieda A., Cienciała A.* Towards a Renewable Energy Source Cadastre – A Review of Examples from around the World. Energies, 2021. V. 14. P. 8095. DOI: 10.3390/en14238095.
6. *Bychkov I.V., Fedorov R.K., Avramenko Y.V., Shumilov A.S., Shigarov A.O., Ruzhnikov G.M., Verhozina A.V., Emelyanova N.V., Sorokovoi A.A.* Technology of Information and Analytical Support for Interdisciplinary Environmental Studies in the Baikal Region. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, 2019. P. 116–124. DOI: 10.1007/978-3-030-11720-7_16.
7. *Echlouchi K., Ouardouz M., Bernoussi A.S., Boulaassal H.* Smart Geoportal for Efficient Governance: A Case Study Municipality of M'diq. Lecture Notes in Networks and Systems, 2020. V. 92. P. 237–245. DOI: 10.1007/978-3-030-33103-0_24.

8. *Eliwa Y., Aboud A., Saleh A.* ESG practices and the cost of debt: Evidence from EU countries. Critical Perspectives on Accounting, 2021. V. 79. P. 102097. DOI: 10.1016/j.cpa.2019.102097.
9. *Jiang H., van Genderen J., Mazzetti P., Koo H., Chen M.* Current status and future directions of geoportals. International Journal of Digital Earth, 2020. V. 13. No. 10. P. 1093–1114. DOI: 10.1080/17538947.2019.1603331.
10. *Khan M.A.* ESG disclosure and Firm performance: A bibliometric and meta-analysis. Research in International Business and Finance, 2022. V. 61. P. 101668. DOI: 10.1016/j.ribaf.2022.101668.
11. *Koshkarev A.V.* Educational geoportals: data and services. Geodesy and Cartography, 2017. Special Iss. P. 33–40 (in Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2017-33-40.
12. *Mhangara P., Lamba A., Mapurisa W., Mudau N.* Towards the Development of Agenda 2063 Geo-Portal to Support Sustainable Development in Africa. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2019. V. 8. No. 9. P. 399. DOI: 10.3390/ijgi8090399.
13. *Mikhailov V., Runge J.* Identification of Individual. Territorial Communities and Social Space: An Attempt of Conceptualization. Sociological Research, 2019. No. 1. P. 52–62 (in Russian). DOI: 10.31857/S013216250003747-4.
14. *Mills J.W.* Spatial decision support in a post-disaster environment: A community-focused approach. Cartographica, 2009. V. 44. No 1. P. 17–31. DOI: 10.3138/carto.44.1.17.
15. *Ogryzek M., Tarantino E., Rząsa K.* Infrastructure of the Spatial Information in the European Community (INSPIRE) Based on Examples of Italy and Poland. ISPRS International Journal of Geo-Informationб 2020. V. 9. No. 12. P. 755. DOI: 10.3390/ijgi9120755.
16. *Popov M.E.* Sociocultural integration policy: Major theoretical perspectives. Polis. Political Studies, 2017. No. 1. P. 99–115 (in Russian). DOI: 10.17976/jpps/2017.01.09.
17. *Rakova V., Bolsunovskaya M., Zorin A., Fedorov V., Novikova Y.* Digitalisation for Improving Population Well-Being in the Arctic Area. Communications in Computer and Information Science, 2021. V. 1445. P. 105–117. DOI: 10.1007/978-3-030-84845-3_7.
18. *Razumovskiy D.V., Moseykin Yu.N.* Digitalization in Latin America and opportunities for Russian companies. Iberoamerica, 2022. No. 1. P. 5–37 (in Spanish) DOI: 10.37656/s20768400-2022-1-01.
19. *Romanova O.A.* Industrial policy priorities of Russia in the Context of challenges of the fourth industrial revolution. Part 2. Economy of Regions, 2018. V. 14. No. 3. P. 806–819 (in Russian). DOI: 10.17059/2018-3-9.
20. *Shaikh I.* Environmental, social, and governance (ESG) practice and firm performance: An international evidence. Journal of Business Economics and Management, 2022. V. 23. No. 1. P. 218–237. DOI: 10.3846/jbem.2022.16202.
21. *Shelepov A.* The Influence of the G20's Digitalization Leadership on Development Conditions and Governance of the Digital Economy. International Organisations Research Journal, 2022. V. 17. No. 1. P. 96–113 (in Russian). DOI: 10.17323/1996-7845-2022-01-04.
22. *Sindireva A.V., Petrov Yu.V.* Ecological and legal bases and geoecological principles of the Organization of Nature management. Omsk: KAN, 2021. 116 p. (in Russian).
23. *Sorokin P.S., Popova T.A.* Human capital qualities in responding to challenges for social policy in the context of destructuring. The Journal of Social Policy Studies, 2022. V. 20. No. 1. P. 157–168 (in Russian). DOI: 10.17323/727-0634-2022-20-1-157-168.

24. *Stolbov V. A., Sharygin M. D.* Regional Potential and Regional Capital: “Possibility” — “Reality” — “Necessity”. Economy of Region, 2016. V. 12. No. 4. P. 1014–1027 (in Russian). DOI: 10.17059/2016-4-4.

25. *Yakubailik O.E., Kadochnikov A.A., Tokarev A.V.* WEB Geographic Information System and the Hardware and Software Ensuring Rapid Assessment of Air Pollution. Optoelectronics, Instrumentation and data Processing, 2018. V. 54. No. 3. P. 243–249. DOI: 10.3103/S8756699018030056.

26. *Yamashkin S.A., Yamashkin A.A., Zarubin O.A.* Matters of geoportal interfaces designing. Geodesy and Cartography, 2019. V. 80. No. 2. P. 46–56 (in Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2019-944-2-46-56.

27. *Zhukov V.I., Rattur M.V.* Some issues of the Transformation of law in the Era of digitalization: current norms, deviations and the vector of development. State and Law, 2022. No. 10. P. 129–140 (in Russian). DOI: 10.31857/S102694520022605-6.

УДК: 338.48 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-255-271**

И.Н. Тикунова[1], **Е.А. Курланова**[2]

МЕСТО ЕВРОПЕЙСКИХ ГОРОДОВ СРЕДИЗЕМНОМОРЬЯ В СФЕРЕ ТУРИЗМА ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА

АННОТАЦИЯ

Цель исследования — определить положение городов Средиземноморья в системе европейского туризма. Для этого была проанализирована туристская привлекательность и развитие туризма Средиземноморского региона и стран ЕС. Определено место наиболее привлекательных туристских городов Средиземноморья на рынке ЕС, выделены их сильные и слабые стороны в развитии туризма. В работе использованы методы сравнительного, кластерного, SWOT-анализа, создана классификация и серия таблиц и карт. В результате кластерного анализа десятка показателей выделены группы стран по туристской привлекательности и группы городов Европейского союза по уровню развития туризма. Исследование показало, что города Средиземноморья обладают различной степенью развития туризма, при этом в городах западной части региона выше, чем в восточной. Крупнейшие из них обладают диверсифицированным туристским предложением и привлекают туристов как центры курортного, культурно-познавательного, делового, событийного и религиозного туризма. Они являются популярным направлением у граждан Германии, Великобритании, Австрии и стран Скандинавии. Наблюдается взаимообмен туристами из стран Средиземноморья: Франции и Италии. Города Средиземноморья имеют разные и в ряде случаев значительно отличающиеся друг от друга значения показателей развития туризма. Более высокие показатели наблюдаются у городов в западной части Средиземноморья, показатели ниже — в восточной части (города Греции, Хорватии, Словении, Кипра). Преобладающее количество городов Средиземноморья, которые входят в список самых популярных направлений, демонстрируют показатели развития туризма ближе к минимальным значениям: экономика и бизнес, туристская активность, туристская политика и привлекательность, туристская инфраструктура. По характеристикам они схожи с городами Португалии и Восточной Европы. Слабой стороной развития туризма в городах Средиземноморья являются показатели устойчивого развития (рост средней температуры воздуха, содержание частиц PM2.5 в воздухе), что сказывается на индексе устойчивого туризма. После отмены всех коронавирусных ограничений города Средиземноморья способны к быстрому восстановлению за счет того, что предоставляют уже знакомый туристский продукт хорошего качества, что важно в условиях неопределенности. Также плюсом является близкое расположение к странам — основным поставщикам туристов и долгий запрет на поездки, который стимулировал желание путешествовать.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: туризм, города Средиземноморья, туристская привлекательность, кластерный и SWOT анализы, классификации

[1,2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail:* **irina.tikunova@icloud.com**

Irina N. Tikunova[1], **Ekaterina A. Kurlanova**[2]

THE PLACE OF EUROPEAN CITIES OF THE MEDITERRANEAN IN THE SPHERE OF TOURISM OF THE EUROPEAN UNION

ABSTRACT

The purpose of the study is to determine the position of Mediterranean cities in the European tourism system. For this purpose, the tourist attractiveness and tourism development of the Mediterranean region and the EU countries are analyzed. The place of the most attractive tourist cities of the Mediterranean in the EU market has been determined. Their strengths and weaknesses in the development of tourism are highlighted and opportunities and threats are considered. The methods of comparative, cluster, SWOT analysis were used in the work, a classification and a series of tables and maps were created. As a result of cluster analysis of a dozen indicators, groups of countries by tourist attractiveness and groups of cities of the European Union by the level of tourism development were identified. The study showed that the cities of the Mediterranean have different degrees of tourism development, while the level of tourism development in the cities of the western part of the region is higher than in the eastern. The largest of them have a diversified tourist offer and attract tourists as centers of resort, cultural and educational, business, event and religious tourism. They are a popular destination for citizens of Germany, Great Britain, Austria and the Scandinavian countries. There is also an interchange of tourists from the Mediterranean countries: France and Italy. Mediterranean cities have different and, in some cases, significantly different values of tourism development indicators. Higher rates of tourism development are observed in cities in the western part of the Mediterranean, while lower rates are observed in cities in the eastern part (cities of Greece, Croatia, Slovenia, Cyprus). The predominant number of Mediterranean cities, which are included in the list of the most popular destinations, demonstrate indicators of tourism development closer to the minimum values: economy and business, tourist activity, tourist policy and attractiveness, tourist infrastructure. In terms of characteristics, they are similar to cities in Portugal, as well as cities in Eastern Europe. The weak side of the development of tourism in Mediterranean cities is the indicators of sustainable development (the increase in average air temperature, the content of PM2.5 particles in the air), which affects the index of sustainable tourism. After the lifting of all coronavirus restrictions, Mediterranean cities are capable of rapid recovery due to the fact that they provide a familiar tourist product of good quality, which is important in conditions of uncertainty. Also, a plus is the proximity to the countries-the main suppliers of tourists and a long travel ban, which stimulated the desire to travel.

KEYWORDS: tourism, Mediterranean cities, tourist attractiveness, cluster and SWOT analyses, classifications

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail*: **irina.tikunova@icloud.com**

ВВЕДЕНИЕ

Регион Средиземноморья традиционно считается популярным туристским направлением, в котором важную роль в формировании потоков играют города. Значительные развитие городского туризма связано с психологическими, социально-экономическими и технологическими факторами: 55 % населения мира проживают в городах и чувствуют связь с городской средой, что способствует стремлению посещать другие города. Это стремление также увеличилось благодаря росту благосостояния населения развитых и развивающихся стран, что позволило людям чаще совершать туристические поездки в другие города. Помимо этого, наблюдается уменьшение стоимости транспортных издержек (создание лоукостеров), а также увеличение доступности жилья и легкости бронирования через интернет-платформы, такие как AirBnB, Booking и т. д. Так, города перестали восприниматься исключительно как транспортный узел и начали рассматриваться в качестве самостоятельной туристской дестинации.

Сектор туризма является одним из ведущих в городах Средиземноморья с точки зрения валовой добавленной стоимости и занятости. Туризм вносит непосредственный вклад в региональную экономику благодаря отраслевому синергизму и сильному мультипликативному эффекту, именно поэтому развитие туризма входит в государственные программы поддержки и финансирования, а также привлекает инвестиции.

Хотя городской туризм традиционно является одним из самых быстрорастущих сегментов туризма в странах с развитой экономикой [*Чабанюк*, 2013], научные работы, посвященные ему, появились относительно недавно. Они, как правило, раскрывают проблемы, связанные с чрезмерной туристической нагрузкой и предлагают пути их решения, но не отражают комплексное состояние городского туризма.

Понятие «городского туризма» является относительно молодым, впервые оно было предложено в конце XX в. в работах немецких ученых Г. Лазера [1997], Г. Нойенфельдта и О. Розе [1997]. Они выделили посещение города с разными целями (культурно-развлекательной, познавательной, коммерческой) в особый вид туризма — городской. Г. Лазер дал следующее определение: «Городской туризм являет собой краткосрочное (обычно 1–4 дня) посещение города по следующим причинам: интерес к истории или искусству города, интерес к посещению событий и приобретению разных видов товаров в данном городе» [1997]. Г. Нойенфельдт и О. Розе добавили к определению Г. Лазера положение о том, что городской туризм может быть вызван не только интересом к самому городу, но и др. причинами [1997] — например, путешествие с деловой целью, с целью посещения выставок, с целью оздоровления и т. д. Таким образом, городской туризм приобретает черты других видов туризма. Вклад в разработку концепции «городского туризма» внесли также Даниэль Клук и Кристиан Кестер, которые добавили к определению Г. Лазера тезис о том, что городской туризм может быть вызван интересом к культуре, событиям или бизнесу. Они называют городской туризм едва ли не основным видом туризма в Европе в настоящее время [2004].

Среди российских ученых городской туризм как отдельный вид туризма рассматривал Д.С. Ушаков [2009], который отмечал огромный вклад городов в туризм, поскольку именно в них концентрируется человеческий капитал, позволяющий создавать и формировать культурно-историческое наследие. Более того, города являются центрами концентрации капитала, который позволяет создавать необходимую инфраструктуру, транспортные узлы и т. д.

А.Ю. Александрова [2002, 2003] разделяет города как туристские центры на следующие виды: центры культурно-познавательного туризма, центры делового туризма, центры событийного туризма, города-курорты, лечебные центры, центры паломничества.

Приведем также определение Всемирной Туристской Организации (UNWTO): «Городской туризм — это вид туристической деятельности, которая осуществляется в городском пространстве с присущими ему атрибутами, характеризующимися несельскохозяйственной экономикой, такой как администрация, производство, торговля и услуги, и является узловыми транспортными точками. Городские направления предлагают широкий и разнородный спектр культурных, архитектурных, технологических, социальных и природных впечатлений и продуктов для отдыха и бизнеса»[1].

Неоднозначным является также вопрос границ Средиземноморья. Проблемой Средиземноморского региона как единого физико-географического и этнокультурного пространства занимались многие исследователи. В числе основных ученых можно назвать Р.Г. Ланда [1979], П.М. Долуханова [1998], А.Н. Грацианского [1971]. Важный вклад внесли В.Д. Нечаев, И.А. Чихарев и др., которые разработали концепцию «Геостратегический атлас Большого Средиземноморья» [2019]. Также для определения границ Средиземноморья в исследовании были использованы критерии, предложенные Т.А. Галкиной [2019].

Средиземноморье однозначно является уникальным туристским регионом Европы по многим признакам (время возникновения, исторические особенности формирования, природные особенности, историко-культурные особенности, уровень развития туристской инфраструктуры, единая туристская специализация), однако в официальной статистике отдельно рассматриваемый регион не выделяется. Территории, рассматриваемые в данной работе, согласно делению UNWTO частично относятся к нескольким туристским регионам Европы: Южная Европа и Западная Европа. Можно говорить о формально-страновом подходе к определению границ Средиземноморья, т. е. по принципу наличия выхода к Средиземному морю. Однако при таком способе делимитации средиземноморскими странами будут считаться страны, большая часть территории которых не имеют никакого отношения к Средиземному морю, например Франция.

С другой стороны, многие не имеющие прямого выхода к Средиземному морю страны обладают общностью природы, культуры и истории со странами, которые являются частью региона. Ярким примером является Португалия, имеющая сходные природно-климатические условия, виды хозяйственной деятельности и общую историю. Подходя с исторической стороны, в Средиземноморью можно включить Армению, многие годы имеющую сильную связь со странами Леванта. Таким образом, регион сильно расползается.

Можно сделать вывод, что подобный метод является ошибочным и недостоверно отражающим действительность. При формально-страновом подходе регион становится гипертрофированным, разнородным и несвязным с культурной точки зрения. Целесообразнее относить к Средиземноморью не страны целиком, а лишь отдельные районы, имеющие непосредственно выход к акватории, т. е. формально-административный подход. Так, к Средиземноморью относятся небольшие по площади страны с большой береговой линией и средиземноморские районы крупных стран (Франция, Испания, Италия). В таких пределах Средиземноморье занимает 605 тыс. км^2, население составляет 88 млн чел.

Определение границ такого обширного региона, как Средиземноморье, является комплексной задачей и требует учета большого количества различного рода факторов. Самыми устойчивыми границами являются природные, самыми неустойчивыми — административные. Процесс глобализации постепенно размывает культурные границы региона и делает задачу делимитации еще более сложной.

[1] Сайт Всемирной туристской организации. Электронный ресурс: https://www.unwto.org/ (дата обращения 15.02.2023).

С учетом вышеизложенной информации в данной работе в понятие Европейского Средиземноморья включены прибрежные территории таких стран, как Франция, Италия, Испания, Словения, Греция, Хорватия, а также вся территория Кипра и Мальты. Также отметим, что в работе рассматриваются только страны — члены ЕС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Теоретической базой исследования послужили труды отечественных и зарубежных ученых: экономистов, географов, социологов**.** Статистическая база для данного исследования была собрана на сайтах международных исследовательских организаций Eurostat[1], Eurobarometer[2], EuromonitorInternational[3], UNWTO, а также на сайтах национальных статистических служб, в ежегодных отчетах городов и на прочих тематически связанных сайтах[4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15].

Методом оценки места городов был выбран метод типологической классификации [*Тикунов*, 1997]. Основная цель такой классификации — разделить объекты на максимально однородные группы по заданным характеристикам. Количество конечных групп может быть определено заранее или же появиться в результате вычислений. Вопрос классификации городов поднимался многими российскими и зарубежными учеными: экономистами, географами, социологами. Впервые классификацию российских городов провел В.П. Семенов-Тян-Шанский по 3 критериям: людность, бойкость торгово-промышленного оборота, степень участия промышленности в торгово-промышленном обороте городов [1910]. Главным методом классификации в данном исследовании является кластерный анализ, проводимый в статистической программе SPSS. Для оценки текущего состояния и перспектив развития туризма в Средиземноморских городах проведен SWOT-анализ.

---

1 Eurostat. Электронный ресурс: https://ec.europa.eu/eurostat (дата обращения 16.02.2023).

2 Eurobarometer. European Union. Электронный ресурс: https://europa.eu/eurobarometer/screen/home (дата обращения 16.02.2023).

3 Отчет EuromonitorInternational. Электронный ресурс: https://go.euromonitor.com/white-paper-travel-211202-top-100-city-destinations-index.html (дата обращения 16.02.2023).

4 Сайт правительств зарубежных национальных офисов по туризму. Электронный ресурс: http://www.antor.cu/ (дата обращения 18.02.2023).

5 Сайт Барселонской конвенции. Электронный ресурс: https://www.medqsr.org/tourism (дата обращения 18.02.2023).

6 Численность населения городов Средиземноморья. Электронный ресурс: http://mc3.lped.fr/Les-caracteristiques-des-villes-Mediterraneennes (дата обращения 18.02.2023).

7 Сайт фонда средиземноморского туризма. Электронный ресурс: https://www.medtourismfoundation.com/ (дата обращения 18.02.2023).

8 Сайт ООН. Электронный ресурс: https://www.un.org/ (дата обращения 18.02.2023).

9 Сайт Европейской комиссии. Электронный ресурс: https://ec.europa.eu/ (дата обращения 18.02.2023).

10 Сайт Всемирного банка. Электронный ресурс: https://www.worldbank.org/ (дата обращения 18.02.2023).

11 Статистическая служба. Электронный ресурс: https://www.statista.com/statistics/734644/international-visitor-spending-in-barcelona/ (дата обращения 18.02.2023).

12 Отчет влияния COVID-19 на туризм. Электронный ресурс: https://etc-corporate.org/uploads/2021/06/ETC_Europeans-Attitudes-towards-Responsible-Travel-Choices_vs-final.pdf (дата обращения 18.02.2023).

13 Расходы туристов в ЕС. Электронный ресурс: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/publications/characterisation-tourism-expenditure-eu-regions_en#files (дата обращения 18.02.2023).

14 Список объектов ЮНЕСКО. Электронный ресурс: https://www.unesco.org/en (дата обращения 18.02.2023).

15 Пляжи BLUE FLAG. Электронный ресурс: https://www.blueflag.global/ (дата обращения 18.02.2023).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения места Средиземноморского региона, частью которого являются города, на туристском рынке ЕС рассмотрена туристская привлекательность данного региона в сравнении со странами ЕС, что позволило выявить ресурсы городов, приоритетные для организации туристской деятельности.

В целом города Средиземноморья обладают хорошими предпосылками для развития туризма, что в первую очередь обусловлено выгодными природно-географическими условиями; однако это далеко не единственный фактор, который может влиять на туристскую привлекательность. Значение также имеют показатели культурно-исторической значимости территории, поскольку культурно-познавательный туризм является основным видом туризма. Важно учитывать также уровень социально-экономического и инфраструктурного развития территории, который отражает способность предоставлять качественный сервис туристам. Более того, при оценке туристского потенциала важно учитывать ценовую политику, которая является важным фактором для туристов при планировании поездок.

Для сравнения туристской привлекательности были выбраны следующие показатели, отражающие различные аспекты туристской привлекательности (рис. 1):

1. Историко-культурные. Количество объектов ЮНЕСКО;
2. Природные. Количество пляжей, отмеченных знаком Blue Flag. Протяженность береговой линии;
3. Инфраструктурные. Количество мест размещения. Пассажирооборот воздушного транспорта;
4. Экономические. Средняя стоимость одного дня пребывания туриста. ВВП на душу населения. Доходы домохозяйств на душу населения.

Выделение кластеров по туристской привлекательности выполнено с использованием кластерного анализа методом k-средних с проведением дисперсионного анализа для определения кластер-образующих факторов. Сравнение групп выполнено с помощью непараметрического однофакторного дисперсионного анализа. Расчеты проводились в программе SPSS.

Рис. 1. Иерархическая структура критериев оценки туристской привлекательности. Составлено авторами

Fig. 1. Hierarchical structure of criteria for assessing tourist attractiveness. Compiled by the authors

В анализ включены 27 стран Европейского союза, а также отдельная группа региона Средиземноморья. В качестве статистической базы для группы региона Средиземноморья были собраны данные по прибрежным регионам стран Средиземноморья согласно территориальному делению NUTS-2.

Табл. 1. Группы стран ЕС по туристской привлекательности
Table 1. Groups of EU countries by tourist attractiveness

№	Уровень привлекательности	Страны и регионы	Сравнительные преимущества
1	Высокая	Средиземноморье Италия Германия Испания Франция	Историко-культурные Природные Инфраструктурные
2	Средняя	Бельгия Дания Ирландия Греция Хорватия Нидерланды Австрия Польша Португалия Швеция	Инфраструктурные Историко-культурные
3	Низкая	Болгария Чехия Эстония Кипр Латвия Литва Люксембург Венгрия Мальта Румыния Словения Словакия Финляндия	Экономические (более низкая стоимость отдыха)

** Составлено по результатам кластерного анализа*

В результате анализа были выделены 3 группы с высокой, средней и низкой туристской привлекательностью. Можно сделать следующие заключения:

- Регионы Средиземноморья обладают наибольшим сходством по показателям туристской привлекательности с Италией в целом и близки к Германии и несредиземноморским регионам Испании и Франции. В результате кластерного анализа Средиземноморье и Италия были выделены в отдельный кластер, однако статистически разница с другими странами из группы с высокой привлекательностью была минимальна;
- Главное сравнительное преимущество городов Средиземноморья заключено в природных факторах, а именно в количестве пляжей и протяженности береговой линии;
- Развитость инфраструктуры позволяет городам Средиземноморья предоставлять туристский сервис на уровне стран — главных реципиентов туристов в ЕС (Италии, Франции, Германии, Испании). Однако показатели количества мест размещения и пассажирооборота воздушного транспорта западного Средиземноморья выше, чем восточного;

- Города Средиземноморья обладают большой культурно-исторической значимостью, которая позволяет успешно развивать культурно-познавательный туризм.

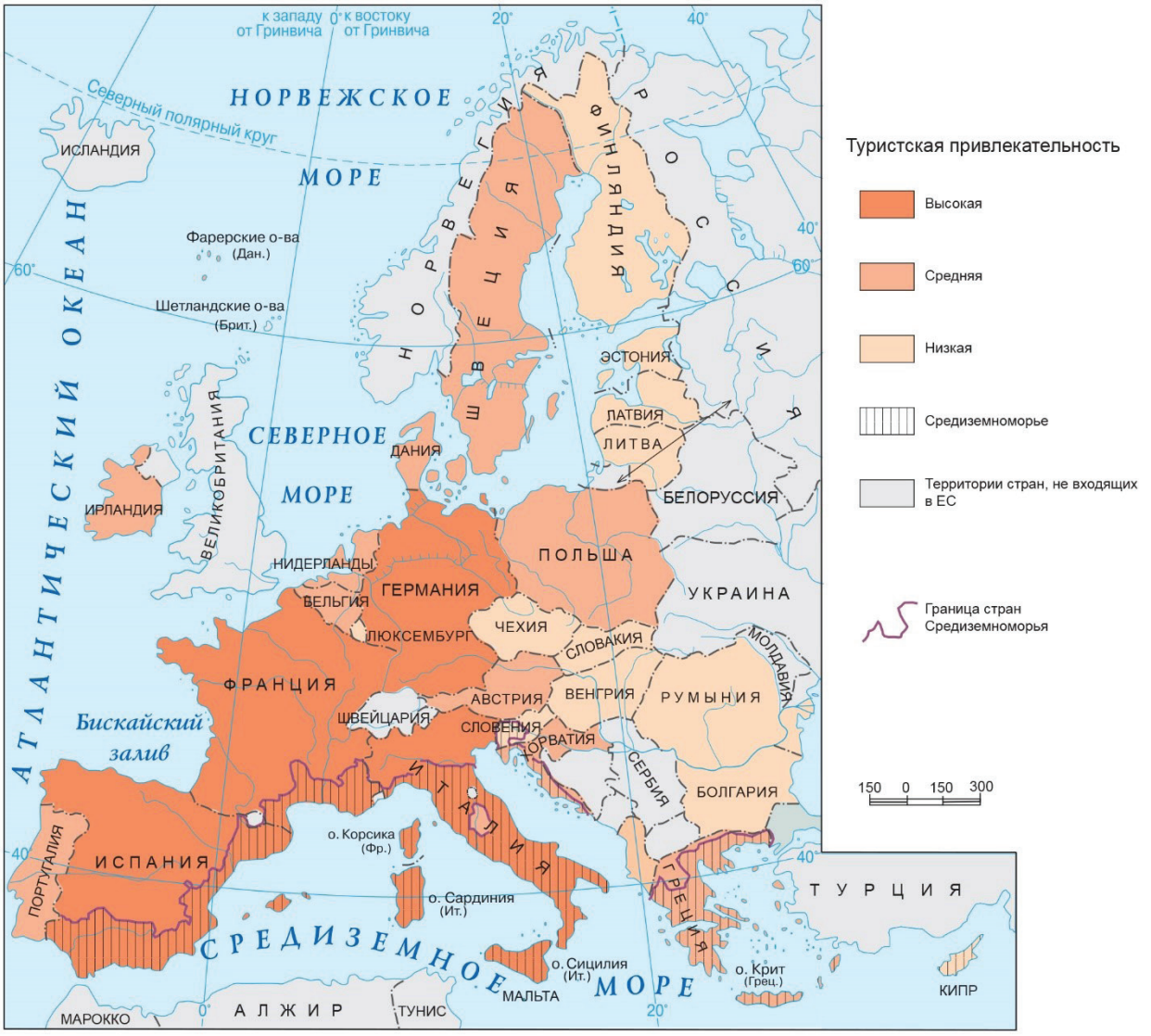


Рис. 2. Туристская привлекательность стран ЕС и Средиземноморья. Составлено по результатам кластерного анализа
Fig. 2. Tourist attractiveness of the EU and Mediterranean countries. Compiled based on the results of cluster analysis

Для сравнения уровня развития туризма в городах Средиземноморья и странах ЕС рассчитан совокупный показатель, который является средним значением нормированных показателей количества и расходов туристов. Нормирование проводилось по формуле (1):

$$\boldsymbol{Xnorm} = \frac{X - Xmin}{Xmax - Xmin} \quad (1)$$

Табл. 2. Развитие туризма в Средиземноморье и странах ЕС
Table 2. Tourism development in the Mediterranean and EU countries

Средиземноморье	**1,00**
Испания	0,66
Италия	0,58
Франция	0,54
Германия	0,52
Греция	0,20
Австрия	0,19
Португалия	0,16
Нидерланды	0,16
Швеция	0,12
Польша	0,11
Хорватия	0,09
Чехия	0,08
Бельгия	0,07
Ирландия	0,06
Румыния	0,05
Венгрия	0,05
Дания	0,04
Финляндия	0,03
Болгария	0,03
Словения	0,02
Словакия	0,01
Кипр	0,01
Эстония	0,01
Мальта	0,01
Литва	0,01
Латвия	0,01
Люксембург	0,00

* Составлено на основе расчетов

Регион Средиземноморья по выведенному показателю находится на первом месте среди стран Европейского Союза, опережая страны — лидеры по числу туристских прибытий в Европе: Францию, Испанию, Италию, Германию. Это говорит о его беспрецедентной значимости и, в частности, о значимости городов, которые являются главными аттракторами и реципиентами туристов на туристском рынке Европейского союза. Именно на города приходится значительная часть туристского потока (за исключением Франции): в Хорватии — 86 %, в Италии — 70 %, в Словении — 70 %, в Испании — 48 %, во Франции — 16 %.

По происхождению туристские потоки, направленные в Средиземноморье, весьма разнообразны. На Лазурный Берег едут туристы из Великобритании, Германии, Бельгии, Италии и Швейцарии. Греция популярна у туристов из Германии, Болгарии, Великобритании, Италии и Франции. В итальянское Средиземноморье основные потоки

направлены из Германии, Франции, Великобритании, Австрии и США, испанское побережье привлекает туристов из Великобритании, Германии, Франции, стран Скандинавии и Италии. В Хорватию едут туристы из Германии, Австрии, Словении, Италии и Чехии, в Словению — из Италии, Германии, Австрии, Хорватии и Нидерландов, на Мальту — из Великобритании, Италии, Германии, Франции и Испании, на Кипр — из Великобритании, Греции, Швеции, Германии.

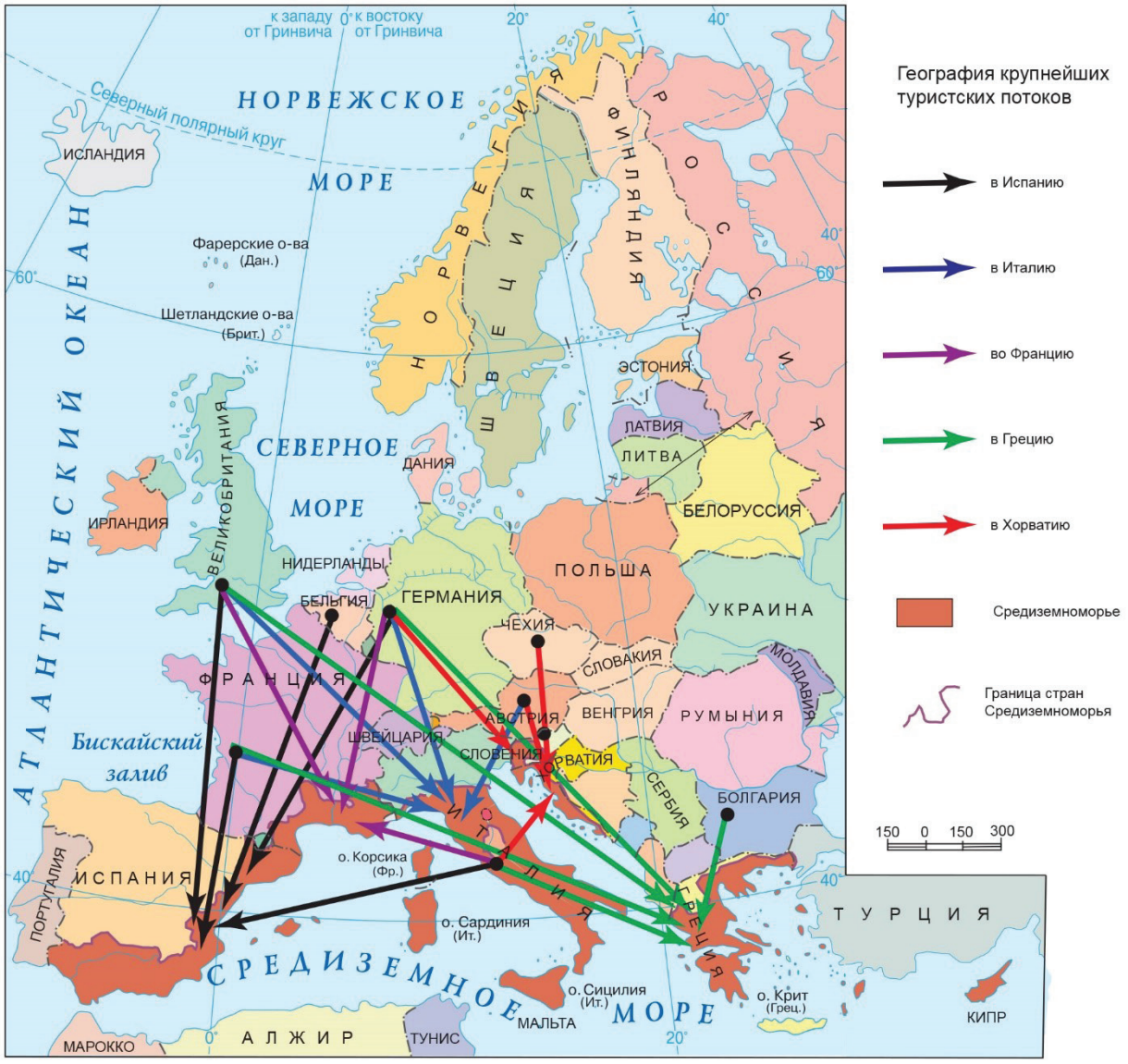


Рис. 3. География крупнейших туристских потоков в города Средиземноморья внутри ЕС, 2019 г. Составлено по [*Rafaela*, 2019]
Fig. 3. Geography of the largest tourist flows to Mediterranean cities within the EU, 2019. Compiled from [*Rafaela*, 2019]

Для оценки текущего состояния и перспектив развития туризма в Средиземноморских городах проведен SWOT-анализ: выделены сильные и слабые стороны в развитии туризма Средиземноморских городов, а также рассмотрены возможности и угрозы.

Табл. 3. SWOT-анализ городов Средиземноморья
Table 3. SWOT analysis of Mediterranean cities

Сильные стороны	Слабые стороны
— благоприятные климатические условия в течение всего года; — изрезанные берега, способствующие созданию морских портов; — разнообразие геоморфологических форм (горы, равнины, море и т. д.); — богатые история и культурное наследие; — географическая близость к странам-поставщикам туристов; — экономическая стабильность; — политическая стабильность; — единая валюта; — развитая инфраструктура туристского сектора; — известность и престиж направления	— чрезмерный наплыв туристов; — увеличение стоимости отдыха из-за высокого спроса; — неравномерная нагрузка на города (какие-то курорты перегружены, о каких-то курортах практически никто не знает); — в основном туризм развит в прибрежных зоны; — сезонность пляжно-курортного туризма, которая преобладает в регионе; — традиционный для южных стран перерыв в середине рабочего дня (сиеста), в который закрыты многие музеи, магазины и т. д.; — проблемы с безопасностью из-за криминогенной обстановки и терроризма
Возможности	**Угрозы**
— развитие других видов туризма, помимо пляжно-курортного; — развитие городской и туристской инфраструктуры; — развитие туризма и увеличение предложения в низкий сезон; — проведение международных мероприятий; — создание трансграничных туров	— рост популярности других туристских дестинаций для пляжного отдыха (Юго-Восточная Азия); — природно-стихийные катастрофы, которые могут разрушить памятники природы или же затруднить отдых (наводнения, землетрясения, пожары); — ухудшение экологической обстановки на побережье

* Составлено авторами

Таким образом, города Средиземноморья обладают как значительным количеством плюсов, так и значительным количеством минусов. Тем не менее, положительных черт больше. В основном они связаны с географическим положением региона (климат, рельеф и т. д.), которое является уникальным для Европейского Союза. Негативные же черты, напротив, вызваны в большей степени уже существующей чрезмерной туристской нагрузкой на города.

Главные возможности развития туризма в городах Средиземноморья связаны с улучшением уже существующих факторов (увеличение предложения и улучшение его качества). Угрозы развитию туризма в городах Средиземноморья носят более разноплановый характер: они связаны как с внутренними проблемами в регионе, так и с развитием туризма в различных регионах мира. Причем некоторые угрозы, например, возможность природных катастроф, неподвластны влиянию человека.

Города Средиземноморья являются важными туристскими центрами, о чем говорит их присутствие в списке самых посещаемых городов ЕС. Туристы посещают города с разными целями (отдых, просвещение, лечение, работа), однако в любом случае главный притягивающий фактор — городская среда. Именно поэтому важно провести анализ развития туристской отрасти в городах, чтобы выявить сильные и слабые стороны городов Средиземноморья по сравнению с другими городами ЕС. Для этого проведен кластерный анализ наиболее привлекательных городов Средиземноморья и городов ЕС по данным

ежегодного отчета EuromonitorInternational, в котором публикуется индекс «100 лучших городских туристских направлений».

В анализ включены данные о 30 городах Европейского союза, в т. ч. о 10 городах Средиземноморья (Афины, Барселона, Венеция, Верона, Ираклион, Ницца, Пальма-де-Майорка, Рим, Салоники, Флоренция), которые были представлены в отчете и включены в список лучших городских направлений. Для данных городов оценены и ранжированы показатели «Экономика и бизнес», «Туристская активность», «Туристская политика и привлекательность», «Туристская инфраструктура», «Здоровье и безопасность», «Устойчивое развитие», а также «Индекс 100 лучших городских туристских направлений». Значения были представлены в виде рангов. Учитывая равнозначность показателей, для определения оптимального количества кластерных групп, выполнен иерархический кластерный анализ с построением дендрограммы. Оптимальным оказалось деление городов на 4 группы.

Для определения вклада показателей в структуру кластеризации и для разделения городов на группы проведен кластерный анализ методом k-средних. В качестве кластер-образующих факторов включены перечисленные выше показатели. Дисперсионный анализ показал статистически значимый вклад всех показателей в структуру кластерного деления.

По результатам кластерного анализа получено 4 группы. Разделение городов представлено в табл. 4. В первую группу вошло 6 городов, среди которых 4 города Средиземноморья, что составило 67 %. Во вторую группу объединились 10 городов, в т. ч. 4 города Средиземноморья — 40 %. Третью группу образовали 8 городов, среди которых 2 города Средиземноморья, что составило 25 %. В четвертую группу вошли 6 городов, однако ни одного города Средиземноморья.

Табл. 4. Кластерные группы городов ЕС по уровню развития туристской отрасли
Table 4. Cluster groups of cities of the EU by the level of development of the tourism industry

Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4
Рим	Цюрих	**Флоренция**	**Пальма де Майорка**
Барселона	Мюнхен	**Афины**	**Верона**
Париж	Вена	**Венеция**	**Ираклион**
Амстердам	Дублин	**Ницца**	**Салоники**
Мадрид	Франкфурт-на-Майне	Лиссабон	Варшава
Берлин	Стокгольм	Брюссель	Будапешт
Милан			Марн-ла-Валле
Прага			Таллин
			Порто
			Краков

** Составлено по результатам кластерного анализа*

Показатель «Экономика и бизнес» был выше в группах 1 и 2, однако группы с высокой долей городов Средиземноморья имели более низкие показатели, что говорит о более низком уровне социально-экономического развития в них по сравнению с другими городами Европы. Среди показателей можно назвать: ВВП на душу населения, доход на

душу населения, домохозяйства с доходом более 35 тыс. долл., расходы на гостиницы и питание, численность населения, доля населения в возрасте от 15 до 65 лет в общей численности населения, процент домохозяйств с доступом в Интернет, занятость в сфере услуг, уровень безработицы.

Показатели из группы «Туристская активность» в наилучшей степени развита в городах из групп 1 и 3, а в наименьшей степени — в группе 4. Среди конкретных показателей можно назвать: международные прибытия, длительность пребывания, средние дневные расходы, количество внутренних поездок на душу населения и средние расходы на поездку внутри страны.

Показатели из группы «Туристская политика и привлекательность» лучше всего представлены в группе 1, а хуже всего — в группе 4. В группах 2 и 3 ранги по данным показателям средние. Среди показателей можно назвать следующие: необходимость визы, беспошлинные покупки, популярность города в Google, а также обзоры главных достопримечательностей в социальных сетях. Данные показатели важны, поскольку влияют на развитие бренда города через интернет. Так, можно сказать, что самый сильный туристский бренд среди городов наблюдается у Барселоны и Рима.

Показатели из группы «Туристская инфраструктура» лучше всего представлены в группе 1, а хуже всего — в группе 4. В группах 2 и 3 ранги по данным показателям средние. Среди показателей можно назвать: количество мест размещения, пассажирооборот аэропортов, количество автомобилей, наиболее посещаемые музеи, количество университетов в рейтинге 200 лучших, количество магазинов и торговых центров, количество точек общественного питания.

По показателю «Здоровье и безопасность» города из группы 1 имеют самые низкие результаты среди всех; это самые крупные города региона по численности населения, крупные транспортные и промышленные центры — Барселона и Рим. При этом города из других групп имели схожие ранги и значимо не отличались друг от друга. Среди показателей можно назвать: смертность на душу населения в стране, количество привившихся от COVID-19, индекс политической стабильности, индекс восприятия коррупции, количество ДТП с травмами, глобальный индекс терроризма, количество парков, количество аптек. В условиях развития туризма после пандемии COVID-19 данный показатель приобрел еще большую значимость, поскольку туристы стараются выбирать наиболее безопасные направления.

Города, показавшие лучший результат в группе «Устойчивое развитие», оказались в группе 2, где города Средиземноморья не представлены. Худшие показатели устойчивого развития наблюдаются в группе 4. Среди показателей можно назвать: рост средней температуры воздуха, содержание частиц PM2.5 в воздухе, количество объектов ЮНЕСКО, индекс устойчивого туризма.

Интегральный показатель «Индекс 100 лучших городских туристских направлений» в результате представлен более значимыми рангами в группах 1 и 2, что говорит о том, что данные города являются наиболее привлекательными для туристов. Самые низкие ранги представлены в группе 4; это говорит о том, что среди представленных городов они обладают наименьшей привлекательностью.

Далее рассмотрим сильные и слабые стороны городов Средиземноморья. Из лепестковой диаграммы видно, что города Средиземноморья выделяются на фоне других городов Европы высокими показателями группы «Здоровье и безопасность». Главная проблема городов Средиземноморья — низкий уровень устойчивого развития, что обусловлено высокой туристской нагрузкой на сравнительно небольшие города.

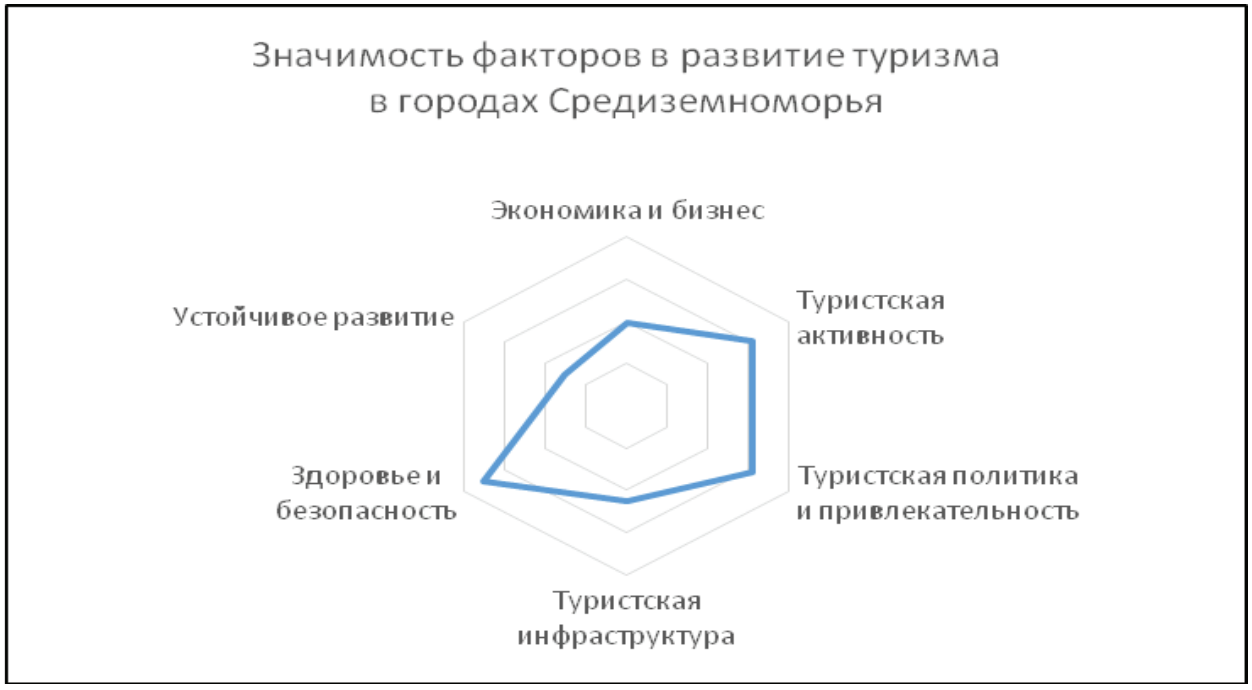


Рис. 4. Значимость факторов в развитии туризма в городах Средиземноморья. Составлено по результатам кластерного анализа
Fig. 4. The importance of factors in the development of tourism in Mediterranean cities. Compiled based on the results of cluster analysis

В результате кластерного анализа были получены следующие результаты:

1) Города Средиземноморья имеют разные, и в ряде случаев значительно отличающиеся друг от друга значения показателей, что говорит о различной степени развития туризма в городах;
2) Первая и вторая кластерные группы, имеющие в своем составе меньше всего городов Средиземноморья (2 из 14 — 14,3 % суммарно), чаще имели средние или высокие характеристики. Это говорит о высоком уровне развития туризма на фоне остальных городов Европы лишь в Барселоне и Риме;
3) Группы 3 и 4, имеющие в своем составе больше городов Средиземноморья (8 из 16 — 50 % суммарно), напротив, значительно чаще показывали ранги, близкие к минимальному, что говорит о более низком развитии проанализированных категорий. Таким образом, города Средиземноморья преимущественно уступают другим городам Европейского союза;
4) По результатам проведенного анализа следует, что Рим и Барселона имеют лучшие из 10 проанализированных Средиземноморских городов показатели развития. По данным показателям они приближены к таким городам, как Париж, Амстердам, Мадрид, Берлин, Милан и Прага;
5) Города Пальма-де-Майорка, Верона, Ираклион и Салоники показали ранги, более близкие к городам Варшава, Будапешт, Марн-ла-Вале, Таллин, Порто, Краков. Города из данной кластерной группы имели самые низкие характеристики;
6) Для городов Средиземноморья характерен более низкий уровень устойчивого развития, однако более высокий уровень показателей здоровья и безопасности.

ВЫВОДЫ

В качестве резюме можно представить следующие выводы:

1. Крупнейшие города Средиземноморья обладают диверсифицированным туристским предложением и привлекают туристов как центры курортного, культурно-познавательного, делового, событийного и религиозного туризма;
2. Они выгодно отличаются от большинства других европейских городов благоприятными климатическими условиями, протяженностью береговой линией, количеством качественных пляжей и уникальными для Европы объектами исторического наследия;
3. На них приходится значительная часть туристского потока стран, имеющих выход к Средиземному морю: в Хорватии — 86 %, в Италии — 70 %, в Словении — 70 %, в Испании — 48 %, во Франции — 16 %;
4. Для городов Средиземноморья характерно преобладание иностранных туристов;
5. Города Средиземноморья являются популярным направлением у граждан Германии, Великобритании, Австрии и стран Скандинавии. Также наблюдается взаимообмен туристами из стран Средиземноморья: Франции и Италии;
6. Города Средиземноморья имеют разные, и в ряде случаев значительно отличающиеся друг от друга значения показателей развития туризма. Более высокие показатели развития туризма наблюдаются у городов в западной части Средиземноморья, показатели ниже — у городов в восточной части (города Греции, Хорватии, Словении, Кипра);
7. Наиболее высокий уровень развития туризма (на уровне наиболее популярных городов ЕС) наблюдается у двух городов — Рима и Барселоны. Они близки к таким городам, как Париж, Амстердам, Мадрид, Берлин, Милан и Прага;
8. Преобладающее количество городов Средиземноморья, которые входят в список самых популярных направлений, демонстрируют показатели развития туризма ближе к минимальным значениям: экономика и бизнес, туристская активность, туристская политика и привлекательность, туристская инфраструктура. По характеристикам они схожи с городами Португалии, а также городами Восточной Европы;
9. Слабой стороной развития туризма в городах Средиземноморья являются показатели устойчивого развития (рост средней температуры воздуха, содержание частиц PM2.5 в воздухе), что сказывается на индексе устойчивого туризма;
10. В связи с пандемией COVID-19 туристский рынок городов Средиземноморья столкнулся с кризисом, который привел к падению количества туристов на 70 %. Основной спад пришелся на март, апрель и май 2020 г., во время самых строгих ограничений на въезд в страны, однако после их отмены наблюдался моментальный рост;
11. В большей степени от пандемии пострадали города, специализирующиеся на туризме с целью рекреации, особенно в элитном сегменте, поскольку въезд в страну иностранных граждан был закрыт;
12. После отмены всех коронавирусных ограничений города Средиземноморья способны к быстрому восстановлению за счет того, что предоставляют уже знакомый туристских продукт хорошего качества, что важно в условиях неопределенности. Также плюсом является близкое расположение к странам — основным поставщикам туристов и долгий запрет на поездки, который стимулировал желание путешествовать;

13. Туризм наносит существенный ущерб городам Средиземноморья, что связано со значительной туристкой нагрузкой на природу и инфраструктуру: чрезмерное загрязнение моря, избыточное использование водного и энергетического ресурса, снижение привлекательности ландшафтов, криминализация, низкий уровень качества создаваемой занятости и т. д. Эти проблемы требуют острого внимания и решения в ближайшее время — для этой цели в Средиземноморье создаются международные альянсы и организации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александрова А.Ю. География туризма. М.: Аспект Пресс, 2002. 470 с.

Александрова А.Ю., Тикунова И.Н. Анализ структуры мирового туристического пространства с применением многомерной математической классификации. Вестник Московского университета. Серия 5: География, 2003. № 6. С. 16–21.

Галкина Т.А. Границы «неформального» региона и критерии их определения на примере Средиземноморья. Наука и природа. Научный журнал международной гимназии в Новых Вешках, 2019. № 3. С. 7–15.

Грацианский А.Н. Природа Средиземноморья. М.: Мысль, 1971. 510 с.

Долуханов П.М. История Средиземных морей. М.: Наука, 1988, 140 с.

Ланда Р.Г. Средиземноморье глазами востоковеда. М.: Наука, 1979. 298 с.

Нечаев В.Д., Чихарев И.А., Ирхин А.А., Маковская Д.В. Геостратегический атлас Большого Средиземноморья. Вестник Московского университета. Серия 5: География, 2019. № 1. С. 67–75.

Тикунов В.С. Классификации в географии: ренессанс или увядание? Москва – Смоленск: Издательство СГУ, 1997. 367 с.

Ушаков Д.С. Страноведение. М.: МарТ, 2009. 255 с.

Чабанюк О.В. Ранжирование факторов развития туризма. Вестник Московского Университета МВД России, 2013. № 6. С. 230–231.

Kluck D., Koester C. Tourismus in Deutschland, 2004. 210 p.

Leser H. Diercke-Wörterbuch allgameine Geographie. München – Braunschweig, 1997. 125 p.

Neuenfeldt H., Rose O. Stadttourismus als Wirtschaftsfaktor in Aachen. Göttingen, 1997. Web resource: www.geogr.uni-goettingen.de (accessed 22.01.2023).

Rafaela I. OECD Tourism trends and policies, 2019. 580 p.

REFERENCES

Alexandrova A.Yu. Geography of tourism. Moscow: Aspect Press, 2002. 470 p.

Alexandrova A.Yu., Tikunova I.N. Analysis of the structure of the world tourism space using multidimensional mathematical classification. Moscow University Bulletin. Series 5: Geography, 2003. No. 6. P. 16–21.

Chabanyuk O.V. Ranking of tourism development factors. Bulletin of the Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2013. No. 6. P. 230–231.

Dolukhanov P.M. History of the Mediterranean Seas. Moscow: Nauka, 1988. 140 p.

Galkina T.A. The boundaries of the “informal” region and the criteria for their determination using the example of the Mediterranean. Science and Nature. Scientific Journal of the International Gymnasium in Novye Veshki, 2019. No. 3. P. 7–15.

Gratsiansky A.N. Nature of the Mediterranean. Moscow: Mysl', 1971. 510 p.

Kluck D., Koester C. Tourismus in Deutschland, 2004. 210 p. (in German).

Landa R.G. The Mediterranean through the eyes of an orientalist. Moscow: Nauka, 1979. 298 p.

Leser H. Diercke-Wörterbuch allgameine Geographie. München – Braunschweig, 1997. 125 p. (in German).

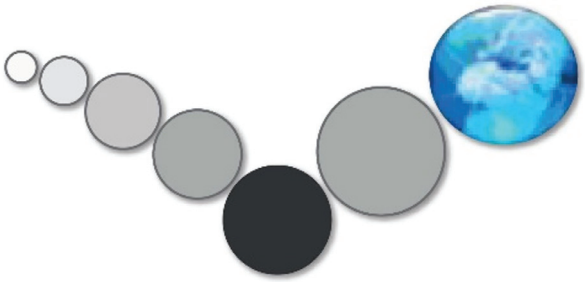
Nechaev V.D., Chikharev I.A., Irkhin A.A., Makovskaya D.V. Geostrategic Atlas of the Greater Mediterranean. Moscow University Bulletin. Series 5: Geography, 2019. No. 1. P. 67–75.

Neuenfeldt H., Rose O. Stadttourismus als Wirtschaftsfaktor in Aachen. Göttingen, 1997. Web resource: www.geogr.uni-goettingen.de (accessed 22.01.2023) (in German).

Rafaela I. OECD Tourism trends and policies, 2019. 580 p.

Tikunov V.S. Classifications in geography: Renaissance or decline? Moscow–Smolensk: Publishing House of Smolensk State University, 1997. 367 p.

Ushakov D.S. Regional studies. Moscow: MarT, 2009. 255 p.



Дистанционные методы исследования Земли

Remote methods in Earth research

УДК: 528.873:551.4.042 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-272-287**

Е.А. Балдина[1], **Е.В. Лебедева**[2], **Н.В. Аникина**[3]

АКТИВНОСТЬ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА СКЛОНАХ РЕЧНЫХ ДОЛИН В УСЛОВИЯХ ГАЗОГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ (ПО РАЗНОВРЕМЕННЫМ СНИМКАМ И ЦМР)

АННОТАЦИЯ

В геотермальных зонах районов современного вулканизма на геоморфологические процессы значительное влияние оказывают многочисленные выходы разнообразных по составу газогидротерм, под воздействием которых могут кардинально меняться свойства пород, а как следствие — особенности и темпы денудации. Выполнено изучение и сравнительный анализ активности процессов на склонах речных долин Камчатки в условиях газогидротермальных проявлений (долина р. Гейзерной) и без таковых (долина р. Шумной). Для наиболее корректного выделения и сопоставления участков долин, отличающихся разными условиями развития современных склоновых процессов, использованы цифровая модель рельефа ArcticDEM и серия морфометрических карт (крутизны склонов, экспозиции, элементарных водосборных бассейнов), построенных на ее основе, а также геологические карты, результаты термальной съемки разного уровня детальности и данные полевых наблюдений. Проведено дешифрирование снимков высокого пространственного разрешения (0,5–5 м) на середину 1960-х гг. (KeyHole-4 CORONA) и современных на период 2016–2021 гг. разных съемочных систем. В результате дешифрирования получены количественные оценки состояния склонов в пределах выделенных на основе морфометрии фрагментов выбранных долин на два временных среза, отстоящие на 55 лет. Установлено, что в условиях развития газогидротермальных проявлений доля суммарной площади участков склонов, пораженных активными процессами, при прочих равных условиях значительно превышает таковую на участках без

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail:* **baldina@geogr.msu.ru**

[2] Институт географии РАН, Старомонетный пер., д. 29с4, Москва, Россия, 119017, *e-mail:* **Ekaterina.lebedeva@gmail.com**

[3] Институт географии РАН, Старомонетный пер., д. 29с4, Москва, Россия, 119017, *e-mail:* **nikitina.nadine@gmail.com**

газогидротерм. За 55 лет доля площадей активизации склоновых процессов на фоновых участках практически не изменилась, а на территориях, подверженных газогидротермальному воздействию, увеличилась на 10–17 %. Проведенные исследования позволяют заключить, что газогидротермальные проявления являются наиболее мощным драйвером современных геоморфологических процессов на склонах в исследуемом регионе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геотермальная зона, динамика склоновых процессов, разновременные снимки высокого разрешения, морфометрические построения, Камчатка

Elena A. Baldina[1], **Ekaterina V. Lebedeva**[2], **Nadezhda V. Anikina**[3]

ACTIVITY OF GEOMORPHOLOGICAL PROCESSES ON THE SLOPES OF RIVER VALLEYS IN THE CONDITIONS OF GAS-HYDROTHERMAL OCCURRENCES (BASED ON MULTI-TEMPORAL IMAGES AND DEM ANALYSIS)

ABSTRACT

In the geothermal zones of modern volcanic areas, geomorphological processes are considerably influenced by numerous gas-hydrothermal outcrops, which may dramatically change rock properties and, consequently, denudation peculiarities and rates. The activity of processes on the slopes of Kamchatka river valleys under conditions of gas-hydrothermal occurrences (Geysernaya river valley) and without them (Shumnaya river valley) has been studied and comparatively analyzed. For the most correct separation and comparison of the valley regions which differ in the conditions of development of the modern slope processes, ArcticDEM digital elevation model and a series of morphometric maps (slope steepness, exposition, elementary watersheds) built on its basis, as well as geological maps, results of thermal survey of different detail level and field observation data were used. Interpretation of high spatial resolution images (0.5–5 m) for the mid-1960s (KeyHole-4 CORONA) and modern images for the period 2016–2021 from different survey systems was carried out. As a result of decoding, quantitative assessments of slope conditions within the selected valley fragments selected on the basis of morphometry were obtained for two time slices separated by 55 years. It is established that under conditions of gas-hydrothermal manifestations development, the share of the total area of the slope's sections affected by active processes, with other conditions being equal, is significantly higher than the same in the areas without gas-hydrotherms. For 55 years the share of the areas with slope processes activation on the background areas practically has not changed, and on the territories affected by gas-hydrothermal influence has increased by 10–17 %. The conducted studies allow us to conclude that gas-hydrothermal manifestations are the most powerful driver of modern geomorphological processes on slopes in the studied region.

KEYWORDS: geothermal area, slope dynamics, multi-temporal high-resolution images, morphometric plotting, Kamchatka

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **baldina@geogr.msu.ru**

[2] Institute of Geography RAS, 29s4, Staromonetny ln., Moscow, 119017, Russia, *e-mail:* **Ekaterina.lebedeva@gmail.com**

[3] Institute of Geography RAS, 29s4, Staromonetny ln., Moscow, 119017, Russia, *e-mail:* **nikitina.nadine@gmail.com**

ВВЕДЕНИЕ

На горных склонах повсеместно наблюдаются лишенные растительности участки активных смещений пород — осыпи, обвалы и оползни различного типа. Важную роль при формировании таких смещений играют внешние (выпадение экстремальных осадков, землетрясения) и внутренние факторы (крутизна склонов, литологические свойства пород, наличие участков повышенной трещиноватости, экспозиция и др.). В геотермальных зонах районов современного вулканизма, в частности на Камчатке, на геоморфологические процессы на склонах значительное влияние оказывают многочисленные выходы разнообразных по составу газогидротерм, которые прогревают, увлажняют горные породы, а также изменяют их физические свойства. Выделяются [*Рычагов*, 1993; *Сугробов* и др., 2009; *Бортникова* и др., 2013] три основных типа газогидротермальных проявлений: парогазовые выходы, грязевулканические проявления и термальные источники. Ю.В. Фроловой с коллегами установлено [2011; 2015; 2019], что под влиянием минерализованных термальных вод вулканическое стекло замещается глинистыми минералами и цеолитами, что вызывает снижение плотности породы и уменьшение внутреннего сцепления. В результате смещения пород на склонах идут более активно.

Наблюдения в долине р. Гейзерной, где расположено одно из пяти крупнейших гейзерных полей мира, свидетельствуют об активном развитии там гравитационных склоновых процессов [*Пинегина* и др., 2008]. По аэрофотоснимкам 1950–1990 гг. были отдешифрированы многочисленные оползни [*Двигало*, *Мелекесцев*, 2009]. По результатам дистанционного зондирования (снимки 2009 г.) на внутридолинных склонах в нижнем течении реки помимо этого были выделены следы обвалов и осыпей [*Зеркаль* и др., 2019]. На основе обширной базы разновременных снимков высокого разрешения на склонах долины среднего и нижнего течения р. Гейзерной прослежена активность процессов [*Балдина* и др., 2022] за последние несколько десятилетий (1964–2020 гг.). На всем обследованном фрагменте долины площадью 24.8 км^2 доля обнажений — т. е. участков, пораженных современными процессами рельефообразования (преимущественно склоновыми, реже — эрозионными), в 1964 г. составляла 10.5 %, а к 2017 г. возросла до 13.5 % [*Lebedeva* et al., 2022].

Для оценки роли воздействия газогидротермальных проявлений на активизацию протекания склоновых процессов целесообразно сравнить интенсивность последних на участках с выраженной газогидротермальной активностью и на расположенных в близких природных условиях, но без газогидротерм. Ранее нами было проведено сравнение правого и левого бортов долины р. Гейзерной. На участке с газогидротермальными проявлениями (левый борт) площадь активных процессов рельефообразования втрое превышала таковую на склоне без газогидротерм [*Lebedeva* et al., 2022]. Однако на левом борту долины в большей мере представлены и зоны трещиноватости, т. к. он в целом совпадает с кальдерообразующим разломом; кроме того, влияние на характер процессов в какой-то мере могла оказать и экспозиция склонов. Поэтому для подтверждения полученного заключения было принято решение провести аналогичные исследования в другой долине в сходных физико-географических условиях, но не затронутой газогидротермальными процессами. В качестве долины-аналога был выбран фрагмент среднего течения р. Шумной (выше впадения р. Гейзерной) протяженностью 9,6 км и площадью 11,6 км^2 (рис. 1).

Прогрев и выветривание пород в долине р. Гейзерной наблюдается на протяжении всего года, что несложно проследить на снимках в тепловом ИК канале даже относительно низкого (100 м) пространственного разрешения. Сопоставление участков двух долин на снимке со спутника Landsat-8 в тепловом канале (10,6–11,19 мкм), сделанном в ночное

время в марте 2023 г., когда вся Камчатка еще покрыта снегом (рис. 2а), позволяет по высокой яркости изображения однозначно опознать обилие участков с повышенным тепловым излучением в пределах долины р. Гейзерной и темные оттенки «холодной» долины р. Шумной. Однако после впадения в р. Шумную р. Гейзерной ее русло хорошо прослеживается благодаря светлому тону, свидетельствующему об относительно высокой температуре воды. Результаты тепловой съемки, выполненной с вертолета 5 августа 2010 г. [*Kirykhin* et al., 2012], обозначившей наиболее прогретые участки Гейзерного и Верхнегейзерного термальных полей в днище долины и на ее левом борту, во многом совпадают с современными (рис. 2б).

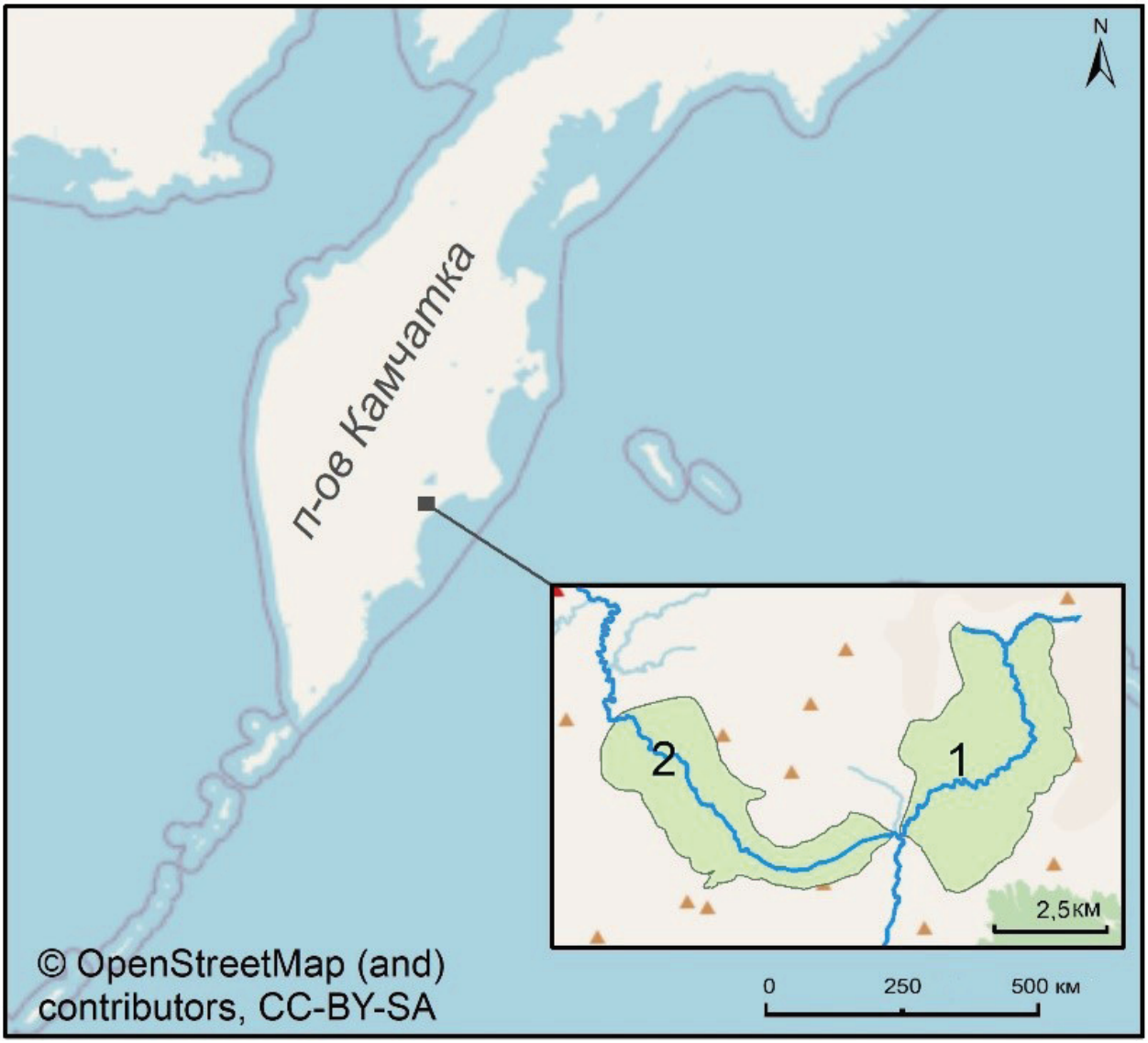


Рис. 1. Положение района исследований: 1 — долина р. Гейзерной, 2 — долина р. Шумной
Fig. 1. Location of the study area: 1 — Geysernaya River valley, 2 — Shumnaya River valley

Задача данного исследования состоит в детальном сравнении двух выбранных участков, отчетливо различающихся газогидротермальными условиями развития современных процессов на склонах.

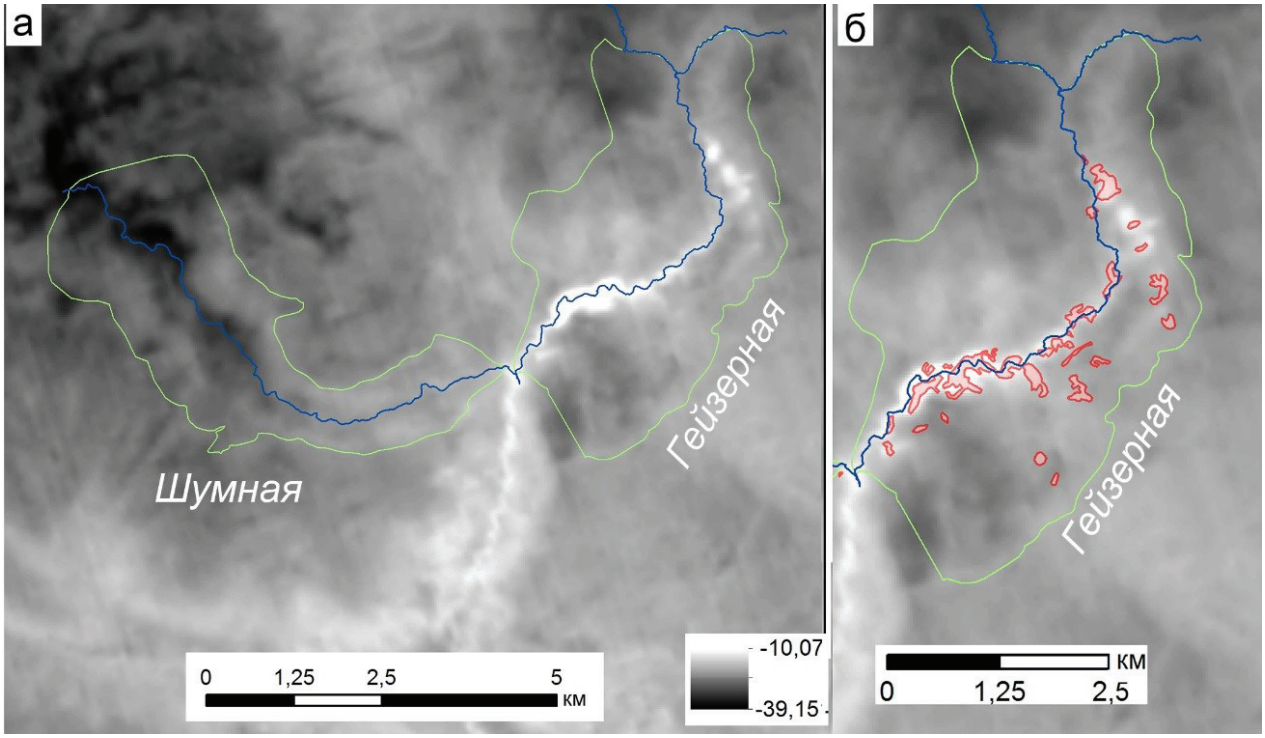


Рис. 2. Долины рр. Шумной и Гейзерной на снимке в тепловом инфракрасном диапазоне Landsat-8, полученном ночью 5 марта 2023 г.: а — значения температуры на верхней границе атмосферы, б — фрагмент того же снимка; розовые контуры — термальные поля, зафиксированные тепловой съемкой с вертолета ИВиС 5 августа 2010 г. [Kirykhin et al., 2012]

Fig. 2. Shumnaya and Geysernaya river valleys on Landsat-8 thermal infrared image, acquired at night on March 5, 2023: a — temperature values at the upper atmosphere boundary, b — fragment of the same image; pink outlines — thermal fields recorded by thermal survey by IV&S from a helicopter on August 5, 2010 [Kirykhin et al., 2012]

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемая территория расположена в восточной части Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии в пределах Восточного вулканического пояса Камчатки [*Сугробов* и др., 2009] и находится на территории Кроноцкого государственного заповедника. В долине р. Гейзерной расположено одно из 5 крупнейших гейзерных полей мира [Атлас…, 2015]. Река является левым притоком р. Шумной (бассейн Тихого океана) и берет свое начало на склонах вулкана Кихпиныч. Ее протяженность составляет около 11 км, продольный профиль ступенчатый, невыработанный. Исследования активности склоновых процессов [*Лебедева* и др., 2022; *Lebedeva* et al., 2022] проводились в нижнем и среднем течении реки, где наряду с выходами высокотемпературных напорных вод и паровых струй проявлениями тепловых аномалий являются также грязевые котлы, участки гидротермально измененных пород, нагретая до различных температур почва.

Река Шумная вытекает из оз. Центрального, расположенного в кальдере Узон, и впадает в Тихий океан. Ее общая протяженность около 40 км. Тепловые аномалии в ее пределах установлены лишь близ устья р. Гейзерной, где еще Т.И. Устиновой был обнаружен самый первый гейзер [Атлас…, 2015], но этот участок не входит в анализируемую зону. В среднем течении р. Шумной ее долина также следует вдоль

кольцевого разлома, ограничивающего кальдеру. В геологическом строении изученных территорий обеих долин участвуют три комплекса пород: докальдерный (Q_3^{1-3}), синхронный кальдерообразованию (39–40 тыс. л.н.) и посткальдерный. В среднем течении обе долины вскрывают лавы и пирокластику андезитов и дацитов докальдерного комплекса [*Леонов* и др., 1991; Атлас…, 2015]. Вдоль расположенных внутри кальдеры бортов выходят заполняющие ее слабо литифицированные вулканогенно-озерные отложения позднего плейстоцена — туфы, туфопесчаники, туфогравелиты с линзами брекчий (Q_3^4).

Для получения репрезентативных расчетов необходимо было определить морфометрические характеристики выделяемых фрагментов долин и корректно провести границы сравниваемых участков, что было выполнено на основе анализа морфометрических характеристик рельефа на основе свободно распространяемой цифровой модели рельефа ArcticDEM с разрешением 2 x 2 м, полученной с сайта Университета Миннесоты[1]. Получение морфометрических характеристик и создание соответствующих карт выполнено с использованием инструментов модуля Spatial Analyst в программном пакете ArcGIS 10.5 от ESRI. Границы участков в пределах сравниваемых фрагментов долин рр. Гейзерной и Шумной проводились на основе ряда признаков. С помощью серии созданных карт были выделены морфометрически выраженные бровки долин, определена крутизна склонов, экспозиция, а также границы локальных (малых) водосборных бассейнов, построенные в ArcGIS с помощью модуля Spatial Analyst/Hydrology на основе анализа направлений линий стока по ЦМР. Левый борт долины р. Гейзерной и правый борт долины р. Шумной определялись совершенно однозначно на основе всего набора данных, тогда как для правого борта р. Гейзерной и левого борта р. Шумной при определении границ дополнительно учитывалось наличие следов проявлений активных экзогенных процессов на приводораздельных склонах, указывающих на направление существующих литодинамических потоков.

В результате проведенного анализа мы исключили из расчетов бассейн левого притока р. Шумной — р. Сестренки и участок долины р. Гейзерной выше слияния Правой и Левой Гейзерных, имеющий большие абсолютные высоты, иную ориентировку и геоморфологическое строение. Морфометрические карты рельефа с отмывкой, уклонов и экспозиции склонов приведены на рисунке 3.

На основании анализа построенных карт были получены морфометрические характеристики сравниваемых участков долин: максимальные и минимальные высоты, относительная глубина вреза, средние уклоны, а также выделены фрагменты бортов долин различной экспозиции (табл. 1).

Кроме того, были построены по 2 поперечных морфометрических профиля в верхней и нижней частях рассматриваемых долин, пересекающих склоны разной экспозиции (рис. 3а, 4), с выделением зон проявлений газогидротермальной активности.

[1] Цифровая модель рельефа ArcticDEM. Сайт Полярного центра геопространственных исследований университета Миннесоты (The Polar Geospatial Center (PGC) at the University of Minnesota). Электронный ресурс: https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/ (дата обращения 01.03.2023).

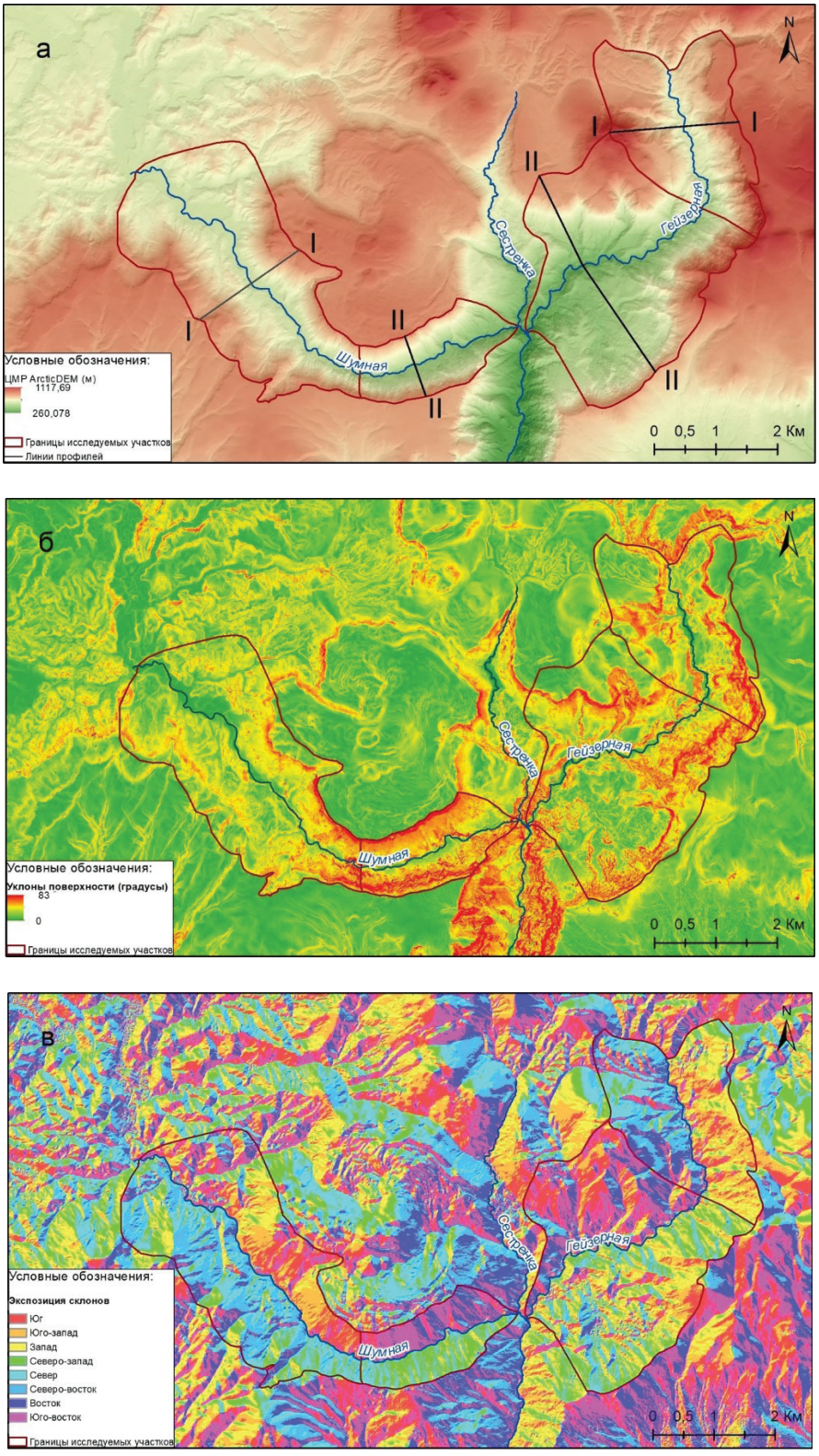


Рис. 3. Морфометрическая характеристика исследованных фрагментов долин рр. Гейзерной и Шумной. Карты (по ЦМР ArcticDEM): а — абсолютных отметок рельефа (м), б — уклонов, в — экспозиций склонов

Fig. 3. Morphometric characteristics of the studied fragments of the Geysernaya and Shumnaya Rivers valleys. Maps (by ArcticDEM): a — absolute elevations (m), b — slopes, c — slope exposures

На выбор фрагмента долины среднего течения р. Шумной в качестве аналога долины р. Гейзерной, но без газогидротермальных проявлений, повлияли несколько факторов. Во-первых, этот участок расположен в сходных природных условиях, что позволяет не принимать во внимание влияние на склоновые процессы, например, погодно-климатических условий. Во-вторых, абсолютные отметки днища и водоразделов, а также глубина вреза (рис. 3а, 4), крутизна склонов (рис. 3б), литологическое строение (выходы лав, пород дайкового комплекса и вулканогенно-озерных туфов) этих участков близки между собой (табл. 1). В-третьих, каждый из анализируемых фрагментов состоит из двух частей, ориентированных с СЗ на ЮВ и с ЮЗ на СВ, что позволяет сравнивать склоны одной экспозиции. В-четвертых, оба выбранных фрагмента долин расположены вдоль разлома, ограничивающего Узон-Гейзерную кальдеру (рис. 3в). В-пятых, оба анализируемых участка характеризуются значительным сходством растительного покрова, с выраженной высотной поясностью: на абс. отметках до 700 м встречаются высокотравье и парковые леса из каменной березы, выше доминируют ольховый и кедровый стланики, на высотах от 900–1000 м — горные тундры [*Сугробов* и др., 2009].

Табл. 1. Сравнительная характеристика морфометрии анализируемых фрагментов долин р. Гейзерной и Шумной
Table 1. Comparative description of the morphometry of the Geysernaya and Shumnaya Rivers valleys

Параметры	**Гейзерная**	**Шумная**
Протяженность водотока, км	7,6	9,6
Абс. отметки днища, м	385–700	390–650
Абс. отметки бортов долины, м	900–1100	900–950
Глубина вреза долины, м	250–550	300–500
Средняя крутизна склонов, °	20–23	19–32
Площадь участка долины, км^2	14,9	11,6

Участки различной экспозиции

Борт долины	Правый		Левый		Правый		Левый	
Экспозиция	СВ	ЮВ	СВ	ЮВ	СВ	СЗ	ЮЗ	ЮВ
Средняя крутизна склонов, град	20	23	23	23	19	31	20	32
Площадь, км^2	2,6	3,9	2,8	5,7	5,2	1,2	3,9	1,3
Наличие газогидротерм	нет	нет*	есть	есть	нет			

* Газогидротермальные проявления отмечены только в нижних частях склонов — до высоты 10–15 м над руслом.

Немаловажным фактором послужило и то, что рассматриваемая часть долины р. Шумной изображена на тех же снимках, по которым проводилось дешифрирование проявлений склоновых процессов в долине р. Гейзерной, что позволяет проводить сравнительную оценку двух долин на основе анализа одних и тех же исходных материалов. Следовательно, возможно максимально корректное сравнение между собой участков склонов с наличием газогидротермальных проявлений и без таковых с исключением влияния иных факторов.

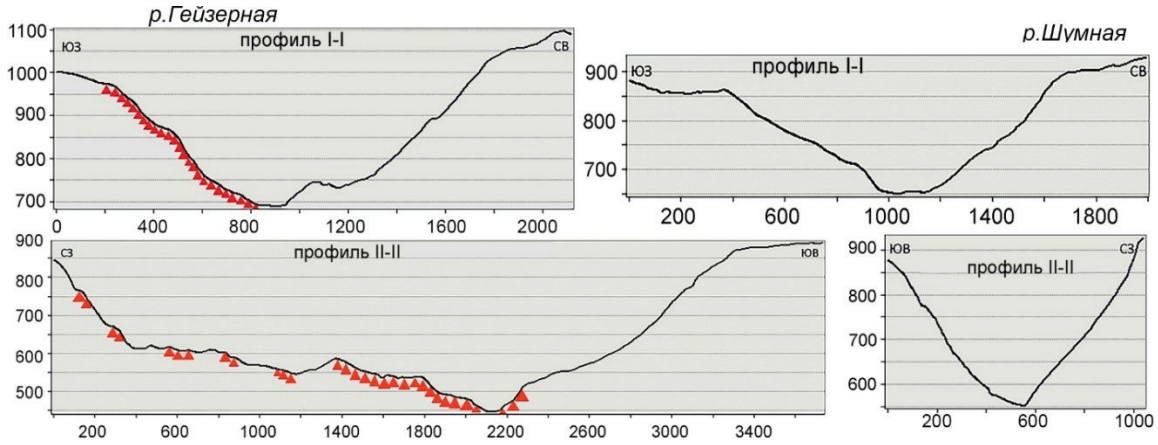


Рис. 4. Поперечные профили долин в верхнем и нижнем течении рр. Гейзерной и Шумной (положение профилей указано на рис. 3а). Красными треугольниками выделены участки газогидротермальных проявлений в долине р. Гейзерной: профиль I-I — Верхнегейзерное и II-II — Гейзерное термальные поля

Fig. 4. Crosscut profiles of the valleys in the upper and lower reaches Geysernaya and Shumnaya Rivers (the position of the profiles is shown in fig. 3a). Red triangles mark the sites of gas-hydrothermal occurrences in the valley of the Geysernaya River: profile I-I — Upper Geysernoye and II-II — Geysernoye thermal fields

При дешифрировании проявлений склоновых процессов в долине р. Шумной были частично использованы те же высококачественные снимки сверхвысокого пространственного разрешения (GeoEye, Pleiades-1A/1B, World-View-2 2009–2017 гг.), подробно охарактеризованные в [*Балдина* и др., 2022]. Однако большинство из них захватывают лишь самую нижнюю часть долины р. Шумной. С учетом задачи сравнения наиболее полезными являются материалы съемок, охватывающие одновременно обе долины. К их числу относятся как архивные снимки со спутника KeyHole-4 CORONA 1964 и 1967 гг., так и характеризующие современный период снимки с российского спутника Ресурс-П2 (аппаратура Геотон-Л1) 2015 и 2016 гг. Эти снимки представлены в многозональном (пространственное разрешение ~1,7 м) и панхроматическом (~0,5 м) вариантах. Однако и архивные, и современные (2015 и 2016 гг.) данные на обе долины представлены без ортотрансформирования, т. е. содержат значительные искажения, обусловленные горным рельефом. Это обстоятельство затрудняет их использование для получения точно сравнимых количественных параметров и очертаний контуров двух долин, поскольку дешифрирование склоновых процессов в долине р. Гейзерной проводилось по снимкам высокой детальности и геометрических качеств. Доступное в онлайн-режиме высокодетальное покрытие ESRI World Imagery[1] охватывает обе долины съемкой от 4 октября 2020 г. Его существенным недостатком является значительная затененность бортов долин северо-западной экспозиции из-за низкого положения Солнца при съемке.

Нижняя часть правого борта долины р. Шумной недостаточно освещена практически на всех как на архивных, так и на современных снимках. Для получения современной картины распространения участков активизации склоновых процессов на северных склонах долины р. Шумной были привлечены все доступные материалы последних лет (с 2015 по 2021 г.), включая некоторые из снимков со спутников CubeSat американской компании Planet Labs: 22 августа 2016 г. и 3 августа 2021 г. Эти снимки

[1] Базовая подложка компании ESRI для программы ArcGIS. Электронный ресурс: https://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9 (дата обращения 01.03.2023).

относительно невысокого качества по яркостным характеристикам, их пространственное разрешение недостаточно высоко (~5 м), но они ортотрансформированы и передают правильные очертания контуров в плане. Кроме того, этот участок был изучен во время аэровизуальных наблюдений и беспилотных съемок 2020–2022 гг.

Предварительное сравнение двух долин, изобразившихся на каждом из двух панхроматических снимков, разделенных 55-летним интервалом времени, позволяет уверенно утверждать, что число участков без растительности (яркий светлый тон) в долине р. Гейзерной значительно больше, чем в долине р. Шумной как на снимке 1964 г., так и на современном. При этом приходится учитывать, что на панхроматических (черно-белых) снимках обнажения более темноцветных пород могут слабо отличаться от тона растительного покрова, а нерастаявшие снежники (наличие которых нельзя исключить на снимке 1964 г.) практически не отличаются от обнажений пород светлых оттенков.

Для панхроматических снимков со спутника KeyHole-4 CORONA характерна достаточно высокая яркость изображения как участков, лишенных растительного покрова, так и участков с низкорослой травянистой или разреженной растительностью, поэтому их уверенное разделение в некоторых местах возможно только с опорой на доступные современные цветные снимки (рис. 5). Однако при этом нельзя отрицать вероятное частичное зарастание обнажений 1960-х гг. к 2020 г.

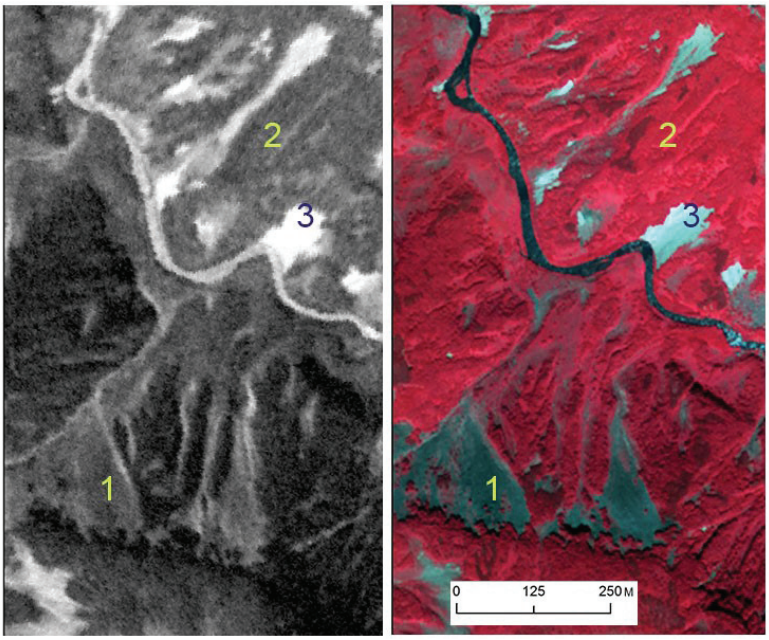


Рис. 5. Изображение склонов разной экспозиции и освещенности на участке долины р. Шумной на снимке 1964 г. (слева) и 2016 г. (справа): 1 — темноцветные (лавы и пирокластика) осыпи, 2 — травянистый растительный покров, 3 — стенки светлоцветных (вулканогенно-озерных) пород

Fig. 5. Image of slopes of different exposures (and illumination) in the Shumnaya River valley in the 1964 (left) and 2016 (right) images: 1 — dark-colored (lava and pyroclastic) talus, 2 — herbaceous vegetation cover, 3 — walls of light-colored (volcanogenic-lake) rocks

Для детального дешифрирования участков развития склоновых процессов и последующих количественных определений были использованы все доступные снимки, в т. ч. при разных вариантах цветового синтеза многозональных (для современного этапа), а

также цифровая обработка изображений (для обоих временных срезов) для обеих долин. Для количественных определений параметров долин результаты дешифрирования были сведены в единый проект, выполнено визуальное контурное дешифрирование обнаженных участков в пределах морфометрически обоснованных границ.

Подход, примененный нами ранее [*Лебедева* и др., 2022] при исследовании долины р. Гейзерной, опирающийся на подтвержденный полевыми наблюдениями способ оценки активности проявления экзогенных процессов в горном районе путем выявления и прослеживания изменений во времени и по площади по снимкам очертаний участков, лишенных растительного покрова, был применен и при анализе состояния склонов долины р. Шумной.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Существенно различающееся качество снимков разных периодов не позволяет выявить достаточно точное соотношение площади участков развития склоновых процессов на левом и правом бортах долины р. Шумной (из-за затененности большей части правого борта на многих снимках), однако визуальное сравнение одинаково освещенных участков правого склона долины показывает их почти неизменное состояние в 1960-е и в 2020 гг. Для более равномерно освещенных участков левого и правого бортов можно отметить в целом практически неизменное общее число и состояние участков без растительного покрова для обоих периодов. При этом в более поздний срок можно наблюдать несколько большее покрытие прежде обнаженных участков растительным покровом.

Для обследованного по разновременным снимкам участка долины р. Шумной площадью 11.6 км^2 выявляемые различия в площади участков, затронутых современными процессами, находятся в пределах точности, обеспечиваемой доступными снимками. Общая площадь обнаженных в разной степени участков на рассматриваемой территории на середину 1960-х составляла 0,73 км^2, т. е. 6,3 %, а на 2016–2021 гг. она лишь незначительно сократилась до 0,68 км^2, что составляет 5,8 % площади всего участка, причем эта разница может быть обусловлена разным качеством использованных снимков. Наиболее корректно изменение площади участков активизации за ~55 лет можно проследить на левом борту долины р. Шумной: в середине 1960-х они занимали там 8,0 %, а в 2016–20 гг. — 7,1 %.

Доля обнаженных участков от площади рассматриваемых территорий на 2020 г. показана на рисунке 6. Хорошо видно, что она максимальна на левобережье р. Гейзерной, к которому приурочены Верхнегейзерное и Гейзерное термальные поля. Здесь доля обнаженных участков превышает 30 % (нижнее течение) и даже 40 % (верхнее течение). На правобережье реки — составляет от 10 до 20 %. Необходимо отметить, что на правобережье Гейзерной газогидротермальные проявления и термоземы отмечены в нижних частях склонов до высоты 10–15 м над урезом реки, причем преимущественно в ее нижнем течении (на участке Гейзерного термального поля), где глубина вреза долины максимальна. На фоновых участках в долине р. Шумной на правобережье доля обнаженных участков практически не превышает 5 %, а на левобережье, где больше площадь выходов слабоустойчивых вулканогенно-озерных туфов, составляет 5–10 %. Стоит отметить, что активность склоновых процессов (доля обнаженных участков) практически не обнаруживает однозначной связи ни с экспозициями, ни с крутизной склонов в этих двух долинах.

Сравнительную степень изменений в двух долинах за 55-летний период демонстрируют данные, приведенные в таблице 2. По долине р. Шумной и на верхнем по течению участке правого борта СВ экспозиции долины р. Гейзерной величина изменений доли участков активизации за последние 55 лет находится в пределах погрешности дешифрирования.

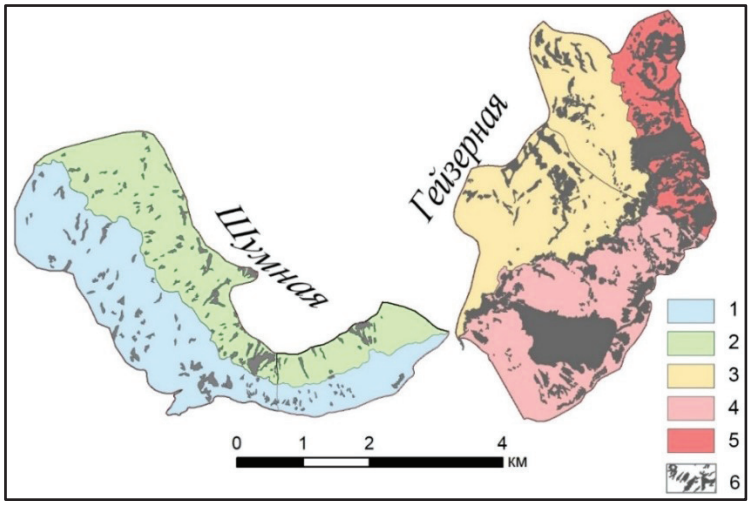


Рис. 6. Схемы дешифрирования участков, затронутых активными процессами (без растительности), в долинах рр. Гейзерная и Шумная на 2020 г., и оценка доли их суммарной площади на склонах разной экспозиции. Шкала значения долей (в %): 1 — до 5; 2 — 5–10; 3 — 10–20; 4 — 30–40; 5 — более 40; 6 — участки без растительного покрова

Fig. 6. Results of image interpretation of areas affected by active processes (without vegetation) in the Geysernaya and Shumnaya river valleys for 2020 and assessment of the proportion of their total area on slopes of different exposures. Scale of the shares value (in %): 1 — up to 5; 2 — 5–10; 3 — 10–20; 4 — 30–40; 5 — over 40; 6 — areas without vegetation

По левому борту долины р. Гейзерной в пределах Верхнегейзерного и Гейзерного термальных полей наблюдается активный прирост доли площадей участков активизации склоновых и эрозионных процессов — от 10,9 до 17 %. Небольшой прирост в 5,6 % отмечен на нижнем по течению участке правого борта долины, где газогидротермальные проявления Гейзерного термального поля отмечены в нижних частях придолинных склонов.

Табл. 2. Изменение доли участков активизации склоновых процессов в долинах рр. Шумной и Гейзерной за последние 55 лет (1964–2020 гг.)

Table 2. Changes in the proportion of slope activation sitesin the Shumnaya and Geysernaya Rivers valleys over the past 55 years (1964–2020)

Параметры	**Шумная**				**Гейзерная**			
Участки различной экспозиции								
Борт долины	Правый		Левый		Правый		Левый	
Экспозиция	СВ	СЗ	ЮЗ	ЮВ	СВ	ЮВ	ЮЗ	СЗ
Доля участков активизации, %								
1960-е гг.	5,3	3,0	8,8	5,5	8,7	11,2	**33,5**	**16,4**
2016–2020 гг.	5,0	3,5	7,6	5,6	14,2	11,6	**44,3**	**33,4**
Динамика изменений, %	−0,3	+0,3	−1,2	+0,1	+5,6	+0,4	**+10,9**	**+17,0**
Наличие газогидротерм	нет				нет*	нет	**есть**	**есть**
Общее изменение доли площади участков активизации процессов, %	Сокращение — от 6,3 до 5,8				Увеличение — от 16,8 до 26,4			

* Газогидротермальные проявления отмечены только в нижних частях склонов — до высоты 10–15 м над руслом.

Выявленная динамика склоновых процессов хорошо подтверждается наблюдениями и расчетами других специалистов: установлено, что только за последние 40 лет в результате гравитационных процессов с левого борта долины р. Гейзерной смещено в ее днище не менее 24 млн м^3 пород [*Пинегина* и др., 2008; *Двигало*, *Мелекесцев*, 2009; *Шевченко* и др., 2018; *Лебедева* и др., 2020]. Данные закономерности сказываются и на характере поперечного профиля через долину реки в ее нижнем течении (профиль II-II рис. 4): максимальное расширение долины р. Гейзерной и максимальное выполаживание ее борта наблюдается на участке Гейзерного термального поля, где на протяжении по крайней мере второй половины голоцена происходили масштабные смещения материала на склоне, о чем свидетельствуют не только результаты дешифрирования древних оползневых тел [*Двигало*, *Мелекесцев*, 2009], но и находка погребенной почвы в основании детрузивного вала, продатированной серединой голоцена [*Белоусов*, *Белоусова*, 2017].

ВЫВОДЫ

Выбор территорий для сравнительного анализа в соседних долинах — в сходных физико-географических условиях — позволил максимально корректно сравнивать между собой участки склонов с наличием газогидротермальных проявлений и без таковых с исключением влияния иных факторов — литологии, трещиноватости пород, экспозиции и др. Максимально приближены по данным параметрам склоны СЗ экспозиции на левобережье р. Гейзерной с развитием газогидротерм и на правобережье р. Шумной без таковых. Корректность сравнения обеспечена также единством используемых космических снимков: начальный период исследования задан одним и тем же снимком со спутника KeyHole-4 CORONA, а наиболее современный — высокодетальным покрытием ESRI World Imagery, в качестве вспомогательных использовались материалы, полностью или частично охватывающие обе долины. Использование ЦМР ArcticDEM обеспечило сравнимость морфометрических характеристик обеих долин и, в частности, позволило выявить незначительность влияния на активность процессов экспозиций и крутизны склонов. Проведенное исследование позволяет заключить, что в условиях развития газогидротермальных проявлений площадь участков склонов, пораженных активными процессами, в 2–3 р. превышает таковую на участках без газогидротерм.

БЛАГОДАРНОСТИ

Методики разработаны в рамках ГЗ географического факультета МГУ (121051400061-9) и ГЗ ИГ РАН (FMGE-2019-0005). Анализ материалов, дешифрирование снимков и полевые исследования осуществлены при поддержке гранта РНФ № 21-17-00216.

ACKNOWLEDGEMENTS

The methodology was developed in the framework of the Geography Faculty of Moscow State University State Assignment (121051400061-9), and the analysis of materials was carried out in the framework of the Institute of Geography of RAS State Assignment (FMGE-2019-0005). Image interpretation and field studies were supported by Grant No. 21-17-00216 of the Russian Science Foundation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас долины реки Гейзерной в Кроноцком заповеднике. М.: Красанд, 2015. 88 с.

Балдина Е.А., Лебедева Е.В., Медведев А.А. Методика дешифрирования архивных и современных космических снимков для изучения динамики склоновых процессов в долине р. Гейзерная (Камчатка). ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение

устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 266–283. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-266-283.

Белоусов А.Б., Белоусова М. Роль оползней в формировании гейзеров Долины Гейзеров, Камчатка. Материалы конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС, 2017. С. 155–157.

Бортникова С.Б., Бессонова Е.П., Гора М.П., Шевко А.Я., Панин Г.Л., Жарков Р.В., Ельцов И.Н., Котенко Т.А., Бортникова С.П., Маништейн Ю.А., Котенко Л.В., Козлов Д.Н., Абросимова Н.А., Карин Ю.Г., Поспеева Е.В., Казанский А.Ю. Газогидротермы активных вулканов Камчатки и Курильских островов: состав, строение, генезис. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. 280 с.

Двигало В.Н., Мелекесцев И.В. Геолого-геоморфологические последствия катастрофических обвальных и обвально-оползневых процессов в Камчатской Долине Гейзеров (по данным аэрофотограмметрии). Вулканология и сейсмология, 2009. № 5. С. 24–37.

Зеркаль О.В., Гвоздева И.П., Фролова Ю.В. Развитие оползневых процессов в долине р. Гейзерной. Геодинамические процессы и природные катастрофы: Тезисы докладов III Всероссийской научной конференции с международным участием. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2019. С. 138.

Лебедева Е. В., Балдина Е. А., Медведев А. А. Склоновые процессы в долине р. Гейзерной (Камчатка): результаты дешифрирования разновременных космических снимков высокого пространственного разрешения. Геоморфология, 2022. Т. 53. № 4. С. 3–16. DOI: 10.31857/S0435428122040095.

Лебедева Е.В., Сугробов В.М., Чижова В.П., Завадская А.В. Долина р. Гейзерной (Камчатка): гидротермальная деятельность и особенности рельефообразования. Геоморфология, 2020. № 2. С. 60–73. DOI: 10.31857/S0435428120020066.

Леонов В.Л., Гриб Е.Н., Карпов Г.А., Сугробов В.М., Сугробова Н.Г., Зубин М.И. Кальдера Узон и Долина Гейзеров. Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. II. С. 94–141.

Пинегина Т.К., Делемень И.Ф., Дрознин В.А., Калачева Е.Г., Чирков С.А., Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Леонов В.Л., Селиверстов Н.И. Камчатская Долина гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. Вестник ДВО РАН, 2008. № 1. С. 33–44.

Рычагов С.Н. Гидротермальная система вулкана Баранского (о. Итуруп): модель геологической структуры. Вулканология и сейсмология, 1993. № 2. С. 59–75.

Сугробов В.М., Сугробова Н.Г., Дрознин В.А., Карпов Г.А., Леонов В.Л. Жемчужина Камчатки — Долина Гейзеров. Научно-популярный очерк, путеводитель. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2009. 108 с.

Фролова Ю.В., Ладыгин В.М., Рычагов С.Н. Инженерно-геологические особенности гидротермально-метасоматических пород Камчатки и Курильских островов. Инженерная геология, 2011. № 3. С. 40–54.

Фролова Ю.В., Гвоздева И.П., Чернов М.С., Кузнецов Н.П. Инженерно-геологические аспекты гидротермальных преобразований туфогенных пород Долины гейзеров (полуостров Камчатка). Инженерная геология, 2015. № 6. С. 30–42.

Фролова Ю.В., Зеркаль О.В., Гвоздева И.П. Влияние гидротермальных преобразований на физико-механические свойства туфогенных пород Долины гейзеров и их роль в формировании оползней. Геодинамические процессы и природные катастрофы: Тезисы

докладов III Всероссийской научной конференции с международным участием. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2019. С. 186.

Шевченко А.В., Двигало В.Н., Свирид И.Ю. Дистанционные исследования геоморфологических процессов на вулканических объектах Камчатки. XXXVI Пленум ГК РАН: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Геоморфология — наука XXI века». Барнаул: Издательство АГУ, 2018. С. 403–410.

Kiryukhin A.V., Rychkova T.V., Dubrovskaya I.K. Formation of the hydrothermal system in Geysers Valley (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka) and triggers of the Giant Landslide. Applied Geochemistry, 2012. V. 27. P. 1753–1766. DOI:10.1016/j.apgeochem.2012.02.011

Lebedeva E.V., Baldina E.A., Medvedev A.A. Dynamics of slope processes in the Geysernaya river valley (Kamchatka) according to the data of interpretation of multi-temporal space images. Doklady Earth Sciences, 2022. V. 507. P. S9–S18. DOI: 10.1134/S1028334X22601262.

REFERENCES

Atlas of the Geyser River Valley in the Kronotsky Nature Reserve. Moscow: Krasand, 2015. 88 p. (in Russian).

Baldina E.A., Lebedeva E.V., Medvedev A.A. Methodology of interpretation of archival and modern satellite imagery to study the dynamics of slope processes in the Geyzernaya River valley (Kamchatka). InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2022. V. 28. № 1. P. 266–283 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-266-283.

Belousov A.B., Belousova M. The role of landslides in the formation of geysers in the Valley of Geysers, Kamchatka. Proceedings of the conference “Volcanism and related processes”. Petropavlovsk-Kamchatsky: IV&S, 2017. P. 155–157 (in Russian).

Bortnikova S.B., Bessonova E.P., Gora M.P., Shevko A.Y., Panin G.L., Zharkov R.V., Yeltsov I.N., Kotenko T.A., Bortnikova S.P., Manshtein Yu.A., Kotenko L.V., Kozlov D.N., Abrosimova N.A., Karin Yu.G., Pospeeva E.V., Kazansky A.Yu. Gas-hydrotherms of active volcanoes of Kamchatka and the Kuril Islands: composition, structure, genesis. Novosibirsk: IPGG SB RAS, 2013. 280 p. (in Russian).

Dvigalo V.N., Melekestsev I.V. Geological and geomorphological consequences of catastrophic landslide and landslide processes in the Kamchatka Valley of Geysers (from aerial photogrammetry data). Volcanology and Seismology, 2009. № 5. P. 24–37 (in Russian).

Frolova Y.V., Gvozdeva I.P., Chernov M.S., Kuznetsov N.P. Engineering-geological aspects of hydrothermal transformations of tuffogenic rocks of the Valley of Geysers (Kamchatka Peninsula). Engineering Geology, 2015. № 6. P. 30–42 (in Russian).

Frolova Y.V., Zerkal O.V., Gvozdeva I.P. Effect of hydrothermal transformations on physical and mechanical properties of tuffogenic rocks of the Valley of Geysers and their role in landslide formation. Geodynamic processes and natural disasters: Abstracts of III All-Russian scientific conference with international participation. Yuzhno-Sakhalinsk: IMG&G FEB RAS, 2019. P. 186 (in Russian).

Frolova Yu.V., Ladygin V.M., Rychagov S.N. Engineering-geological features of hydrothermal-metasomatic rocks of Kamchatka and the Kuril Islands. Engineering Geology, 2011. № 3. P. 40–54 (in Russian).

Kiryukhin A.V., Rychkova T.V., Dubrovskaya I.K. Formation of the hydrothermal system in Geysers Valley (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka) and triggers of the Giant Landslide. Applied Geochemistry, 2012. V. 27. P. 1753–1766. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2012.02.011.

Lebedeva E. V., Baldina E. A., Medvedev A. A. Slope processes in the Geysernaya River valley (Kamchatka): Results of interpretation of multi-temporal high spatial resolution satellite imagery. Geomorphology, 2022. V. 53. № 4. P. 3–16 (in Russian) DOI: 10.31857/ S0435428122040095.

Lebedeva E.V., Baldina E.A., Medvedev A.A. Dynamics of slope processes in the Geysernaya river valley (Kamchatka) according to the data of interpretation of multi-temporal space images. Doklady Earth Sciences, 2022. V. 507. Suppl. 1. P. S9–S18. DOI: 10.1134/ S1028334X22601262.

Lebedeva E.V., Sugrobov V.M., Chizhova V.P., Zavadskaya A.V. Geysernaya River valley (Kamchatka): hydrothermal activity and features of relief formation. Geomorphology, 2020. No. 2. P. 60–73 (in Russian) DOI: 10.31857/S0435428120020066.

Leonov V.L., Grib E.N., Karpov G.A., Sugrobov V.M., Sugrobova N.G., Zubin M.I. Uzon Caldera and the Valley of Geysers. Active Volcanoes of Kamchatka. Moscow: Nauka, 1991. V. II. P. 94–141 (in Russian).

Pinegina T.K., Delemen I.F., Droznin V.A., Kalacheva E.G., Chirkov S.A., Melekestsev I.V., Dvigalo V.N., Leonov V.L., Seliverstov N.I. Kamchatka Geyser Valley after catastrophe on 3 June 2007. Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008. № 1. P. 33–44 (in Russian).

Rychagov S.N. Hydrothermal system of Baransky volcano (Iturup Island): Model of geological structure. Volcanology and Seismology, 1993. № 2. P. 59–75 (in Russian).

Shevchenko A.V., Dvigalo V.N., Svirid I.Yu. Remote studies of geomorphologic processes on volcanic objects of Kamchatka. XXXVI Plenum of the Geomorphological Commission of the Russian Academy of Sciences: All-Russian scientific-practical conference with international participation “Geomorphology — science of XXI century”. Barnaul: Publishing house of ASU, 2018. P. 403–410 (in Russian).

Sugrobov V.M., Sugrobova N.G., Droznin V.A., Karpov G.A., Leonov V.L. The Pearl of Kamchatka — the Valley of Geysers. Popular science essay, guidebook. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress, 2009. 108 p. (in Russian).

Zerkal O.V., Gvozdeva I.P., Frolova Y.V. Development of landslide processes in the Geysernaya river valley. Geodynamic processes and natural disasters: Abstracts of the III All-Russian scientific conference with international participation. Yuzhno-Sakhalinsk: IMG&G FEB RAS, 2019. P. 138 (in Russian).

УДК: 528.7(571.53)+504.05 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-288-303**

О.В. Лунина[1], **А.Н. Чикишева**[2], **А.В. Бочалгин**[3], **А.А. Гладков**[4]

ВЫЯВЛЕНИЕ СЛЕДОВ АНТРОПОГЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СОВЕТСКОГО ПЕРИОДА ПО ДАННЫМ АЭРОФОТОСЪЕМКИ В ДЕЛЬТАХ РЕК БУГУЛЬДЕЙКИ И ГОЛОУСТНОЙ (БАЙКАЛЬСКИЙ РЕГИОН)

АННОТАЦИЯ

В 2021 и 2022 гг. проведена беспилотная аэрофотосъемка дельт рр. Голоустной и Бугульдейки, расположенных на северо-западном побережье оз. Байкал. С помощью фотограмметрического метода, реализованного в программе «Agisoft Metashape», простроены ортофотопланы и цифровые модели местности (ЦММ) сверхвысокого разрешения. При дешифрировании полученных материалов обнаружены техногенные изменения земной поверхности, не связанные с освоением земель последних десятилетий. Привлечение исторических данных позволило идентифицировать следы антропогенной деятельности в дельтах рек, принадлежащие советскому периоду развития страны. В дельте р. Голоустной, которая на большей площади представляет собой незаселенную степь с островками реликтовых тополей, выявлены места расположения домов улусов Заречный и Подкаменный, существовавших с дореволюционного времени до 1958 г. Реконструированы границы этих поселений и сельскохозяйственных угодий, принадлежащих их жителям и коллективному хозяйству. В обеих дельтах на земной поверхности сохранились следы масштабных лесозаготовительных работ, уникальные фотографии которых впервые приводятся в настоящей работе. Выявлены места скопления затонувшего леса у берегов оз. Байкал и в некоторых руслах р. Голоустной. В практическом плане полученные данные могут быть использованы в исторических реконструкциях, например, при создании макетов обустройства дельт в советский период времени для региональных музеев в современных поселках и визит-центрах Прибайкальского национального парка. Результаты могут быть также полезны в экологических изысканиях, совмещенных с добычей древесины с целью очищения дна водоемов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: беспилотная аэрофотосъемка, картографирование, антропогенные объекты, дельта, Байкал

[1] Институт земной коры СО РАН, ул. Лермонтова, д. 128, Иркутск, Россия, 664033,
e-mail: **lounina@crust.irk.ru**

[2] Государственный архив Иркутской области, ул. Байкальская, д. 79, Иркутск, Россия, 664047,
e-mail: **cik-an@yandex.ru**

[3] Иркутский государственный университет, Географический факультет, ул. Лермонтова, д. 126, Иркутск, Россия, 664033,
e-mail: **1bochalgin@gmail.com**

[4] ГАУ ДО ИО «Центр развития дополнительного образования детей», ул. Красноказачья, д. 9, Иркутск, Россия, 664007,
e-mail: **anton90ne@rambler.ru**

Oksana V. Lunina[1], **Anna N. Chikisheva**[2], **Aleksey V. Bochalgin**[3], **Anton A. Gladkov**[4]

TRACES OF ANTHROPOGENIC ACTIVITY OF THE SOVIET-ERA BASED ON AERIAL PHOTOGRAPHY DATA IN THE DELTAS OF THE BUGULDEYKA AND GOLOUSTNAYA RIVERS (BAIKAL REGION)

ABSTRACT

In 2021 and 2022 unmanned aerial photography of the deltas of the Goloustnaya and Buguldeyka Rivers, located on the northwestern shore of Lake Baikal, were performed. Using the photogrammetric method implemented in the "Agisoft Metashape" software, ultra-high-resolution orthomosaics and digital surface models (DSM) were built. When deciphering the obtained materials, technogenic surface changes that are not associated with land development in recent decades were found. The involvement of historical data made it possible to identify traces of anthropogenic activity in the river deltas belonging to the Soviet-era of the country's development. In the Goloustnaya River delta, which is now almost uninhabited over a larger area, and represents a steppe with islands of relict poplars, the locations of the houses of the Zarechny and Podkamenny uluses, which existed from pre-revolutionary times until 1958, were revealed. The boundaries of these settlements and agricultural land belonging to their inhabitants and collective farms were reconstructed. In both deltas, traces of large-scale logging works, unique photographs of which are presented for the first time in this article, were preserved on the surface. Places of accumulation of sunken forests on the shores of Lake Baikal and in some channels of the Goloustnaya River were revealed. On practice, the obtained data can be used in historical reconstructions, for example, when creating models of the arrangement of deltas in the Soviet-era for regional museums in modern villages and visitor centers of the Pribaikalsky National Park. The results may also be useful in environmental surveys combined with timber extraction in order to clean the bottom of water bodies.

KEYWORDS: unmanned aerial photography, mapping, anthropogenic objects, delta, Baikal

ВВЕДЕНИЕ

Среди дистанционных методов зондирования в последние годы особую популярность завоевывает аэрофотосъемка (АФС) с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [*Tmuši'c* et al., 2020; *Calantropio* et al., 2021; *Cheng* et al., 2021; *Liu-Zeng* et al., 2022]. Дальнейшая фотограмметрическая обработка данных позволяет получать ортофотопланы и цифровые модели местности (ЦММ), которые дешифрируются для изучения строения земной поверхности. В наших исследованиях такие материалы используются для картографирования разрывных деформаций, которые могут быть выявлены в голоценовых отложениях конусов выноса [*Lunina, Gladkov,* 2022]. При этом, наряду с данными о нарушениях поверхности Земли, мы обнаруживаем различные интересные объекты и деформации, связанные с антропогенной деятельностью недавнего прошлого. Для специалистов, занимающихся решением проблем экологической устойчивости, социальных аспектов развития и оценки антропогенного воздействия на

1 Institute of the Earth's Crust SB RAS, 128, Lermontov str., Irkutsk, 664033, Irkutsk, Russia, *e-mail:* **lounina@crust.irk.ru**

2 State Archive of the Irkutsk region, 79, Baikalskaya str., Irkutsk, 664047, Russia, *e-mail:* **cik-an@yandex.ru**

3 Irkutsk State University, Faculty of Geography, 126, Lermontov str., Irkutsk, 664033, Russia, *e-mail:* **1bochalgin@gmail.com**

4 Center for the Development of Additional Education for Children of Irkutsk Region, 9, Krasnokazachya str., Irkutsk, 664007, Russia, *e-mail:* **anton90ne@rambler.ru**

окружающую среду, сведения о таких ландшафтных изменениях могут быть весьма полезными. Это побудило нас к проведению настоящего исследования, цель которого заключалась в выяснении природы дистанционно наблюдаемых деформаций почвы и остатков объектов деятельности советского периода в дельтах рр. Голоустной и Бугульдейки, расположенных на западном побережье оз. Байкал (рис. 1).

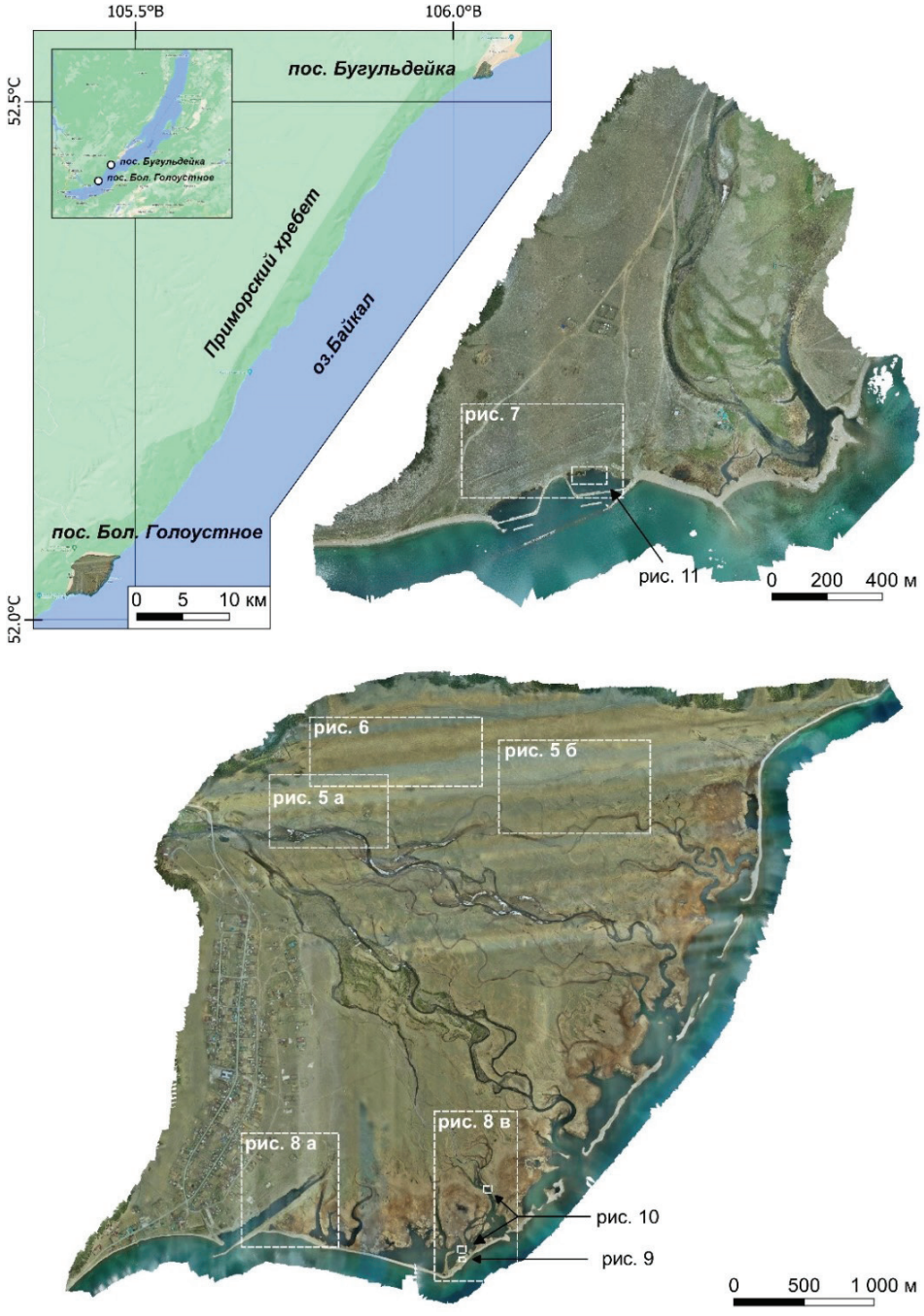


Рис. 1. Расположение дельт рр. Голоустной и Бугульдейки и их ортофотопланы по данным АФС в мае 2022 г.
Fig. 1. Location of the deltas of the Goloustnaya and Buguldeyka Rivers and their orthomosaics according to aerial photography of May 2022

Кроме того, эта работа представляется нам полезной с точки зрения развития экологического туризма и обустройства Прибайкальского национального парка. Находясь на его территории, сейчас уже трудно представить, что в некоторых местах, подобных устьям указанных рек, десятки лет назад велась активная народно-хозяйственная деятельность, следы которой в целом можно разглядеть только с высоты птичьего полета.

Объекты исследования и история их освоения

Дельты рр. Голоустной и Бугульдейки представляют собой аккумулятивные мысы, примыкающие к склонам Приморского хребта. Хозяйственное освоение этих территорий началось в XVII в. [*Кравченко* и др., 1997, с. 17]. В регионе расселялись как коренные народы, создавая поселения (улусы), так и русское население. Закладывались будущие поселки Бугульдейка и Большое Голоустное.

Одно из первых упоминаний о создании сельскохозяйственной артели «Ударная Бугульдейка» как способа коллективного ведения хозяйства относится к 1935 году[1]. В Большом Голоустном к 1936 г. было создано две артели — промыслово-охотоведческая «Красный Байкал» и промыслово-рыболовная «Красный Идегол», которые имели более 80 га пашенных и более 400 га покосных земель. Артели позднее были объединены в колхоз «Путь к коммунизму» [*Атутова*, 2018, с. 11].

Значительное развитие населенные пункты получили благодаря лесозаготовкам и лесосплаву (рис. 2–3). В мае 1959 г. в с. Бугульдейке начато строительство Бугульдейского леспромхоза комбината «Иркутсклес» с годовым объемом вывозки и сплотки древесины в объеме 250 тыс. м³. Целью было обеспечение сырьем Солзанского завода вискозной целлюлозы на оз. Байкал[2]. В 1949 г. на р. Голоустную переведен Большереченский леспромхоз. В 1987 г. на его базе было организовано комплексное лесохозяйственное предприятие «Байкал», ставшее в 1995 г. Голоустенским леспромхозом [*Атутова*, 2018, с. 11–12].

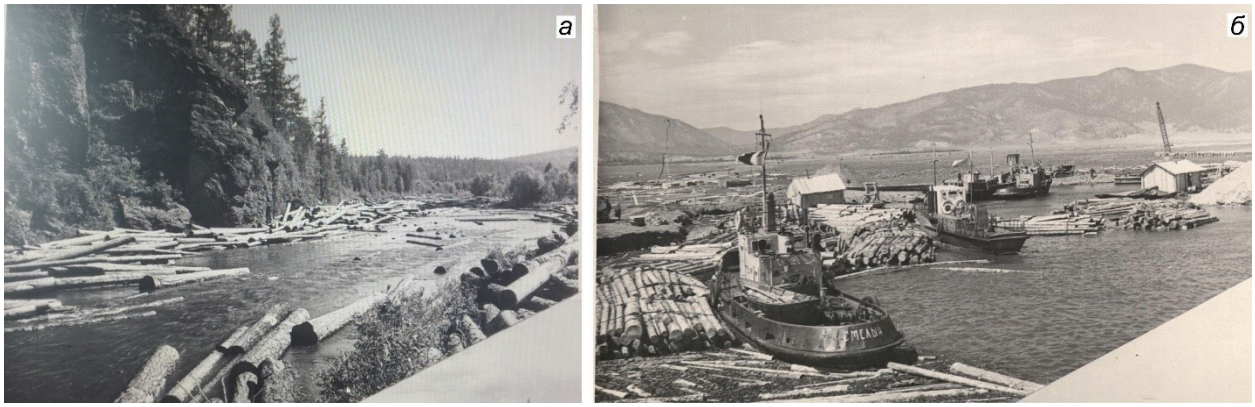


Рис. 2. Молевой сплав леса по р. Голоустной на 58 км³ (а) и катера на рейде в ожидании плотов недалеко от края ее дельты⁴ (б), фотографии 1958 г.
Fig. 2. Log drifting along the Goloustnaya River at 58 km³ (a) and boats in the roadstead waiting for rafts near the edge of its delta⁴ (b), photographs of 1958

1 ГАИО. Р-2916. Оп. 1. Д. 30. Л. 1.
2 ГАИО. Р-2725. Оп. 1. Д. 19. Л. 225.
3 ГАИО. Р-2746. Оп. 4. Д. 45. Л. 7.
4 ГАИО. Р-2746. Оп. 4. Д. 45. Л. 18 об.

Большереченский и Бугульдейский леспромхозы, входившие в производственное объединение «Иркутсклес», являлись одними из самых крупных в регионе. Планово они должны были сплавлять 400 тыс. м³ леса в год по Байкалу [*Федотова*, 1982]. Река Бугульдейка отличалась своим мелководьем, не позволявшим входить в ее устье большим судам. Сплав по реке был возможен «только при устройстве плотин, очищении и углублении русла реки и проведении гидромелиоративных работ»[1]. На р. Голоустной был устроен каскад плотин и дамб [*Кравченко* и др., 1997, с. 26], позволявших поднимать уровень воды и сплавлять вниз по течению спиленный лес. Подготовленный лес судами Восточно-Сибирского речного пароходства доставлялся на лесоперевалочную базу поселка Выдрино на восточном побережье оз. Байкал[2].

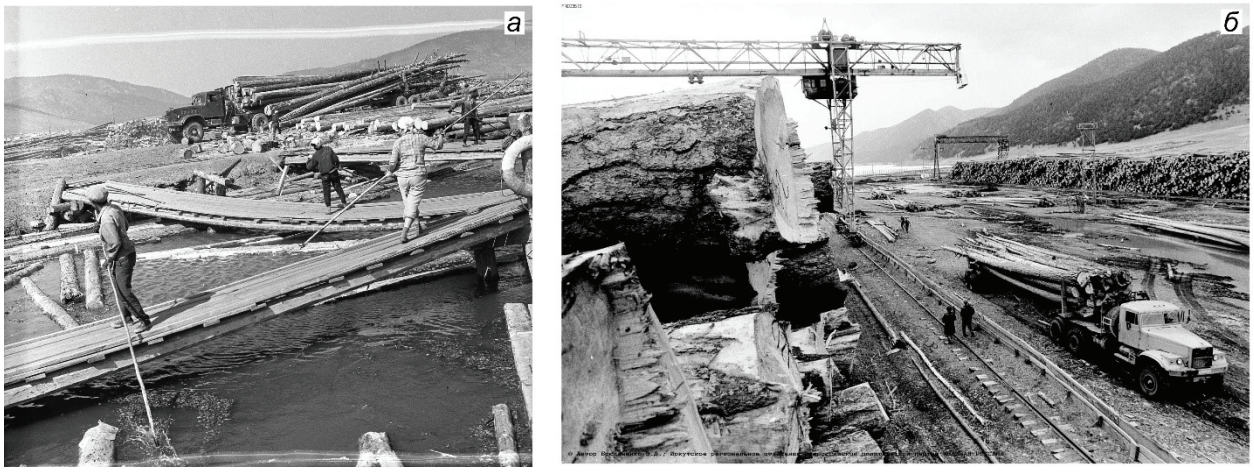


Рис. 3. Лесозаготовительные работы в дельте р. Голоустной[3] (а) и транспортировка леса с помощью козловых кранов у канала в пос. Б. Голоустное[4] (б)
Fig. 3. Logging work in the delta of the Goloustnaya River (a) and transportation of timber using gantry cranes near the canal in the village of B. Goloustnoe (b)

Решением исполнительного комитета Иркутского областного Совета депутатов трудящихся № 377 от 15 июля 1969 г. рр. Голоустная и Бугульдейка были внесены в перечень рек Иркутской области, являющихся местами нереста лососевых и осетровых рыб. Водоохранная лесная полоса по обеим берегам была определена в 1 км[5].

Постановлением ЦК КПСС и Совета министров СССР от 13 апреля 1987 г. № 434 Большереченский и Бугульдейский леспромхозы были переданы из ведения Министерства лесной, целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности СССР в ведение Государственного комитета СССР по лесному хозяйству. На их базе должны были быть созданы «комплексные лесные предприятия по охране, воспроизводству и рациональному использованию лесов» для проведения санитарных рубок, рубок ухода за лесом, обеспечения противопожарной охраны лесов и выполнения других мероприятий по их охране и воспроизводству[6].

---

1 ГАИО. Р-1843. Оп. 1. Д. 398. Л. 19, 47.
2 Федотова Г. Указ. соч. С. 3.
3 Лесхоз Байкал. Фото Э.Д. Брюханенко. 1990. ИОГУНБ. FN003481. Электронный ресурс: https://i.irklib.ru (дата обращения 14.02.2023).
4 Лесхоз Байкал. Фото Э. Д. Брюханенко. 1982. ИОГУНБ. FN003513. Электронный ресурс: https://i.irklib.ru (дата обращения 14.02.2023).
5 ГАИО. Р-1933. Оп 7ОЦ. Д. 1381. Л. 26–34.
6 Постановление ЦК КПСС и СМ СССР от 13 апреля 1987 г. № 434. НСБ ГАИО. № 27163. С. 8.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

АФС над дельтой р. Бугульдейки проведена 23 мая 2022 г., над дельтой р. Голоустной — 14–15 мая 2021 г. и 17–19 мая 2022 г. В результате для первого участка было получено 2027 фотографий, для второго — 10 744 в 2021 г. и 11 124 в 2022 г. В качестве оборудования использовался квадрокоптер DJI Phantom 4 RTK в комплекте с базовой станцией DJI D-RTK 2. В указанную модель дрона встроен модуль RTK (RealTime Kinematic), который обеспечивает получение данных позиционирования в режиме реального времени с точностью до сантиметра и с минимальной абсолютной погрешностью метаданных изображения. Под приемником RTK расположен модуль спутниковых систем позиционирования, обеспечивающий стабильность полета в местности со слабым сигналом. Совмещение этих двух модулей Phantom 4 RTK способствует оптимизации безопасности полета и получению точных данных для геодезии и прикладных задач картографирования.

Полная площадная съемка производилась в автоматическом режиме. Для этого полетные задания разрабатывались заранее в специализированном приложении «DJI GS RTK Pro». При анализе необходимой точности и пространственного разрешения получаемых результатов, а также с учетом времени, которое было необходимо затратить на проведение работ, нами были выбраны следующие параметры АФС: высота полета коптера — от 110 до 120 м (в зависимости от сложности форм рельефа), максимальная скорость полета — 8,7 м/с, продольное перекрытие между снимками — 80 %, поперечное перекрытие — 70 %. Полетные задания выполнялись в режиме «2D Photogrammetry» (полет по профилям с одинаковым расстоянием между ними и заданным перекрытием) с дополнительным профилем для коррекции высоты (полет из конечной точки задания в центр со съемкой под углом 45°). При выполнении всех полетных заданий, вне зависимости от размера снимаемой площади и линейных размеров участков исследования, базовая станция D-RTK2 в 2022 г. устанавливалась на единственную точку вблизи центра снимаемой площади с фиксацией ее координат, высоты инструмента и установкой маркера на местности. Участки с резкими изменениями форм рельефа и большими перепадами высот снимались в ручном режиме с изменением параметров съемки (высота и скорость) в зависимости от конкретных условий местности.

Для фотограмметрической обработки использовалось программное обеспечение «Agisoft Metashape», где в несколько этапов производились следующие действия[1]:

1) загрузка фотографий;
2) выравнивание фотографий;
3) оптимизация выравнивания;
4) построение плотного облака точек;
5) создание карты высот (цифровой модели местности);
6) создание ортофотоплана;
7) экспорт полученных результатов.

Полученные результаты экспортировались в форматы GeoTIFF и *.jpeg. В связи с тем, что итоговые цифровые модели местности/рельефа и ортофотопланы занимают очень большие объемы памяти и могут быть получены только на очень производительных вычислительных машинах, экспорт итоговых файлов производился в режиме создания отдельных тайлов.

[1] Руководство пользователя Agisoft Metashape: Standard Edition, версия 1.7. Электронный ресурс: https://www. agisoft.com/pdf/metashape_1_7_ru.pdf (дата обращения 10.02.2023).

Для выявления следов антропогенной деятельности применялся визуальный метод дешифрирования материалов [*Богомолов*, 1976; *Chandra, Ghosh,* 2006] в геоинформационных системах «Global Mapper» и «QGIS».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По данным беспилотной АФС впервые были построены ортофотопланы и ЦММ дельт рр. Голоустной и Бугульдейки (рис. 1). Эти материалы представляют собой уникальные основы для детального анализа земной поверхности с целью получения новых знаний об основных закономерностях строения и развития окружающей среды, в т. ч. под влиянием деятельности человека. Площадь съемки дельты р. Голоустной охватывает 15,7 км^2; пространственное разрешение полученных материалов — от 2,96 до 3,02 см/пикс. Итоговый ортофотоплан для конуса выноса р. Бугульдейки имеет площадь 1,977 км^2, пространственное разрешение — 2,98 см/пикс. Точность итоговых материалов оценивается автоматически в программе «Agisoft Metashape». Небольшие различия в пространственном разрешении дельты р. Голоустной связаны с участками, для которых съемка выполнялась вручную и точное соблюдение одинаковых параметров не представляется возможным.

Следы поселений и сельскохозяйственной деятельности

Следы ранних поселений и сельскохозяйственной деятельности прошлого века отчетливо наблюдаются на материалах АФС дельты р. Голоустной (рис. 4). Современный пос. Большое Голоустное расположен в ее юго-западной части. Остальная территория не заселена и визуально представляет собой местность с водно-болотными угодьями, дельтово-лугово-степной и дельтово-степной растительностью [*Макаров* и др., 2019]. Исключение составляют турбаза и небольшое фермерское хозяйство с левой стороны реки.

При дешифрировании ортофотоплана и ЦММ в северной части дельты р. Голоустной, на левобережье крайней с севера пересыхающей временами протоки, были обнаружены многочисленные округлые углубления глубиной от 0,2 до 1,35 м и диаметром от 2,1 до 9,8 м, группирующиеся на поверхности в два скопления (рис. 4, 5). Одно из них имеет протяженность ~1 км, второе ~700 м. При внимательном рассмотрении выяснилось, что некоторые углубления содержат остатки бревен старых домов и современный мусор. Наземные наблюдения подтвердили наши предположения, что данные выемки представляют собой следы фундаментов и подпольев домов (рис. 5 д). Таким образом, с северной стороны дельты между склонами Приморского хребта и левобережьем крайней северной протоки были расположены населенные пункты, которые при объединении не уступали бы по площади современному пос. Большому Голоустному. В действительности обнаруженные скопления выемок оказались улусами Заречным и Подкаменным, которые показаны на листе 2-В атласа оз. Байкал 1908 г. [*Дриженко*, 1908]. По сведениям [*Кравченко* и др., 1997, с. 17] улусы были образованы первыми современными поселенцами — бурятами, которые в 80-х гг. XVII откочевали на берег оз. Байкал.

Севернее предполагаемых деревень и на правом берегу р. Голоустной обнаружены следы возможных пашенных и покосных земель (рис. 4, 6). По крайней мере, они были названы «следами распашки» в работе [*Макаров* и др., 2019]. Сельскохозяйственные угодья общей площадью 129 га, 114 га из которых на севере дельты, довольно хаотично примыкают друг к другу и по рисунку борозд представлены двумя типами. В первом ширина борозд 0,3–0,4 м, что не вызывает сомнения в идентификации огородов. Их длина — 80–150 м, ширина — 60–100 м. Во втором — протяженные валы шириной 6–12 м чередуются с линейными понижениями шириной 5–6 м и глубиной в среднем 0,3–0,4 м. Размеры таких участков в среднем 60 × 80 м.

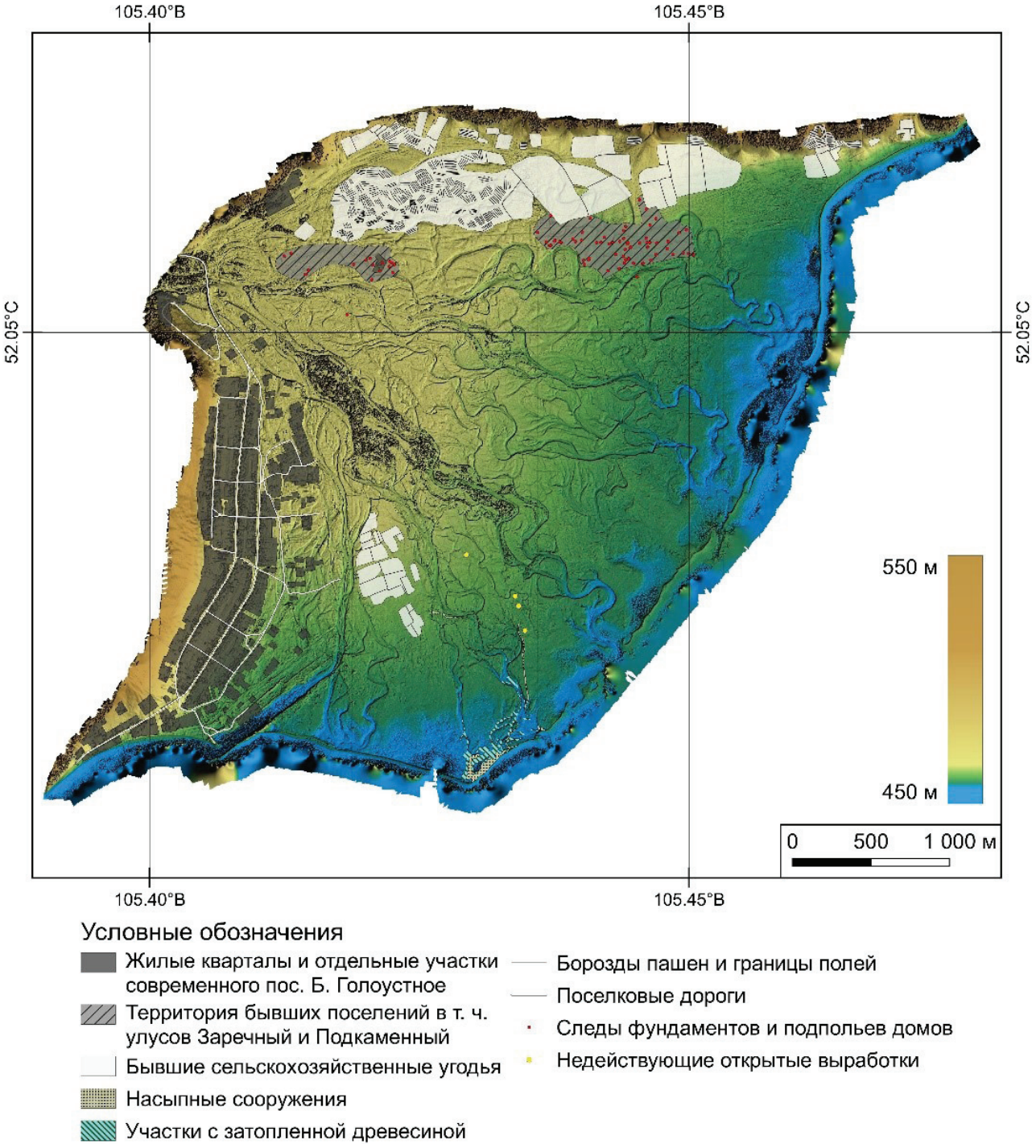


Рис. 4. ЦММ дельты р. Голоустной со следами антропогенной деятельности советского периода по данным съемки мая 2022 г.
Fig. 4. DSM of Goloustnaya River delta with traces of anthropogenic activity of Soviet-era according to aerial photography of May 2022

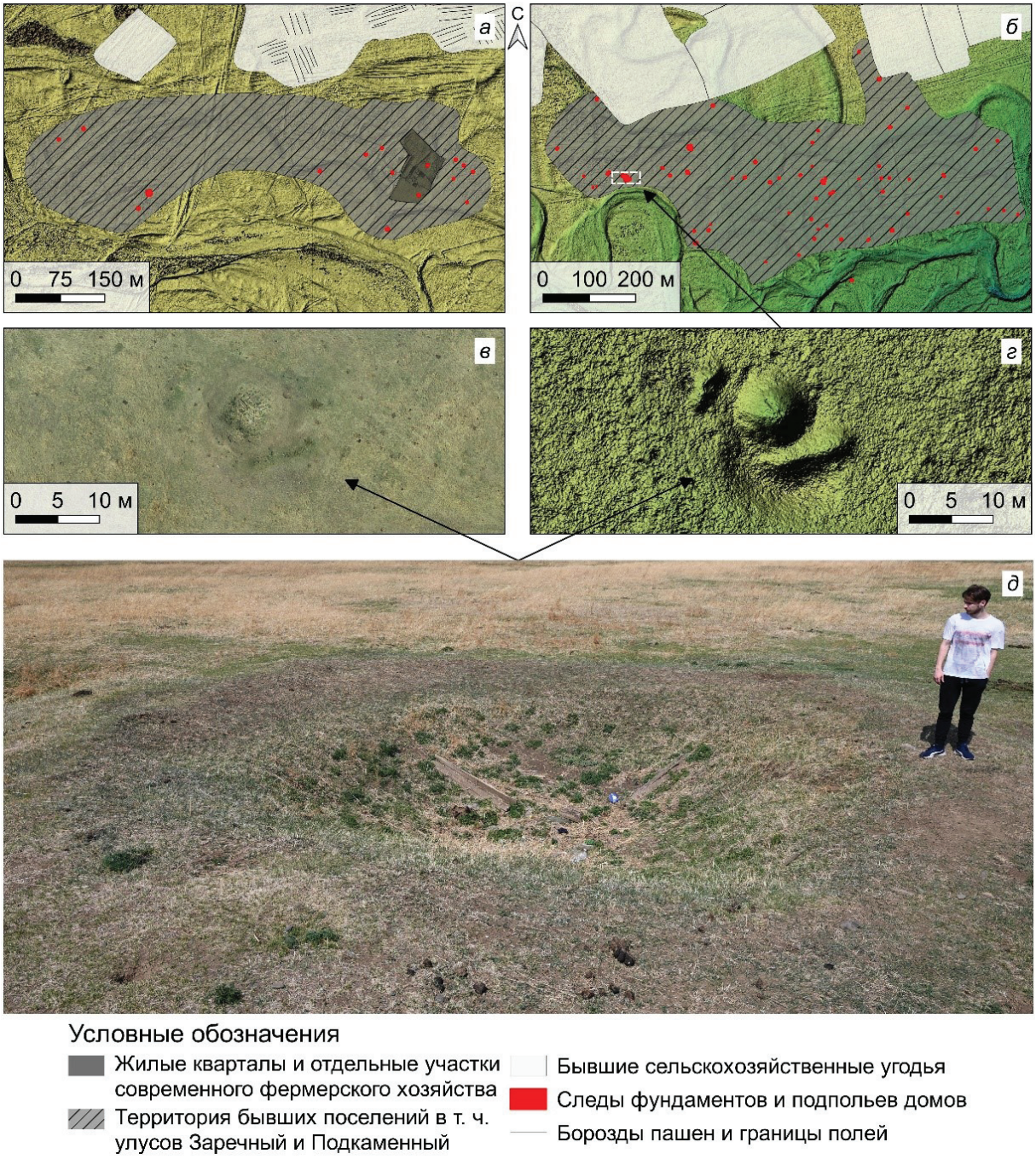


Рис. 5. Следы фундаментов и подпольев домов, существовавших до 1958 г.: а — на ЦММ в месте улуса Заречного; б — на ЦММ в месте улуса Подкаменного; в — на увеличенном фрагменте ортофотоплана; г — на увеличенном фрагменте ЦММ; д — на местности
Fig. 5. Traces of the foundations and undergrounds of houses that existed before 1958: a — on the DSM in the place of the Zarechny ulus; b — on the DSM in the place of the Podkamenny ulus; c — on an enlarged fragment of the orthomosaic; d — on an enlarged fragment of DSM; e — in situ

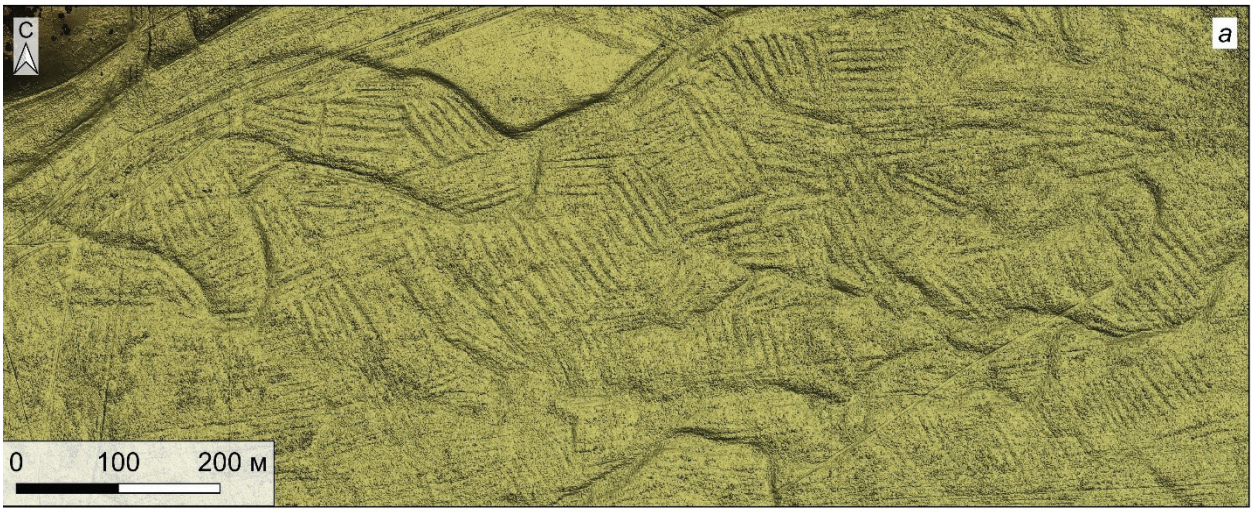


Рис. 6. Следы возможных пашенных и покосных земель на ЦММ (участки см. на рис. 1)
Fig. 6. Traces of possible farmlands on DSM (look for location in fig. 1)

Согласно атласу [*Дриженко*, 1908] в дельте р. Голоустной существовало еще несколько улусов. В начале 1950-х гг. они были ликвидированы[1]. Из различных архивных описаний и ретроспективных анализов хозяйственного освоения дельты р. Голоустной неясно, где территориально располагались сельскохозяйственные угодья и колхоз «Путь к коммунизму». Последний распался в 1958 г. и передан в с. Урик[2]. Известно, что земли, которыми владел позднее существовавший там колхоз, переданы Прибайкальскому национальному парку при его создании. Таким образом, весьма вероятно, что наблюдаемые по данным АФС деформации почв и есть сельскохозяйственные угодья 30–50 гг. XX в.

Следы лесозаготовительной деятельности

С точки зрения образовательных мероприятий, туризма и экологии заслуживают внимание следы, связанные с деятельностью леспромхозов в дельтах рек Бугульдейки и Голоустной. На ЦММ и ортофотопланах они представлены выпаханными транспортом и бревнами отпечатками на земной поверхности. Особенно ярко линейные следы выражены у порта в с. Бугульдейке протяженностью 550–560 м, где сохранились остатки шпал и трассы рельсов, по которым перемещались козловые краны (рис. 7). Расстояние между ними с северо-запада на юго-восток составляет 40, 13 и 32 м. Всего на изображениях с квадрокоптера отчетливо видны 4 полосы для крановых рельс шириной около 3 м. Им соответствуют валы шириной до 6,5–12 м и высотой до 1 м.

В дельте р. Голоустной треки от рельсов сохранились слабее. На ЦММ вдоль канала у нынешней лодочной станции с высоты можно различить аналогичные бугульдейским полосы протяженностью ~825 м, упирающиеся в пересохшее русло реки (рис. 8). Сегодня следы практически стерты последующим техногенным воздействием, но имеется примечательная фотография 1982 г., отражающая масштабы производственной деятельности советского периода (рис. 3 б).

---

1 Голоустенское муниципальное образование. История. Электронный ресурс: http://goloustnenskoe-mo.ru/o_poselenii/istoriya (дата обращения 12.02.2023).

2 Нижний Кочергат. Записи сообщества. Электронный ресурс: https://vk.com/wall-46822461_117 (дата обращения 12.02.2023).

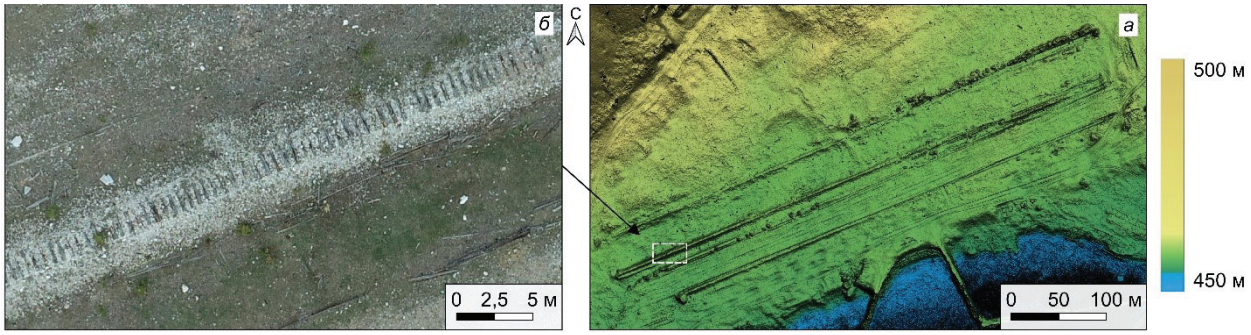


Рис. 7. Остатки шпал на ортофотоплане (а) и трассы рельсов для козловых кранов на ЦММ (б) у старого порта в дельте р. Бугульдейка (участки см. на рис. 1)
Fig. 7. The remains of the sleepers on the orthomosaic (a) and the railtracks for gantry cranes on the DSM (b) near the old port in the delta of the Buguldeyka River (look for location in fig. 1)

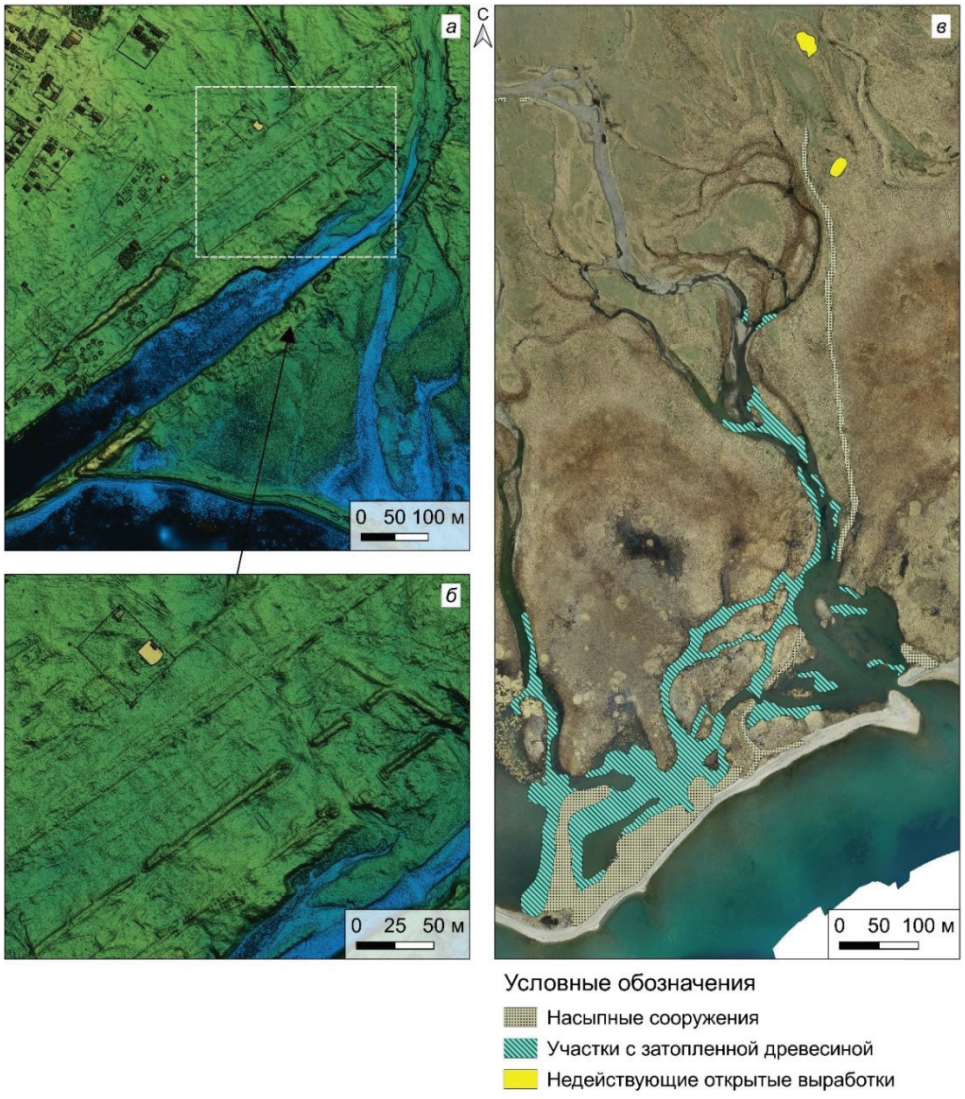


Рис. 8. Трассы рельсов для козловых кранов на ЦММ (а, б) и другие следы антропогенной деятельности советского периода (в) в дельте р. Голоустной (участки см. на рис. 1)
Fig. 8. Traces of railtracks for gantry cranes on DSM (a, b)and other anthropogenic activities of the Soviet-era in the delta of the Goloustnaya River (look for location in fig. 1)

Кроме того, в устьях рек сохранились многочисленные насыпные пристани (рис. 8–9) и дороги через болото, построенные для транспортировки леса. При дешифрировании аэрофотоматериалов по краю дельты р. Голоустной были обнаружены выработки, из которых брался грунт, а также искусственные возвышения высотой 4–4,4 м, расположенные на насыпях, примыкающих к намывным косам. На одной из таких возвышенностей, сформированной в ходе дноуглубительных работ 1958 г., был расположен маяк, который и сейчас различим на ортофотоплане приустьевой части дельты р. Голоустной (рис. 9).

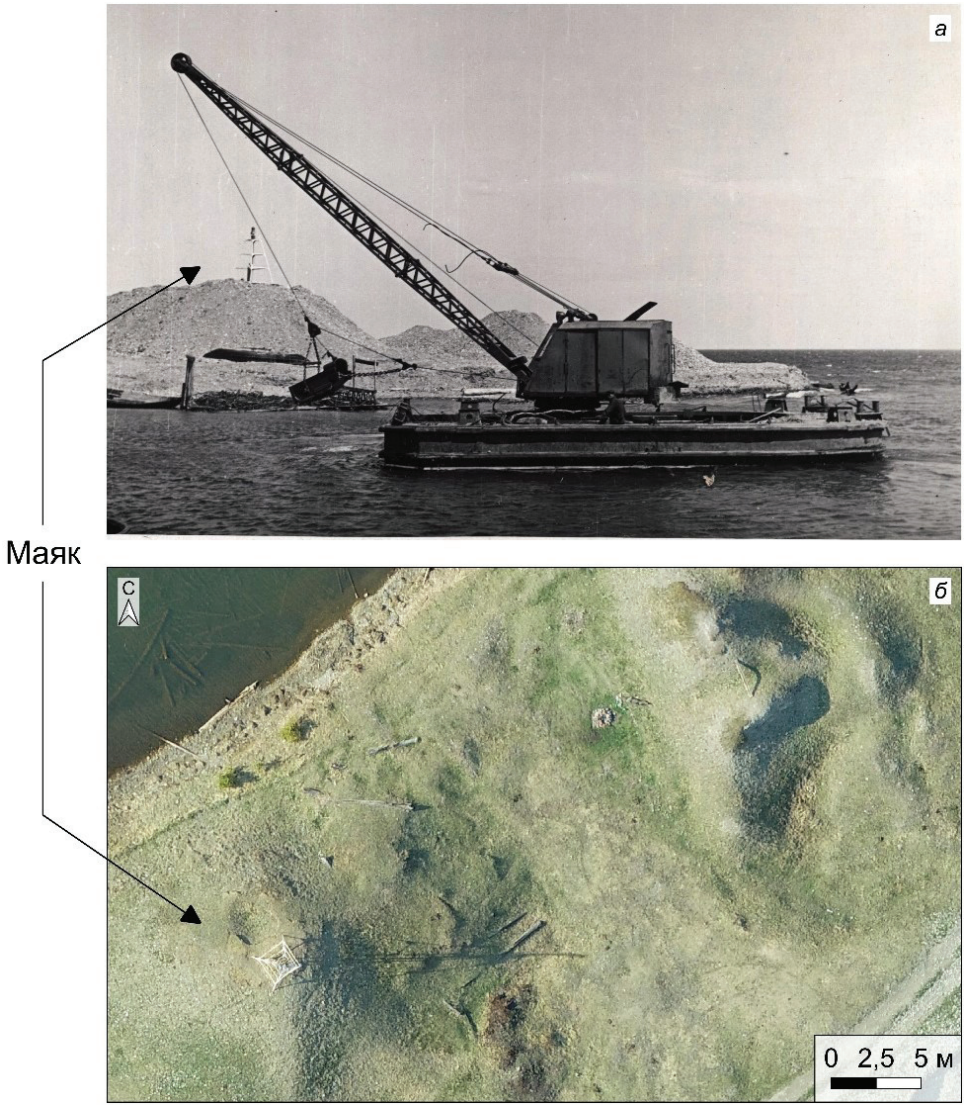


Рис. 9. Искусственные возвышения с маяком, сформированные при дноуглубительных работах экскаватором с понтона в 1958 г.[1] *(а) и фрагмент ортофотоплана с насыпными сооружениями и тем же маяком на окраине дельты р. Голоустной в 2022 г. (см. положение участка на рис. 1)*

Fig. 9. Artificial elevations with a lighthouse formed during dredging by an excavator from a pontoon in 1958 (a) and a fragment of orthomosaic with banked ground and the same lighthouse on the edge of the Goloustnaya River delta in 2022 (look for location in fig. 1)

[1] ГАИО. Р-2746. Оп. 4. Д. 45. Л. 15 об.

Определенной экологической проблемой, вероятно, следует считать остатки леса в приустьевой части рассматриваемых рек. Так, между намывными косами и берегом, а также в некоторых устьях русел р. Голоустной, расположенных западнее и частично пересохших на момент майской съемки 2022 г., до сих пор в большом количестве сохранились затопленные бревна (рис. 10). Встречаются также шины от больших автомобилей. В районе дельты р. Бугульдейки затопленный лес находится в основном в искусственном затоне у старого порта, где ранее шла погрузка леса для транспортировки в пос. Выдрино (рис. 11).

Отдельные бревна встречаются на суше и по берегу. По данным АФС в случае очистительных мероприятий места их распространения могут быть точно обозначены на картографической основе.

Рис. 10. Затопленные бревна в руслах и заводях в дельте р. Голоустной (см. положение участка на рис. 1)
Fig. 10. Flooded logs in waterway and backwaters in the Goloustnaya River delta (look for location in fig. 1)

Рис. 11. Затопленные бревна в искусственном затоне у старого порта в дельте р. Бугульдейки (см. положение участка на рис. 1)
Fig. 11. Flooded logs in artificial backwater near the old port in the Buguldeyka River delta (look for location in fig. 1)

ВЫВОДЫ

В результате проведенных работ нами совмещены уникальные возможности АФС сверхвысокого разрешения и исторические сведения, которые позволили картографировать и идентифицировать следы антропогенного воздействия на территориях дельт рр. Бугульдейки и Голоустной на западном побережье оз. Байкал. До настоящей работы четких графических представлений об уже несуществующих объектах советского периода не было. На страницах различных официальных и неофициальных веб-порталов имеются лишь описания, где зачастую нет ссылок, откуда были взяты сведения.

В ходе настоящего исследования:

1) определены границы сельскохозяйственных угодий 30–50 гг. прошлого века, принадлежащих колхозу советского периода времени;
2) обнаружены многочисленные углубления рельефа, соответствующие постройкам улусов Заречного и Подкаменного, существовавших с прошлых веков до 1958 г.;
3) идентифицированы на земной поверхности следы масштабных лесозаготовительных работ и положение козловых кранов, мосты которых установлены на опоры, перемещающиеся по рельсам;
4) выявлены места скопления затонувшего леса у берегов оз. Байкал и в некоторых руслах р. Голоустной.

В практическом плане полученные данные могут быть использованы в исторических реконструкциях, например, при создании макетов обустройства дельт в советский период времени для региональных музеев в современных поселках и визит-центрах Прибайкальского национального парка. Результаты могут быть также полезны в экологических изысканиях, совмещенных с добычей древесины с целью очищения дна водоемов. Мореная древесина представляет собой особую ценность, если она пролежала несколько десятков лет под толщей отложений. Для этих целей, однако, нужны специальные исследования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00064, https://rscf.ru/project/22-27-00064/.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was funded by Russian Science Foundation grant 22-27-00064, https://rscf.ru/project/22-27-00064/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атутова Ж.В. Ретроспективный анализ хозяйственного освоения долинных комплексов рек, впадающих в оз. Байкал (на примере бассейна р. Голоустная). Природа внутренней Азии, 2018. № 3 (8). С. 7–16. DOI: 10.18101/2542-0623-2018-3-7-16.

Богомолов Л.А. Дешифрирование аэрокосмоснимков. М.: Недра, 1976. 145 с.

Дриженко Ф.К. Атлас озера Байкал. СПб.: Изд. Глав. гидрогр. упр., 1908. 31 л. (две сборные карты).

Кравченко В.В., Волкова В.Г., Давыдова Н.Д. и др. Экологически ориентированное планирование землепользования в Байкальском регионе. Бассейн р. Голоустной. Иркутск, Ганновер: ИГ СО РАН, 1997. 96 с.

Макаров С.А., Белозерцева И.А., Власова Н.В., Воробьева И.Б., Гагаринова О.В., Опекунова М.Ю. Исследование устьевых зон притоков озера Байкал (на примере реки Голоустная). Успехи современного естествознания, 2019. № 9. С. 65–72.

Федотова Г. Аварийная древесина у берегов. Ленинское знамя, 1982. 10 августа. № 97(5624). С. 3.

Calantropio A., Chiabrando F., Auriemma R. Photogrammetric underwater and UAS surveys of archaeological sites: the case study of the Roman Shipwreck of Torre Santa Sabina. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2021. V. XLIII-B2-2021XXIV. P. 643–650. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-643-2021.

Chandra A.M., Chosh S.K. Remote sensing and geographical informational system. Alpha Science, 2006. 298 p.

Cheng Z., Gong W., Tang H., Juang C.H., Deng Q., Chen J., Ye X. UAV photogrammetry-based remote sensing and preliminary assessment of the behavior of a landslide in Guizhou, China. Eng. Geol., 2021. V. 289. P. 106172. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106172.

Liu-Zeng J., Yao W., Liu X., Shao Y., Wang W., Han L., Wang Y., Zeng X., Li J., Wang Z., Liu Z., Tu H. High-resolution structure-from-motion models covering 160 km-long surface ruptures of the 2021 MW 7.4 Madoi earthquake in northern Qinghai-Tibetan Plateau. Earthquake Res. Adv. 2, 2022. V. 2. No. 2. P. 100140. DOI: 10.1016/j.eqrea.2022.100140.

Lunina O.V., Gladkov A.A. The rupturing phenomena in the deltaic deposits of Cape Rytyi on the Northwestern shore of Lake Baikal. Russian Geology and Geophysics, 2022. V. 63. No. 2. P. 125–136. DOI: 10.2113/RGG20204270.

Tmuši'c G., Manfreda S., Aasen H., James M.R., Gonçalves G., Ben-Dor E., Brook A., Polinova M., Arranz G.G., Mészáros J., Zhuang R., Johansen K., Malbeteau Y., De Lima I.P., Davids G., Herban S., McCabe M.F. Current Practices in UAS-based Environmental Monitoring. Remote sensing, 2020. V. 12. P. 1–35. DOI: 10.3390/rs12061001.

REFERENCES

Atutova Z.V. Backcasting of the economic development of valley complexes of rivers discharging into Lake Baikal (case study of Goloustnaya River's basin). Nature of Inner Asia, 2018. No. 3 (8). C. 7–16 (in Russian). DOI: 10.18101/2542-0623-2018-3-7-16.

Bogomolov L.A. Interpretation of aerospace images. M.: Nedra, 1976. 145 pp. (in Russian).

Calantropio A., Chiabrando F., Auriemma R. Photogrammetric underwater and UAS surveys of archaeological sites: the case study of the Roman Shipwreck of Torre Santa Sabina. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2021. V. XLIII-B2-2021XXIV. P. 643–650. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-643-2021.

Chandra A.M., Chosh S.K. Remote sensing and geographical informational system. Alpha Science, 2006. 298 p.

Cheng Z., Gong W., Tang H., Juang C.H., Deng Q., Chen J., Ye X. UAV photogrammetry-based remote sensing and preliminary assessment of the behavior of a landslide in Guizhou, China. Eng. Geol., 2021. V. 289. P. 106172. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106172.

Drizhenko F.K. Atlas of the Lake Baikal. Glavnoe Gidrograficheskoe Upravlenie. St. Petersburg, 1908 (in Russian).

Fedotova G. Emergency timber off the coast. Leninskoe znamya (Lenin banner), 1982. 10 August. No. 97 (5624). P. 3 (in Russian).

Liu-Zeng J., Yao W., Liu X., Shao Y., Wang W., Han L., Wang Y., Zeng X., Li J., Wang Z., Liu Z., Tu, H. High-resolution structure-from-motion models covering 160 km-long surface ruptures of the 2021 MW 7.4 Madoi earthquake in northern Qinghai-Tibetan Plateau. Earthquake Res. Adv. 2, 2022. V. 2. No. 2. P. 100140. DOI: 10.1016/j.eqrea.2022.100140.

Kravchenko V.V., Volkova V.G., Davydova N.D. et al. Environmentally oriented land use planning in the Baikal region. Basin of the Goloustnaya River. Irkutsk, Hannover: IG SB RAS, 1997. 96 p. (in Russian).

Lunina O.V., Gladkov A.A. The rupturing phenomena in the deltaic deposits of Cape Rytyi on the Northwestern shore of Lake Baikal. Russian Geology and Geophysics, 2022. V. 63. No. 2. P. 125–136. DOI: 10.2113/RGG20204270.

Makarov S.A., Belozertseva I.A., Vlasova N.V., Vorobyeva I.B., Gagarinova O.V., Opekunova M. Yu. Research of estuarial zones of inflows of Lake Baikal (on the example of the Goloustnaya River). Advances in current natural sciences, 2019. No. 9. P. 65–72 (in Russian).

Tmuši'c G., Manfreda S., Aasen H., James M.R., Gonçalves G., Ben-Dor E., Brook A., Polinova M., Arranz G.G., Mészáros J., Zhuang R., Johansen K., Malbeteau Y., De Lima I.P., Davids G., Herban S., McCabe M.F. Current Practices in UAS-based Environmental Monitoring. Remote sensing, 2020. V. 12. P. 1–35. DOI: 0.3390/rs12061001.

УДК: 504.61.054(470.23-25)+614.7 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-304-317**

С.М. Клубов[1,2,3], В.Ю. Третьяков[4], В.В. Дмитриев[5], А.Р. Никулина[6]

МЕТОДИКА ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДОСБОРОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСТУПЛЕНИЯ ОБЩЕГО АЗОТА И ФОСФОРА В НЕВСКУЮ ГУБУ И ВОСТОЧНУЮ ЧАСТЬ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

АННОТАЦИЯ

Невская губа и восточная часть Финского залива подвержены токсическому загрязнению и эвтрофированию, происходящему из-за избыточного антропогенного поступления общего азота и фосфора. В Санкт-Петербурге мониторинг содержания общего азота и фосфора в речном стоке выполняется только в р. Неве и ее рукавах, поэтому необходимо определение модулей стока общего азота и фосфора с водосборов тех водотоков, на которых не производится мониторинг. Для этого необходимо выделение данных водосборных бассейнов. В статье рассматривается авторская модификация методики выделения водосборных бассейнов водотоков г. Санкт-Петербурга. Она основана на использовании цифровой модели рельефа (ЦМР), созданной в результате оцифровки топографических карт. Использование наиболее популярных глобальных цифровых моделей рельефа SRTM, ASTER GDEM, полученных в результате дистанционного зондирования поверхности затруднено из-за искажений от крыш зданий, различных сооружений, древесной и кустарниковой растительности, а также других объектов: насыпей, путепроводов, заводских труб и т. п. В связи с этим глобальные цифровые модели рельефа SRTM, ASTER GDEM искаженно показывают высоту земной поверхности. Эти искажения могут приводить к ошибкам при определении границ водосборных бассейнов. Цифровая модель рельефа, созданная в результате оцифровки топографической карты, позволяет получить истинные значения высот земной поверхности. Новая ЦМР была создана нами путем оцифровки топографической карты Санкт-Петербурга и Ленинградской области 2001 г. в м-бе 1: 200 000 с созданием векторного слоя точек истинных высот в Балтийской системе. В ArcGIS с помощью интерполяции слоя точек высот методом универсального кригинга была создана ЦМР с размерами ячеек 100 на 100 м. Выделение водосборных бассейнов выполнено с помощью инструмента ArcGIS Watershed. Также для выделения водосборов применялись инструменты ГИС QGIS и Saga.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровая модель рельефа, выделение водосборов, спутниковые снимки

1 Российский государственный гидрометеорологический университет, экологический факультет, Рижский пр-т., д. 11, Санкт-Петербург, Россия, 190103, *e-mail:* **klubov_stepan@mail.ru**

2 Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, 10-я линия Васильевского острова, д. 33-35, Санкт-Петербург, Россия, 199178, *e-mail:* **klubov_stepan@mail.ru**

3 3 ГБУ ДО ДТ «У Вознесенского моста» Адмиралтейского района Санкт-Петербурга, Гражданская ул., д. 26, Санкт-Петербург, Россия, 190031, *e-mail:* **klubov_stepan@mail.ru**

4 Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, 10-я линия Васильевского острова, д. 33-35, Санкт-Петербург, Россия, 199178, *e-mail:* **v_yu_tretyakov@mail.ru**

5 Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, 10-я линия Васильевского острова, д. 33-35, Санкт-Петербург, Россия, 199178, *e-mail:* **v.dmitriev@spbu.ru**

6 Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, 10-я линия Васильевского острова, д. 33-35, Санкт-Петербург, Россия, 199178, *e-mail:* **st075731@student.spbu.ru**

Stepan M. Klubov[1,2,3], **Victor Yu. Tretyakov**[4], **Vasily V. Dmitriev**[5], **Anna R. Nikulina**[6]

METHODOLOGY FOR DEFINITION OF BOUNDARIES OF SAINT PETERSGURG WATERSHEDS TO DETERMINE THE INTAKE OF TOTAL NITROGEN AND PHOSPHORUS INTO THE NEVA BAY AND EASTERN PART OF THE FINNISH GULF

ABSTRACT

The Neva Bay and eastern part of the Finnish Gulf are affected by toxic contamination and eutrophication due to superfluous anthropogenic income of total nitrogen and phosphorus. Monitoring of the total nitrogen and phosphorus content within Saint Petersburg is carried out only in the Neva River and its spill-streams. Therefore, it is necessary to evaluate modules of the total nitrogen and phosphorus outflow from watersheds of the watercourses without monitoring river stations. For this reason, it is necessary to definite boundaries of the watersheds. The paper presents proprietary technology for the watershed boundary definition within Saint Petersburg and its outskirts. The methodology is based on usage of the digital terrain model, which was created as result of topographic maps digitalization. Usage of the most popular global digital terrain models such as SRTM, ASTER GDEM makes difficulties under the conditions of big cities. The models were developed on the basis of remote sensing of the Earth's surface. Therefore, the values have distortions due to the signal reflection from roofs, structures, trees, scrubs, and so on. Thus, the global models include noisy data. The distortions can lead to mistakes at definition of watershed boundary. Topographic maps digitalization allows elaborating of digital terrain models without distortions of altitude values. We have made the new digital terrain model of Saint Petersburg and the outskirts by means of Saint Petersburg and Leningrad Region topographic map digitalization. The map was published in 2001. Its scale is equal to 1: 200 000. The feature point layer of the altitudes in the Baltic system was created on the base of the map. The digital terrain model was created in ArcGIS by universal kriging interpolation. Dimension of the model cell side is equal to 100 meters. Definition of the watersheds boundaries was carried out by means of the ArcGIS tool Watershed. In addition, we use for the definition some tools of QGIS and SAGA.

KEYWORDS: digital terrain model, definition of watershed boundaries, satellite images

ВВЕДЕНИЕ

Гидрографическая сеть Санкт-Петербурга насчитывает около 47 водотоков [*Нежиховский*, 1981]. Все водотоки Санкт-Петербурга расположены на водосборном бассейне Балтийского моря, оценкой загрязненности которого в последние десятилетия

1 Russian State Hydrometeorological University, Faculty of Ecology, 11, Rizhsky ave., St. Petersburg, Russia, 190103, *e-mail:* **klubov_stepan@mail.ru**

2 Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 33-35, 10th line of Vasilyevsky island, St. Petersburg, 199178, Russia, *e-mail:* **klubov_stepan@mail.ru**

3 3 State budgetary institution of additional education, Palace of Child Youth Art «At the Voznesensky Bridge» of the Admiralteysky district, 26, Grazhdanskaya str., St. Petersburg, 190031, Russia, *e-mail:* **klubov_stepan@mail.ru**

4 Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 33-35, 10th line of Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russia, *e-mail:* **v_yu_tretyakov@mail.ru**

5 Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 33-35, 10th line of Vasilyevsky island, St. Petersburg, 199178, Russia, *e-mail:* **v.dmitriev@spbu.ru**

6 Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 33-35, 10th line of Vasilyevsky island, St. Petersburg, 199178, Russia, *e-mail:* **st075731@student.spbu.ru**

активно занимаются страны Балтийского региона[1]. Антропогенное эвтрофирование Балтийского моря происходит из-за поступления азота и фосфора со стоком впадающих в него рек.

Эвтрофирование может приводить к «цветению» и ухудшению качества воды, появлению анаэробных зон, нарушению структуры биоценозов и исчезновению ряда видов гидробионтов, в т. ч. ценных промысловых рыб. В период своего интенсивного развития сине-зеленые водоросли выделяют сильнейшие токсины: алкалоиды, низкомолекулярные пептиды и др., представляющие опасность для живых организмов и человека. Концентрация токсинов увеличивается при их продвижении по трофической пирамиде от нижних ярусов к верхним. Потребление загрязненной токсинами пищи может вызвать у людей цирроз печени, дерматиты, отравление и гибель животных [*Frumin*, *Gildeeva*, 2017]. Поступающие в Финский залив со стоком рек соединения азота и фосфора антропогенного происхождения являются одной из причин эвтрофирования Балтийского моря [*Stepanova*, *Frumin*, 2014]. Водообмен Балтийского моря с Северным морем крайне замедлен. Период полного обновления воды составляет 40–50 лет. Эта природная особенность Балтийского моря обусловливает его чрезвычайную чувствительность к антропогенному воздействию [*Потапова* и др., 2005]. В конце XX в. в связи с увеличением темпов экономического развития во всем Балтийском регионе [*Лачининский*, *Семенова*, 2015] проблема загрязнения Балтийского моря встала достаточно остро [*Мосин*, 2011].

Для решения одной из главных проблем Балтийского моря — его эвтрофирования необходимо участие всех стран Балтийского региона [*Косов*, *Грибанов*, 2016]. В связи с необходимостью международного сотрудничества в области охраны Балтийского моря 15 ноября 2007 г. в Кракове министрами охраны окружающей среды стран Балтийского моря был согласован План действий для Балтийского моря (ПДБМ) [HELCOM, 2007].

В соответствии со своими международными обязательствами по Плану действий по Балтийскому морю Россия обязана вести регулярные наблюдения за состоянием поверхностных вод на водосборном бассейне моря. В Санкт-Петербурге Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СЗУГМС) осуществляет регулярные наблюдения за качеством воды водных объектов [*Серебрицкий*, *Григорьев*, 2018]. СЗУГМС ежемесячно проводит исследования качества воды на 13 водотоках в черте Санкт-Петербурга. На основании результатов гидрохимических наблюдений СЗУГМС ежегодно проводится оценка поступления общего азота и фосфора со стоком рек Санкт-Петербурга. Как видно из рис. 1, оценивается только поступление общего азота и фосфора со стоком р. Невы и ее рукавов. Однако в Невскую губу и восточную часть Финского залива с территории Санкт-Петербурга впадают еще более 25 водотоков. При этом неизвестно, сколько общего азота и фосфора поступает в Невскую губу и восточную часть Финского залива со стоком этих водотоков. Соответственно, существующая оценка поступления общего азота и фосфора со стоком водотоков Санкт-Петербурга не является полной. Поэтому цель нашего исследования заключается в определении модулей стока общего азота и фосфора с водосборов, сток с которых не учитывается при оценке поступления общего азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива с территории Санкт-Петербурга.

[1] Резолюция круглого стола «Роль муниципалитетов в регионе — Локальные планы по Выполнению Плана действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю (ПДБМ)». Электронный ресурс: http://www.helcom.ru/baltic_sea_d ay/2018 (дата обращения 29.03.2023).

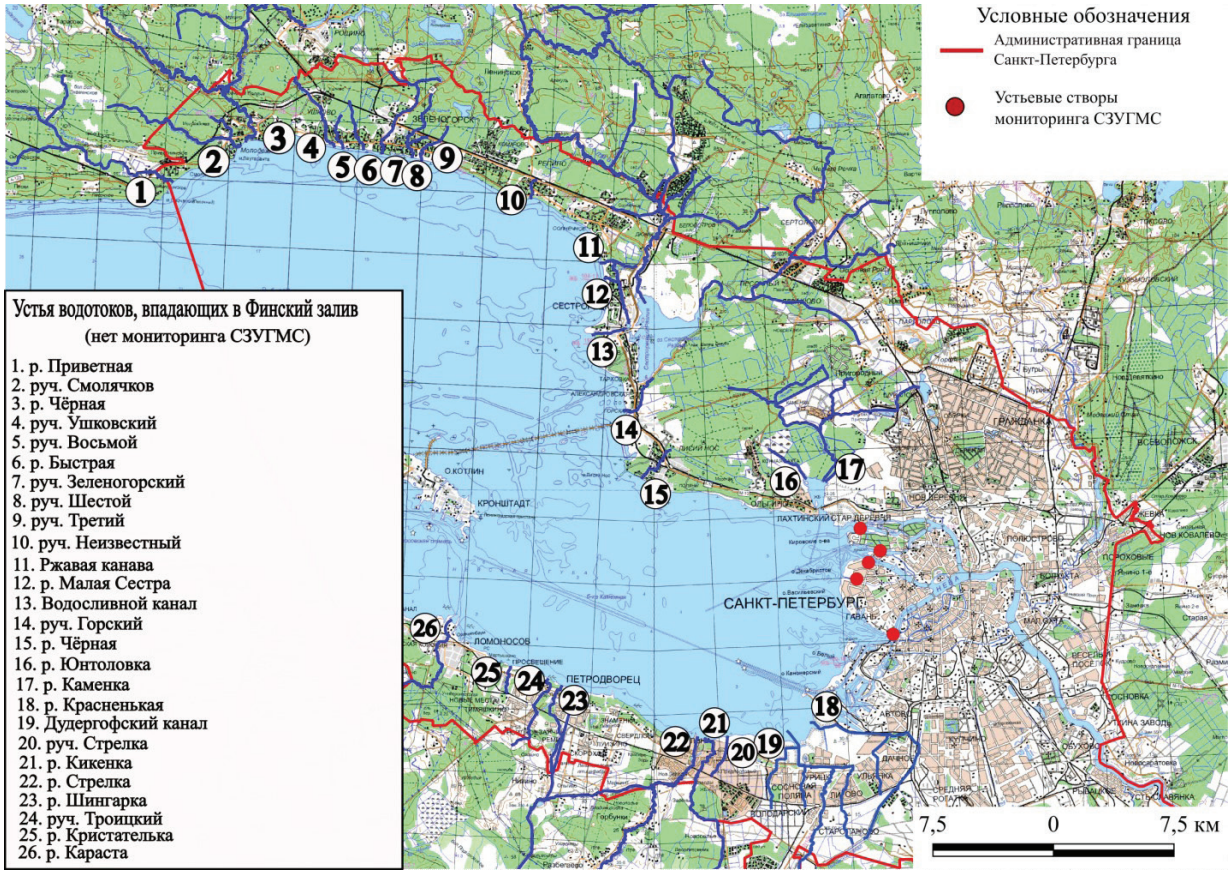


Рис. 1. Мониторинг поступления общего азота и фосфора со стоком водотоков г. Санкт-Петербурга
Fig. 1. Monitoring of total nitrogen and phosphorus income with outflow of Saint Petersburg watercourses

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика определения модулей стока общего азота и фосфора с водосборов, сток с которых не учитывается при оценке поступления общего азота и фосфора в Финский залив с территории Санкт-Петербурга, представлена в виде блок-схемы на рис. 2. В соответствии с нашей методикой (рис. 2), на первом этапе выполняется оцифровка горизонталей топографической карты. Нами была использована топографическая карта г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области 2001 г. м-ба 1: 200 000. Использование топографических карт обозначенного масштаба ограничено применением к удаленным от центра города территориям с относительно выраженным рельефом. Для территории, занятой многоэтажной жилой застройкой, была использована карта-схема высот г. Санкт-Петербурга (рис. 5).

Путем оцифровки горизонталей топографической карты был создан шейпфайл векторных линейных объектов, в таблице атрибутов которого записаны значения высот горизонталей. С использованием инструментов QGIS вдоль этих линейных объектов через каждые 100 м были расставлены точки. Таблица атрибутов слоя точек содержит значения высот горизонталей. В ArcGIS интерполяцией слоя точек методом «Universal kriging» был создан растр ЦМР с размерами ячеек 100 на 100 м. Использование данного метода интерполяции позволяет использовать существенно нерегулярную сетку исходных значений. Также выбор такого метода интерполяции обусловлен тем, что в нем

автоматически определяется радиус поиска (расстояние, на котором еще существует взаимосвязь между значениями).

Полученный в результате интерполяции растр затем был модифицирован следующим образом: были созданы буферные зоны водотоков шириной 100 м, и в пределах этих зон значения высот в ячейках растра ЦМР были уменьшены на 10 м. Ячейки матрицы ЦМР ASTER GDEM содержат значения, рассчитанные по данным отражения солнечной радиации от поверхностей водотоков. Разумеется, зачастую сигнал от поверхности воды «перемешивается» с сигналом от берегов. Для создания в среде ГИС адекватной реальности сети линий стока необходимо учесть существующую гидрографическую сеть. Поэтому необходимо уменьшать значения высот ячеек, через которые протекают существующие водотоки. Впоследствии на основании создаваемого слоя ячеек стока создается матрица водосборных бассейнов, которая потом конвертируется в векторный полигональный слой.

Выделение водосборных бассейнов выполнено инструментом ArcGIS «Watershed». Созданная в результате интерполяции ЦМР была модифицирована с использованием инструмента «Fill».

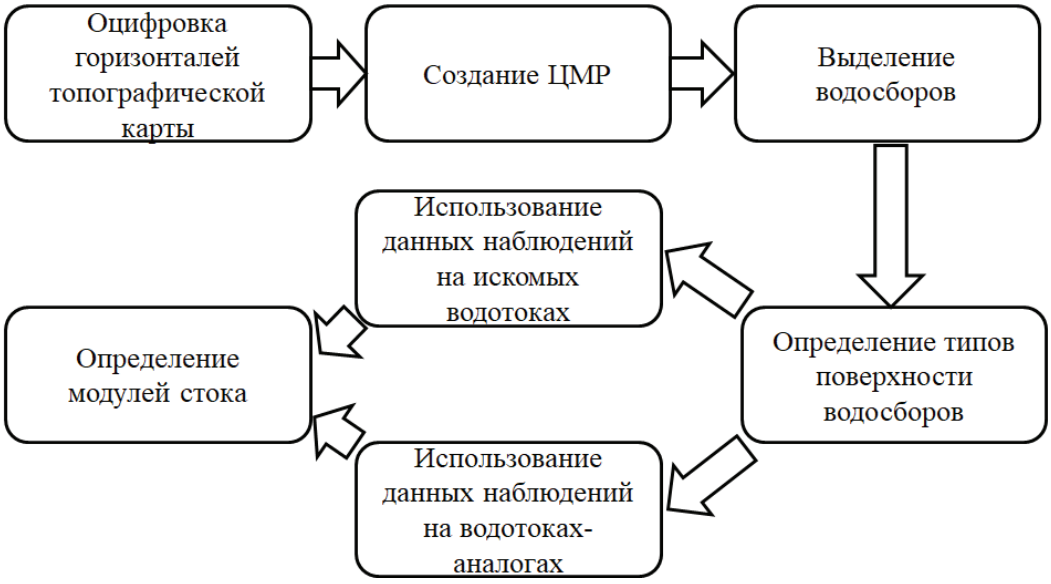


Рис. 2. Блок-схема методики определения модулей стока
Fig. 2. Block diagram of the outflow modules evaluation methodology

В результате был получен растр направлений стока «Flow Direction». Выделение водосборных бассейнов выполнялось на основании растров «Flow Direction» выше по течению от узловых точек, расставляемых «вручную» в устьях водотоков. Созданные в результате растры принадлежности ячеек к частным водосборам преобразовывались в векторные полигональные слои с помощью инструмента ArcGIS «Conversion tools». Далее полигоны частных водосборов объединялись в полигоны водосборов разных водотоков.

После выделения границ водосборного бассейна необходимо определить типы подстилающей поверхности в его пределах. Классификация с обучением участков разных типов подстилающей поверхности выполнена в QGIS с помощью модуля «Dzetsaka classification dock» на основе композитного изображения. Для создания композитного изображения была использована комбинация красного (B4), зеленого (B3) и ближнего инфракрасного (B8) каналов спутниковых Sentinel-2. Пространственное разрешение ячеек растров использованных каналов и итогового композита составило 10 на

10 м. Для проведения классификации с обучением был создан векторный слой эталонных участков поверхности:

1. Участки, поросшие травянистой и кустарниковой растительностью;
2. Грунтовые поверхности;
3. Асфальтовые поверхности;
4. Зеленые зоны (парки, скверы и т.д.);
5. Крыши зданий;
6. Водная поверхность.

После завершения процедуры классификации с обучением была проведена верификация полученного растра типов поверхности и его последующая векторизация для расчетов площадей поверхностей разных типов.

Пространственная структура водосборов необходима для определения поступления азота и фосфора с водосборов тех водотоков, впадающих с территории Санкт-Петербурга в Невскую губу и восточную часть Финского залива, на которых отсутствуют створы мониторинга. Разные типы поверхностей характеризуются различными значениями коэффициентов поверхностного стока и модулей стока субстанций.

Расчет поступления общего фосфора и азота в Финский залив со стоком водотоков выполнен по формуле (1):

$$Q = 31{,}5 \cdot C_c \cdot R_c \qquad (1),$$

где Q — поступление вещества, т/г.,
C_c — средняя концентрация вещества в воде, г/м^3,
R_c — средний расход воды за соответствующий период времени, м^3/с.

Модуль стока общего азота и фосфора вычисляется по формуле (2):

$$M = Q/W \qquad (2),$$

где M — модуль стока, тонн/г.•км^2)
Q — поступление вещества, т/г. (см. формулу 1),
W — площадь водосборного бассейна, км^2.

Как уже отмечено (рис. 1), на большинстве впадающих в Невскую губу и восточную часть Финского залива водотоков отсутствуют регулярные гидрохимические наблюдения СЗУГМС. На части водотоков проводятся гидрохимические наблюдения водопользователями, осуществляющими хозяйственную деятельность на водосборных бассейнах в рамках производственного экологического контроля. Для водотоков, по которым отсутствуют какие-либо данные гидрохимических наблюдений, нами предлагается использовать данные о химическом составе и расходах воды водотоков-аналогов. Под водотоками-аналогами мы понимаем водотоки, сходные по морфометрическим показателям с исследуемыми водотоками. Сток водотоков-аналогов формируется под воздействием сходных с исследуемыми водотоками процессов на водосборных бассейнах с характеристиками, близкими к характеристикам водосборов исследуемых водотоков. Расположение водотоков-аналогов показано на рис. 3.

Гидрохимические данные и информация о расходах воды водотоков-аналогов присутствуют в Бюллетенях качества поверхностных вод суши и Ежегодных данных о режиме и ресурсах поверхностных вод суши, Ежегодниках качества поверхностных вод

суш. Для исследования нами были отобраны данные за 1980–1989 гг. и 2010–2021 гг. Ознакомление с данными производилось в Отделе государственного фонда данных СЗУГМС. Гидрохимические данные за 1980–1989 гг. приводятся по датам отбора проб или датам измерений расходов воды, гидрохимические данные за 2010–2021 гг. представлены в усредненном виде.

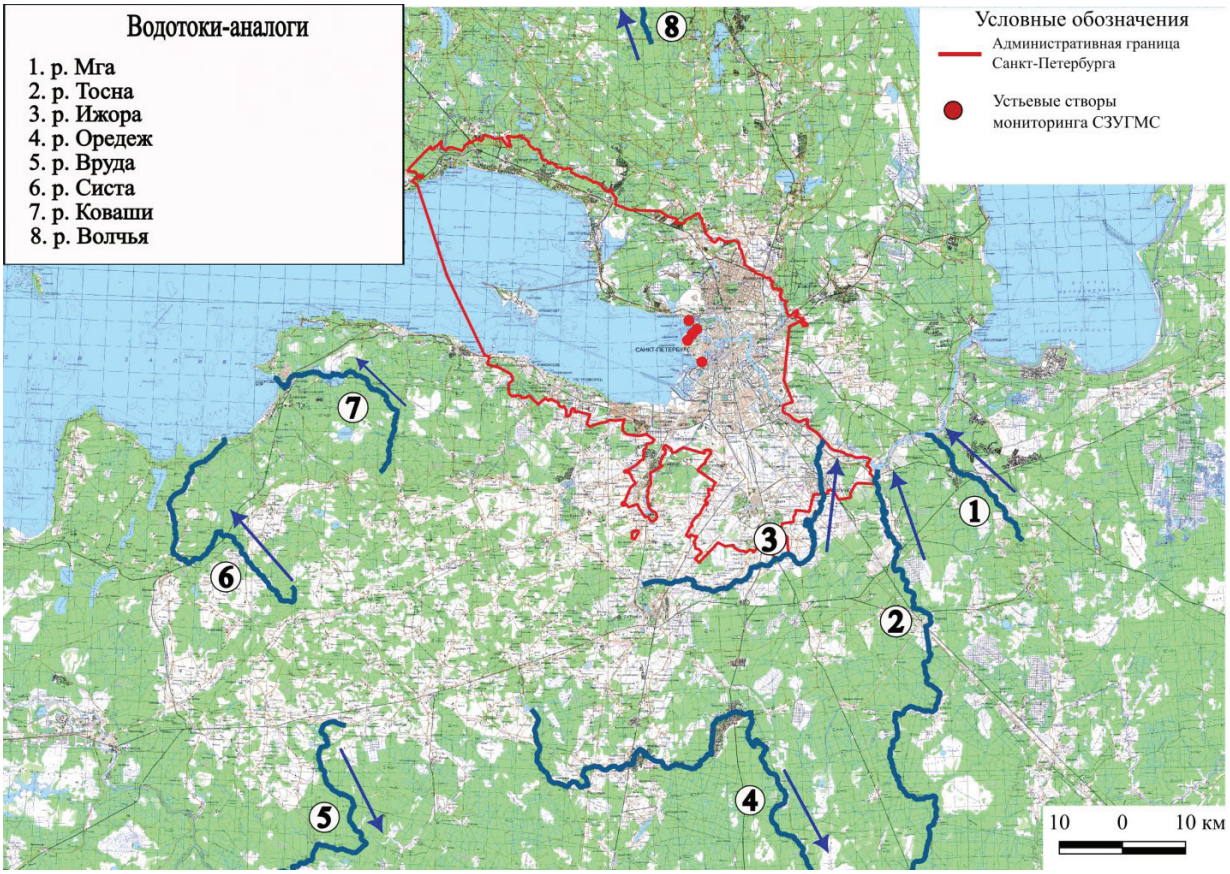


Рис. 3. Карта-схема расположения водотоков-аналогов
Fig. 3. Schematic map of the analogue watercourses spatial location

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Начальным и ключевым этапом методики определения модулей стока субстанций с водосборов является выделение границ этих водосборов. Выделение водосборов в среде ГИС выполняется на основании цифровых моделей рельефа. Для целей выделения обширных водосборов наиболее популярными глобальными ЦМР являются ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model) и SRTM (Shuttle radar topographic mission). Рассмотрим характеристики этих моделей.

Продукт **ASTER GDEM** (Global Digital Elevation Model) разработан совместно Министерством экономики, торговли и промышленности (METI) Японии и Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства США (NASA). Первая версия ASTER GDEM была выпущена в июне 2009 г. Эта ЦМР создана на основе данных сенсора ASTER спутника Terra. Сенсор работал в инфракрасном диапазоне. Охват ASTER GDEM простирается от 83° с. ш. до 83° ю. ш., покрывая 99 % суши Земли. ASTER GDEM имеет глобальное разрешение 90 м и разрешение 30 м в пределах территории

Соединенных Штатов Америки. Несмотря на высокое разрешение и большой охват, модель имеет множество ошибок в определении высот в облачных районах [*Мальцев* и др., 2018].

SRTM (Shuttle radar topographic mission) — международная миссия по получению данных цифровой модели рельефа (ЦМР) территории Земли. Съемка поверхности Земли проведена в феврале 2000 г. с борта космического корабля многоразового использования Shuttle с помощью радарной интерферометрической камеры и двух радиолокационных сенсоров SIR-C и X-SAR. В результате была создана матрица высот, охватывающая территорию суши от 60° с. ш. до 54° ю. ш., а также некоторые морские акватории. Данные SRTM представлены существуют в нескольких версиях. Данные SRTM с размером ячеек 1x1 угловые секунды, т. е. с пространственным разрешением 30 м являются более точными, но, к сожалению, доступны лишь на территорию США. На остальную поверхность Земли доступны только данные SRTM с размером ячейки 90x90 м [*Мальцев* и др., 2018].

Обе описанные ЦМР находятся в свободном доступе[1,2].

Наиболее современной и точной ЦМР является **WorldDEM** — высокоточная глобальная цифровая модель рельефа (ЦМР) компании Airbus Defence and Space. WorldDEM создается по интерферометрическим парам радарных снимков спутников TerraSAR-X и TanDEM-X и превосходит все существующие на сегодняшний день ЦМР, полученные по данным дистанционного зондирования Земли.

Отличительной особенностью этой ЦМР является относительная точность 2 м и абсолютная точность 4 м. Пространственный охват распространяется на широты севернее 60° с. ш. без изменения точности. Размер ячейки составляет 12x12 м [*Riegler* et al., 2015]. Указанная ЦМР является платной[3].

Сравнительные характеристики глобальных моделей рельефа и разработанной нами ЦМР представлены в табл. 1.

Табл. 1. Сравнительные характеристики цифровых моделей рельефа
Table 1. Performance comparison of some digital terrain models

Название	ASTER GDEM	SRTM	WorldDEM	Авторская ЦМР
Пространственный охват	83° с. ш. – 83° ю. ш.	60° с. ш. – 54° ю. ш.	90° с. ш. – 90° ю. ш.	Санкт-Петербург и Ленинградская область
Пространственное разрешение	90 м	90 м	12 м	100 м
Метод съемки/получения	Инфракрасная съемка	Радиолокационная съемка	Радиолокационная съемка	Оцифровка изолиний топографической карты
Возможность свободного доступа	Да	Да	Нет	Исходную топографическую карту можно найти в свободном доступе

Для нашего исследования указанные в таблице глобальные ЦМР не подходят. SRTM не подходит из-за пространственного разрешения. WorldDEM не подходит из-за отсутствия свободного доступа. ASTER GDEM требует значительной модификации для применения к

1 SRTM. Глобальная база данных высот. Электронный ресурс: https://srtm.csi.cgiar.org/ (дата обращения 17.01.2023).

2 ASTER GDEM. Электронный ресурс: https://gdemdl.aster.jspacesystems.or.jp/index_en.html (дата обращения 17.01.2023).

3 Геоматика. Цифровые модели рельефа. Электронный ресурс: https://sovzond.ru/upload/iblock/090/78-82.pdf?ysclid=lftrynmfvl639099589 (дата обращения 17.01.2023).

водосборам водных объектов Санкт-Петербурга. Такая модификация была нами выполнена для водосборных бассейнов рр. Волковки и Охты. Перепад высот, например, на водосборе р. Волковки (рис. 4) составляет более 200 м, что значительно больше точности использованной глобальной ЦМР. Модификация связана с искажением высот поверхности Земли от тех объектов, которые на ней расположены. Например, на водосборных бассейнах рр. Волковки и Охты расположена многоэтажная жилая застройка высотой до 26 этажей (около 80 м). Таким образом, ASTER GDEM, как и любая другая глобальная ЦМР, имеет искажения относительно реальной высоты местности в несколько десятков метров (рис. 4). Искажения хорошо видны на фрагменте ЦМР ASTER GDEM в виде белых прямоугольников, совпадающих с очертаниями городской квартальной застройки. Для того, чтобы убрать искажения, исходная ЦМР ASTER GDEM в формате GeoTiff была преобразована в векторный слой точек в ГИС SAGA с использованием инструмента «Grid to points».

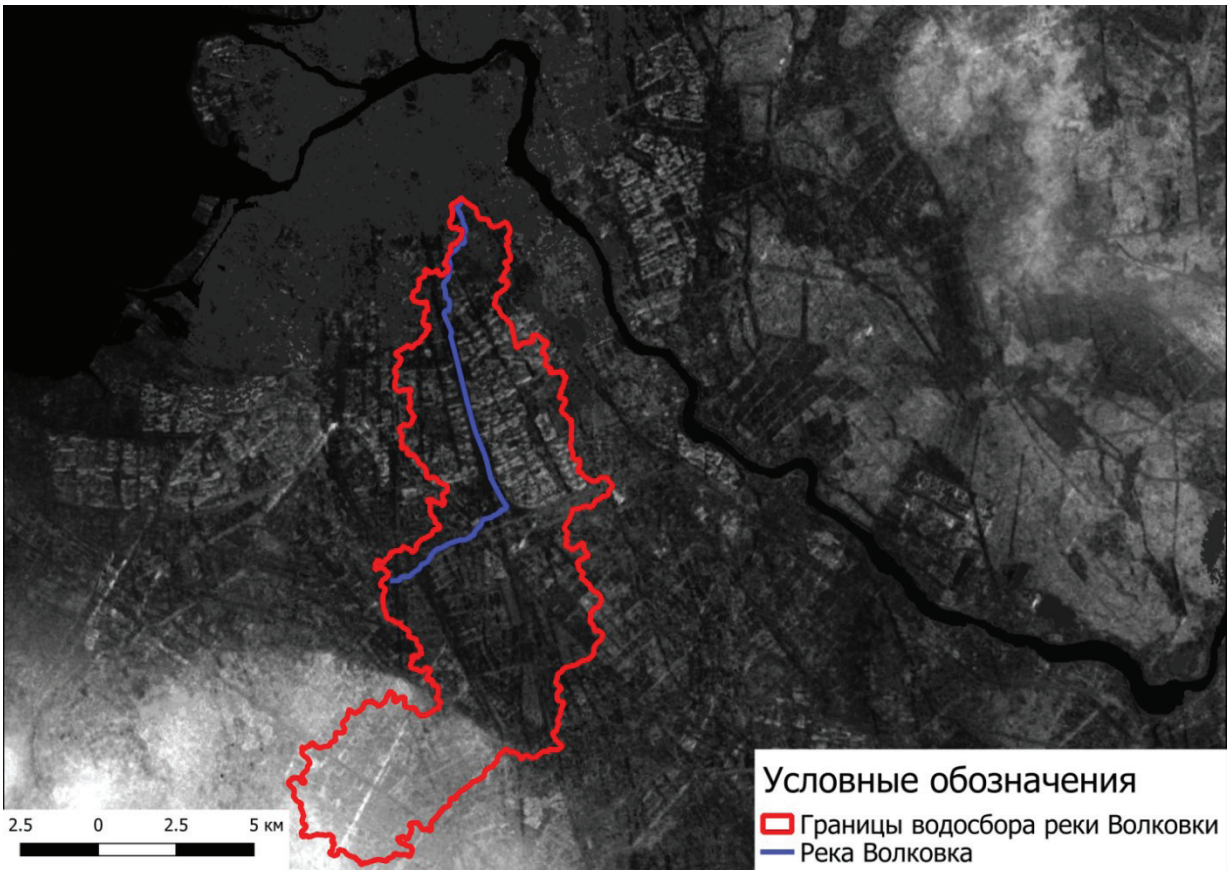


Рис. 4. Границы водосборного бассейна р. Волковки
Fig. 4. The Volkovka River watershed boundary

Точки созданного векторного слоя унаследовали в качестве атрибута значения высот из исходного растра ЦМР. Точки были распределены по сетке квадратов со сторонами 1 км по отдельным слоям электронной карты. Внутри каждого квадрата с помощью карты-схемы высот поверхности Санкт-Петербурга были определены значения истинных высот поверхности земли на исследуемом участке (рис. 5)[1]. После определения значений истинных высот поверхности в пределах квадратов в таблицах атрибутов соответствующих

[1] Карта-схема высот поверхности Санкт-Петербурга. Электронный ресурс: http://not.textual.ru/zverik/2/3/spb_ heights.gif (дата обращения 28.03.2023).

слоев точек были удалены все объекты со значениями, превышающими истинные значения высот поверхности. Слои точек с истинными значениями высот поверхности были объединены в один векторный слой.

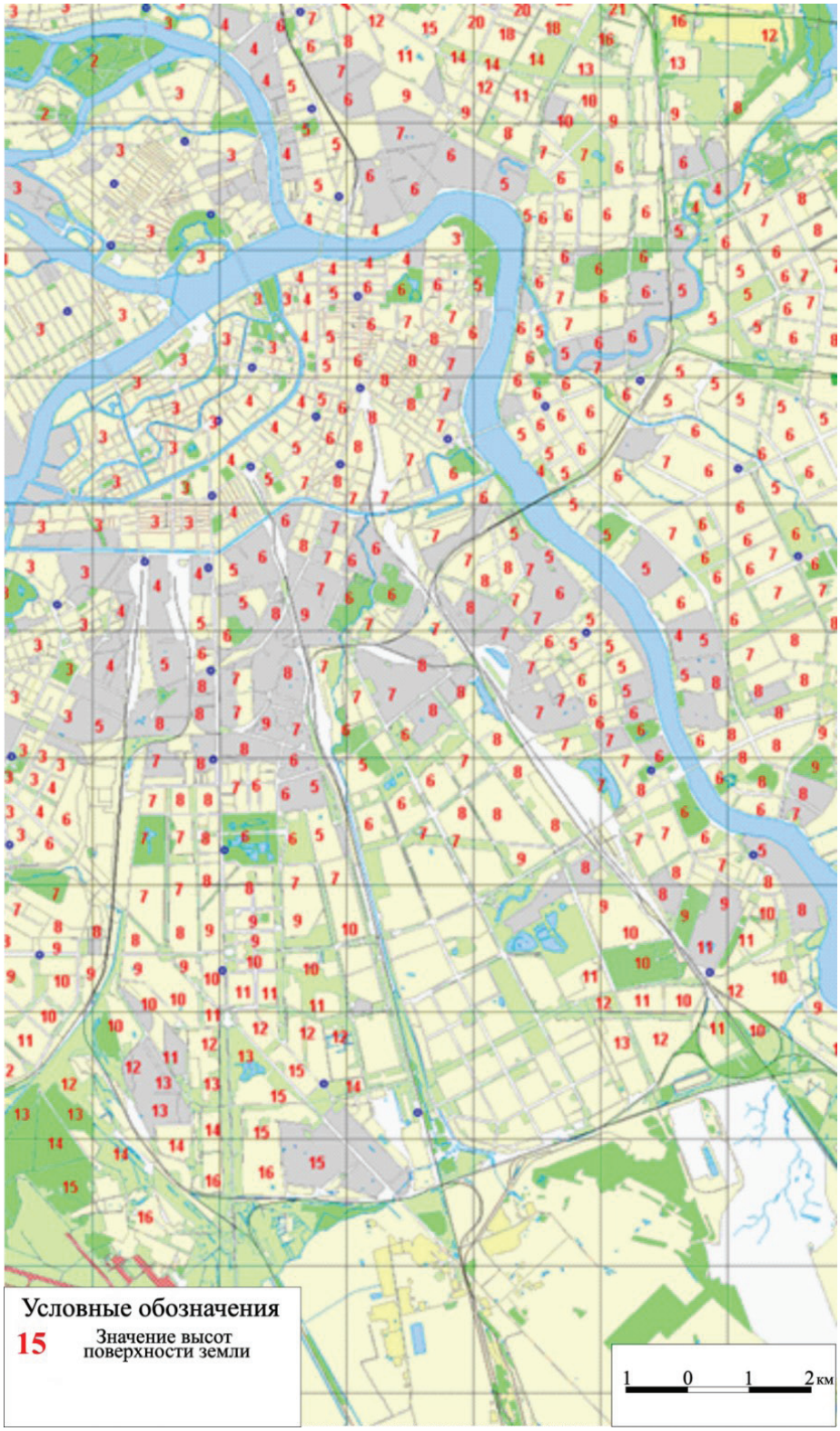


Рис. 5. Фрагмент карты-схемы высот поверхности Санкт-Петербурга
Fig. 5. Fragment of Saint Petersburg surface altitude map

Затем была выполнена модификация полученного векторного слоя для учета русел водотоков. Были созданы буферные зоны шириной 100 м вокруг линейных объектов водотоков. Слой полигонов буферных зон использовался для выборки точек высот поверхности по взаимному расположению объектов двух слоев в QGIS. Попавшие внутрь буферных зон точки были сохранены в новый слой и удалены из исходного слоя. Таким образом, были созданы 2 векторных слоя точек:

1. Точки высот внутри буферных зон водотоков;
2. Точки истинных высот поверхности.

В таблице атрибутов слоя точек внутри буферных зон водотоков было выполнено уменьшение значений высот с помощью инструмента «Калькулятор полей» QGIS. Точки в руслах водотоков были «углублены» на 5 м. После этого слой «углубленных» точек был объединен со слоем точек истинных высот Земли. По данным этого объединенного слоя точек в ГИС SAGA была выполнена интерполяция методом «Обратно взвешенное расстояние», и был получен растр высот, являющийся дважды модифицированной ЦМР ASTER GDEM. Эта модифицированная ЦМР была использована для выделения водосбора р. Волковки и частного водосбора р. Охты ниже плотины Ржевского водохранилища. Водосборные бассейны этих водотоков в высокой степени урбанизированы.

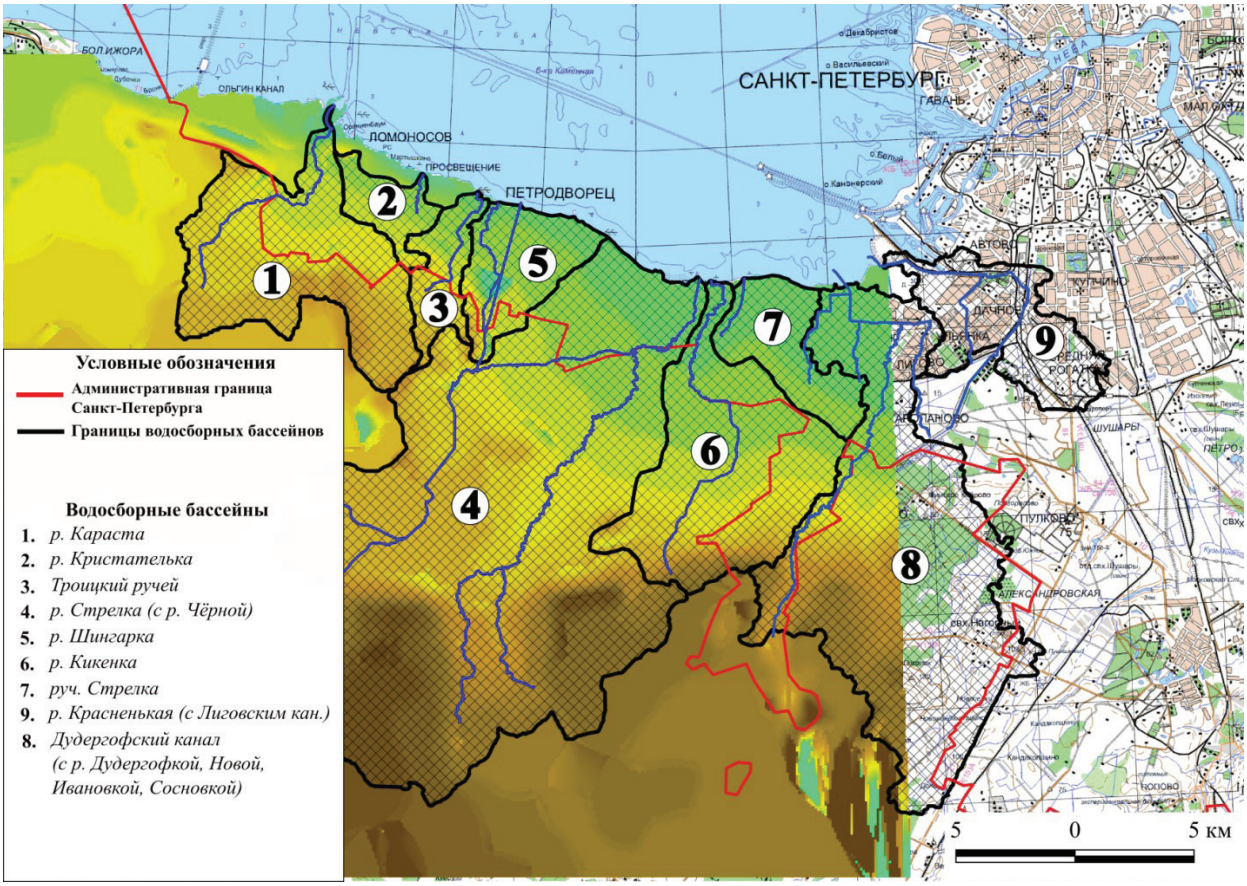


Рис. 6. Границы водосборов водотоков, впадающих в Невскую губу и восточную часть Финского залива с юга
Fig. 6. Boundaries of the watersheds, watercourses of which inflow into the Neva Bay and eastern part of the Gulf of Finland from the south

Таким образом, для каждого водосборного бассейна требовалось создавать свою собственную ЦМР путем модификации ЦМР ASTER GDEM. Разумеется, такой подход малоэффективен, т. к. необходимо выделить водосборы большого количества впадающих в Невскую губу и Восточную часть Финского зал. водотоков, на которых отсутствует мониторинг стока общего азота и фосфора. В связи с этим нами был выбран другой подход для определения границ водосборов исследуемых водотоков, суть которого изложена в разделе «Материалы и методы исследования» данной статьи. Разработанная нами методика была опробована для водотоков, впадающих в Невскую губу с юга. На основании созданной нами ЦМР было выделено 7 водосборов (рис. 6).

Водосборы р. Красненькой и Дудергофского канала с притоками были получены на основании модифицированной ЦМР ASTER GDEM. В связи с этим фактом созданная нами ЦМР на основании топографической карты не охватывает эти водосборы. В настоящее время аналогичная работа проводится для выделения границ водосборов водотоков, впадающих в Невскую губу и восточную часть Финского залива с севера (рис. 1). Результатом нашей работы будет являться определение модулей стока общего азота и фосфора с водосборов, сток с которых не учитывается в оценке поступления общего азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива с территории Санкт-Петербурга.

ВЫВОДЫ

Ключевым этапом представленной нами методики определения модулей стока общего азота и фосфора с водосборов, сток с которых не учитывается при оценке поступления общего азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива с территории Санкт-Петербурга, является выделение границ водосборных бассейнов. Нами рассмотрены возможности использования для этой цели глобальных ЦМР: ASTER GDEM, SRTM, WorldDEM. Наиболее подходящей для выполнения нашего исследования оказалась глобальная ЦМР ASTER GDEM. Нами была разработана методика модификации этой ЦМР для повышения точности выделения границ водосборных бассейнов урбанизированных территорий. Модификации заключается в фильтрации истинных значений высот поверхности Земли и искусственном уменьшении значений ЦМР в местах русел водотоков. Однако процесс такой модификации требует значительных трудозатрат и индивидуализации для каждого водосбора. Нами предложено создание ЦМР путем оцифровки горизонталей топографической карты, «расстановки» по горизонталям точечных объектов и их использования для интерполяции значений высот в среде ArcGIS. Разработанная нами методика была успешно применена для выделения границ водосборов водотоков, впадающих в Невскую губу с юга с помощью гидрологических функций ArcGIS.

Необходимо подчеркнуть, что задача выделения водосборов водотоков, впадающих в Невскую губу и восточную часть Финского залива с территории Санкт-Петербурга, до сих пор не решена. Представленные нами разработки могут помочь в решении данной задачи.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-27-10011) и при финансовой поддержке Санкт-Петербургского научного фонда.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by Russian Science Fund (grant No. 23-27-10011) and by Saint Petersburg Science Fund.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Косов Ю.В., Грибанова Г.И. Стратегия ЕС для региона Балтийского моря: проблемы и перспективы международного сотрудничества. Балтийский регион, 2016. Т. 8. № 2. С. 48–66.

Лачининский С.С., Семенова И.В. Позиционирование мирового приморского города Санкт-Петербурга в Балтийском регионе. Балтийский регион, 2015. № 3 (25). С. 62–75.

Мальцев К.А., Голосов В.Н., Гафуров А.М. Цифровые модели рельефа и их использование в расчетах темпов смыва почв на пахотных землях. Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки, 2018. Т. 160. Кн. 3. С. 514–530.

Мосин О.В. Основные экологические проблемы Балтийского моря и пути их решения. Балтийский регион, 2011. №1 (7). С. 41–53.

Нежиховский Р.А. Река Нева и Невская губа. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 84 с.

Потапова Т.М., Джиноридзе Е.Н., Королева В.П., Богданов В.Л., Шмелева И.В. Новые сведения о развитии процессов эвтрофикации литоральной зоны восточной части Финского залива. Вестник СПбГУ, 2005. Сер. 7. Вып. 4. С. 76–86.

Серебрицкий И.А., Григорьев И.А. Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге. Санкт-Петербург: Сезам-принт, 2018. 448 с.

Frumin G.T., Gildeeva I.M. Eutrophication of water bodies — a global environmental problem. Russian Journal of General Chemistry, 2014. V. 84. No. 13. P. 2483–2488. DOI: 10.1134/ S107036321413001.

HELCOM Baltic Sea Action Plan. HELCOM Ministerial Meeting. Krakow, Poland, 15 November 2007. 101 p.

Riegler G., Hennig S. D., Weber M. WORLDDEM — a novel global foundation layer. Proceedings of Joint ISPRS conference, 2015. V. XL-3/W2. P. 183–187. DOI:10.5194/ isprsarchives-XL-3-W2-183-2015

Stepanova E.V., Frumin G.T. Background nitrogen concentrations in the unmonitored and partially monitored rivers of the Gulf of Finland basin. Russian Journal of General Chemistry, 2014. V. 84. No. 13. P. 2592–2595. DOI: 10.1134/S1070363214130167

REFERENCES

Frumin G.T., Gildeeva I.M. Eutrophication of water bodies — a global environmental problem, Russian Journal of General Chemistry, 2014. V. 84. No. 13. P. 2483–2488. DOI: 10.1134/ S107036321413001.

HELCOM Baltic Sea Action Plan. HELCOM Ministerial Meeting. Krakow, Poland, 15 November 2007. 101 p.

Kosov Yu.V., Gribanova G.I. The EU Strategy for the Baltic Sea Region: Problems and prospects of international cooperation. Baltic Region, 2016. V. 8. No. 2. P. 48–66 (in Russian).

Lachininskii S.S., Semenova I.V. Positioning of the world seaside city of St. Petersburg in the Baltic Region. Baltic Region, 2015. V. 25. No. 3. P. 62–75 (in Russian).

Maltsev K.A., Golosov V.N., Gafurov A.M. Digital relief models and their use in calculating the rate of soil flushing on arable land. Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki (Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series), 2018. V. 160. No. 3. P. 514–530 (in Russian).

Mosin O.V. The main environmental problems of the Baltic Sea and ways to solve them. Baltic Region, 2011. V. 7. No. 1. P. 41–53 (in Russian).

Nezhihovsky R.A. Neva River and Neva Bay. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1981. 84 p. (in Russian).

Potapova T.M., Dzhinoridze E.N., Koroleva V.P., Bogdanov V.L., Shmeleva I.V. New information on the development of eutrophication processes in the littoral zone of the eastern part of the Gulf of Finland. Vestnik of Saint Petersburg University, 2005. Ser. 7. Iss. 4. P. 76–86 (in Russian).

Riegler G., Hennig S. D., Weber M. WORLDDEM — a novel global foundation layer. Proceedings of Joint ISPRS conference, 2015. V. XL-3/W2. P. 183–187. DOI: 10.5194/ isprsarchives-XL-3-W2-183-2015.

Serebritsky I.A., Grigoriev I.A. Environmental protection, nature management and environmental safety in St. Petersburg. Saint-Petersburg: Sesame Print, 2018. 448 p.

Stepanova E.V., Frumin G.T. Background nitrogen concentrations in the unmonitored and partially monitored rivers of the Gulf of Finland basin. Russian Journal of General Chemistry, 2014. V. 84. No. 13. P. 2592–2595. DOI: 10.1134/S1070363214130167.

УДК: 528.8 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-318-329**

А.А. Гостева[1], **А.К. Матузко**[2], **О.Э. Якубайлик**[3]

АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОТЕРИ ДАННЫХ LANDSAT 8–9 COLLECTION 2 LEVEL 2

АННОТАЦИЯ

Применение тепловых снимков для анализа городских территорий представлено в материалах «ИнтерКарто. ИнтерГИС» на примере г. Красноярска по данным Landsat 8. Новые данные Landsat 8–9 collection 2 level 2 стали доступны в марте 2021 г. Данные были дополнены ценными научными продуктами, такими как параметры атмосферы (спектральный коэффициент пропускания атмосферы, восходящее излучение и нисходящее излучение), значения температуры поверхности Земли, тепловое излучение, маска оценки качества. Детальное изучение данных показало, что на многие исследуемые авторами ранее территории данные не предоставлены в полном объеме. Существует частичная или полная потеря данных в слое коэффициента излучения, и как следствие — потери повторяются в слоях температуры поверхности Земли. Такая же ситуация с потерей данных наблюдается в ряде других крупных российских городов. Сложившаяся ситуация требовала детального изучения документации по описанию алгоритмов Landsat 8–9. Изучив все этапы выполнения алгоритма, авторам удалось восстановить последовательность вычислений, сохранив дополнительные параметры атмосферы. Потерянные данные в канале коэффициента излучения были заменены новым слоем, в котором коэффициенты излучения поверхности были рассчитаны через вегетационный индекс NDVI. В результате авторами проведена апробация работы предложенного алгоритма на территории г. Красноярска. Результатом выполнения алгоритма являются слои со значениями температуры поверхности без потери данных, за исключением сцен с повышенной облачностью. Наблюдается незначительное расхождение значений температуры поверхности при использовании описанного алгоритма и исходных данных за счет применения разных источников для определения коэффициента излучения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Landsat 8–9, температура, ДЗЗ, ГИС LST, тепловые снимки

[1] Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Академгородок, д. 50, Красноярск, Россия, 660036,
e-mail: **agosteva@icm.krasn.ru**

[2] Институт вычислительного моделирования СО РАН, Академгородок, д. 50/44, Красноярск, Россия, 660036,
e-mail: **akmatuzko@icm.krasn**

[3] Институт вычислительного моделирования СО РАН, Академгородок, д. 50/44, Красноярск, Россия, 660036,
e-mail: **oleg@icm.krasn.ru**

Anna A. Gosteva[1], **Aleksandra K. Matuzko**[2], **Oleg E. Yakubailik**[3]

SURFACE TEMPERATURE ALGORITHM FOR DATA LOSS RECOVERY LANDSAT 8–9 COLLECTION 2 LEVEL 2

ABSTRACT

The use of thermal images for the analysis of urban areas is presented in Proceedings of InterCarto. InterGIS, on the example of the city of Krasnoyarsk according to Landsat 8 data. New Landsat 8–9 collection 2 level 2 data became available in March 2021. The data has been supplemented with valuable scientific products such as atmospheric parameters (atmospheric spectral transmittance, up-going radiation and down-going radiation), earth surface temperatures, thermal radiation, quality assessment mask. A detailed study of the data showed that for many territories previously studied by the authors, data were not provided in full. There is partial or complete loss of data in the emissivity layer, and as a consequence the loss is repeated in the Earth's surface temperature layers. The same situation with data loss is observed in a number of other large Russian cities. The current situation required a detailed study of the documentation describing the Landsat 8–9 algorithms. Having studied all the stages of the algorithm execution, the authors managed to restore the sequence of calculations, while retaining additional atmospheric parameters. The lost data in the emissivity channel has been replaced with a new layer computed via NDVI. As a result, the authors tested the operation of the proposed algorithm on the territory of the city of Krasnoyarsk. The result of the algorithm execution is layers with surface temperature values without data loss, except for scenes with high cloudiness. There is a slight discrepancy between the surface temperature values when using the described algorithm and initial data, due to the use of different sources to determine the emissivity.

KEYWORDS: Landsat 8–9, temperature, remote sensing, LST GIS, thermal images

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдение поверхности Земли позволяет получать информацию об антропогенных и природных объектах, изучать их свойства, наблюдать процесс изменения, соблюдать данные о различных физических свойствах [*Campbell*, 2011].

Температура поверхности является одной из важнейших климатических характеристик, а также важным параметром физических процессов на поверхности земли в локальном и глобальном масштабах [*Грищенко*, 2019; 2021]. Несмотря на то, что существует множество публикаций о методах и алгоритмах расчета температуры земной поверхности с использованием данных дистанционного зондирования Земли [*Wan*, 2004], точное определение показателей остается сложной задачей [*Irons*, 2013]. Новая коллекция данных Landsat дает новые возможности для определения значений температуры земной поверхности.

Продукты Landsat Collection 2 Surface Temperature (ST) генерируются из нескольких источников входных данных и атмосферных профилей, включая глобальный набор данных NASA об излучательной способности ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and

[1] Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center, 50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia, *e-mail:* **agosteva@icm.krasn.ru**

[2] Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICM SB RAS), 50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia, *e-mail:* **akmatuzko@icm.krasn.ru**

[3] Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICM SB RAS), 50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia, *e-mail:* **oleg@icm.krasn.ru**

Reflection Radiometer) GED (Global Emissivity Dataset). Таким образом пользователь напрямую получает доступ к температуре поверхности Земли.

ASTER GED содержит области с отсутствующими данными о среднем коэффициенте излучения, необходимыми для успешного создания продукта ST. Если отсутствует информация ASTER GED, в этих областях будут отсутствовать данные о температуре земной поверхности. Области с отсутствием данных представлены на рисунке 1.

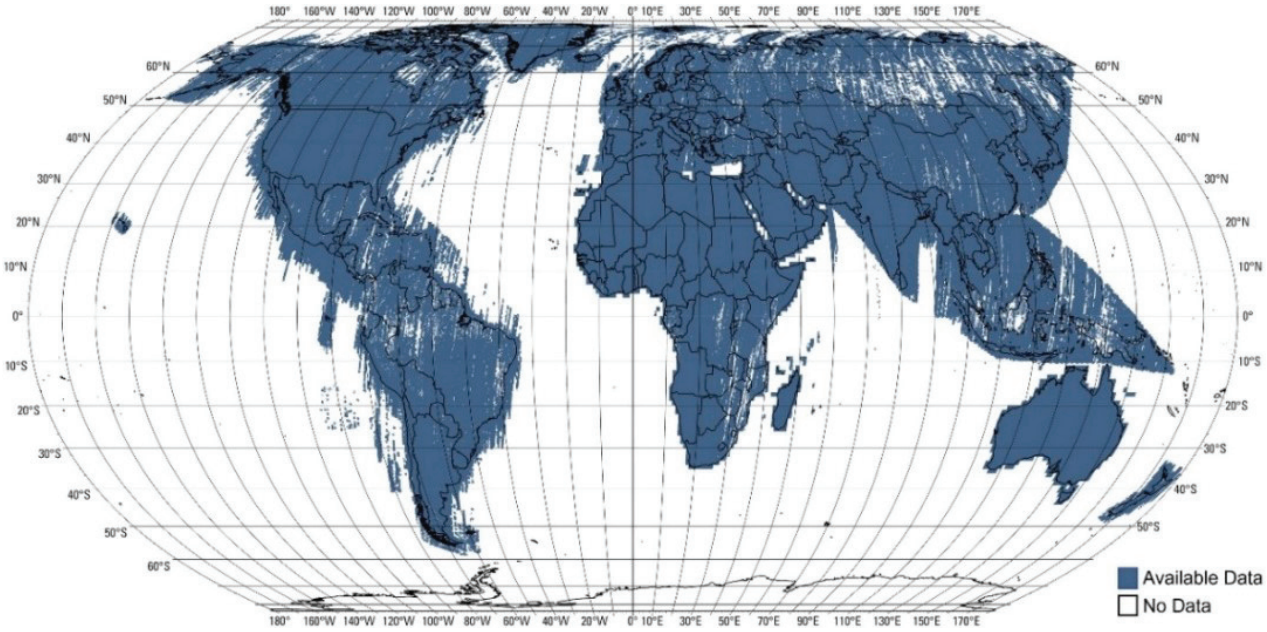


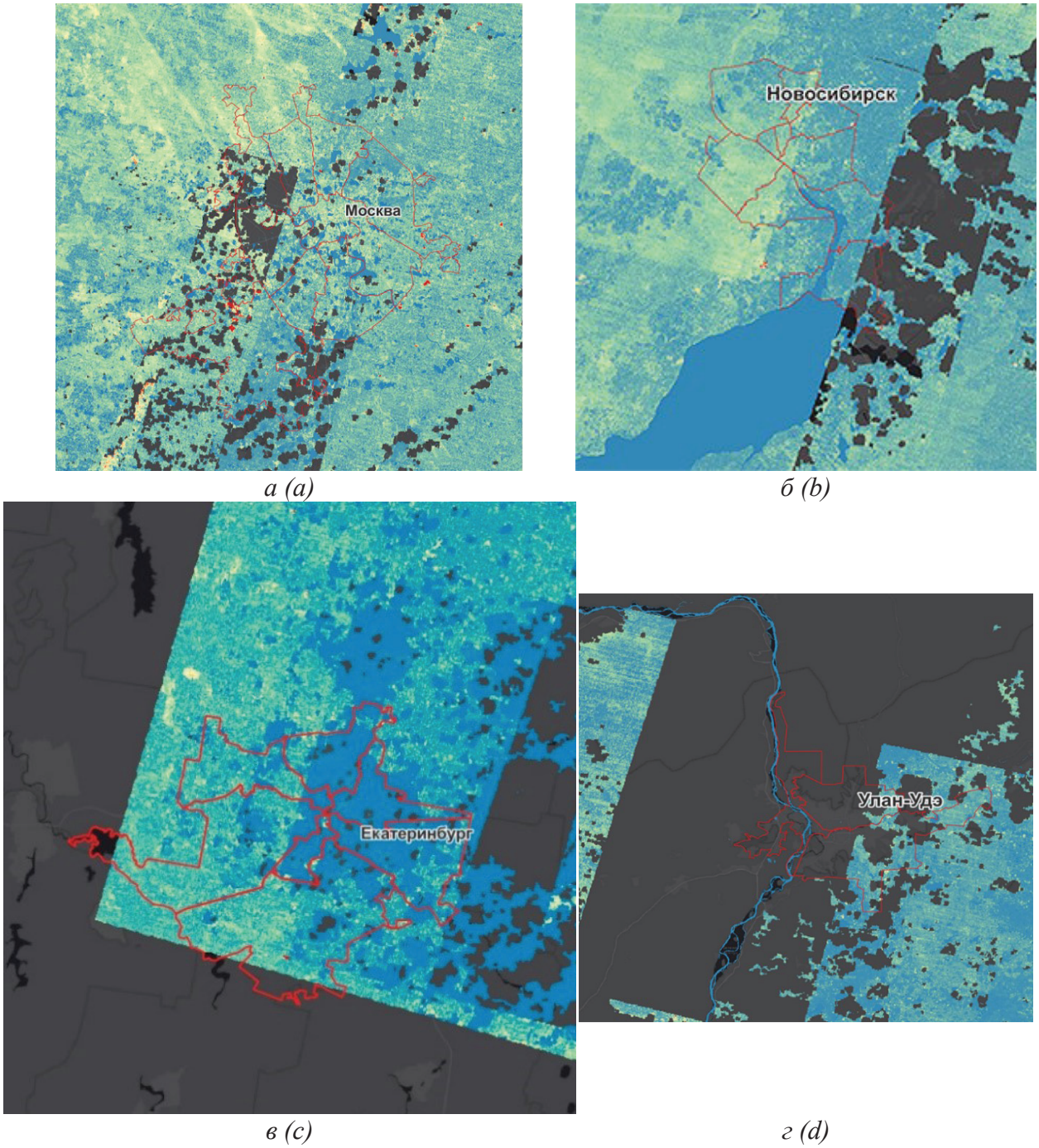
Рис. 1. Мировое покрытие данными ASTER GED.
Электронный ресурс: https://www.usgs.gov/media/images/aster-ged-emissivity-coverage (дата обращения 01.10.2022)
Fig. 1. Worldwide coverage of ASTER GED data.
Web resource: https://www.usgs.gov/media/images/aster-ged-emissivity-coverage (accessed 01.10.2022)

На рис. 2 приведены примеры отсутствия данных на территории крупных российских городов. В Москве и Новосибирске только некоторые районы остаются без покрытия. Территория Улан-Удэ практически полностью находится в зоне «no data».

Такая же ситуация наблюдается с покрытием данными г. Красноярска. При рассмотрении его территории выявлено, что потеря данных здесь всего 25 % (рис. 3), но в предыдущих работах авторы описывали, что часть этих территорий попадают во внутригородские постоянные острова тепла, которые наблюдаются последние 10 лет [*Гостева*, 2019].

Сложившаяся ситуация не позволяет в полном объеме использовать значения температуры поверхности из новой коллекции. После анализа новой коллекции данных появилась идея заменить ASTER GED, проведя самостоятельный расчет коэффициента излучения, как это было реализовано на предыдущей коллекции Landsat [*Гостева*, 2018]. Далее с использованием полученных значений коэффициента излучения и параметров атмосферы, которыми была дополнена новая коллекция данных, рассчитывается температура поверхности на всю исследуемую территорию. Здесь есть два пути развития: пользоваться для вычисления температуры поверхности алгоритмами, описанными авторами ранее [*Гостева*, 2019], или повторить последовательность определения

температуры поверхности, применяемую поставщиками данных для Landsat 8–9 Collection 2 Level 2, заменив слой коэффициента излучения с отсутствующими значениями на слой с коэффициентами излучения поверхности, полученными применением индекса NDVI.



а (a) *б (b)*

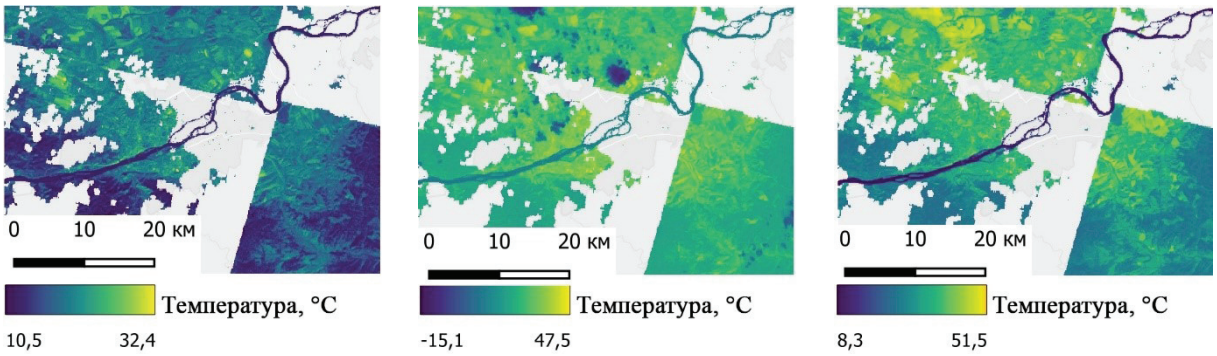
в (c) *г (d)*

Рис. 2. Температуры поверхности:
а) Москва; б) Новосибирск; в) Екатеринбург; г) Улан-Удэ
Fig. 2. Surface temperatures:
a) Moscow; b) Novosibirsk; c) Yekaterinburg; d) Ulan-Ude

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С марта 2021 г. стали доступны новые уровни обработки Landsat Collection 2 Level 2. Алгоритм вычисления температуры земной поверхности по спутниковым данным Landsat 8–9 описан в документации. Пользователь может получить доступ к значениям температуры, скачивая слой с температурой без дополнительных слоев. В названии файла указана дата снимка, уровень обработки (Level 1 или Level 2) и какие данные содержатся. Например, значения температуры находятся в слое с названием ST_B10.TIF.

На рис. 3 представлена территория г. Красноярска, данные слоя ST_B10.TIF Landsat Collection 2 Level 2 на даты 10.07.21, 20.05.20, 07.09.19 переведены в значения °C.



а (a) *б (b)* *в (c)*

Рис. 3. Значения температуры поверхности: а) 07.09.2019; б) 10.07.2021; в) 20.05.2020
Fig. 3. Surface temperature values: a) 07.09.2019; b) 10.07.2021; c) 20.05.2020

Алгоритм определения температуры поверхности описывается несколькими этапами, в результате получаются значения для каждого пикселя Landsat. Для определения этих значений используются внешние источники данных для параметров атмосферы и коэффициента излучения. Используют параметры из наборов данных MERRA-2 и GEOS-5 FP-IT в качестве вспомогательных входных данных. Это глобальные наборы данных, поэтому алгоритм применим во всем мире.

Вычисление атмосферных параметров происходит при использовании MODTRAN — компьютерной программы, разработанной для моделирования атмосферного распространения электромагнитного излучения в спектральном диапазоне от 0,2 до 100 мкм. Это охватывает спектр от среднего ультрафиолета до дальнего инфракрасного диапазона.

Для того чтобы определить вклад атмосферы, влияющей на итоговое значение температуры поверхности, необходимо определить параметры атмосферы. Вычисление атмосферных параметров включает спектральный коэффициент пропускания атмосферы, восходящее излучение и нисходящее излучение, а также создает полосу теплового излучения на основе тепловой полосы Landsat. Вычисление состоит из нескольких шагов.

Первый шаг — это чтение нескольких файлов: файл заголовка точек сетки, чтобы получить количество точек сетки, а также количество строк и столбцов сетки, затем файл с количеством высот и значений высот.

Для этих точек MODTRAN считывается файл высот сетки, и значения помещаются в структуру modtran_points на отметке 0. Существует короткая версия каждой отметки 0 для имени каталога высот и длинная версия для научных расчетов.

Затем для каждой точки MODTRAN рассчитываются спектральный коэффициент пропускания атмосферы, восходящее и нисходящее излучение. Этот процесс начинается с

файла спектрального отклика датчика, который представляет собой предопределенный файл, содержащий строки с длинами волн и спектральными значениями.

Схематичное описание работы MODTRAN показано на рисунке 4.

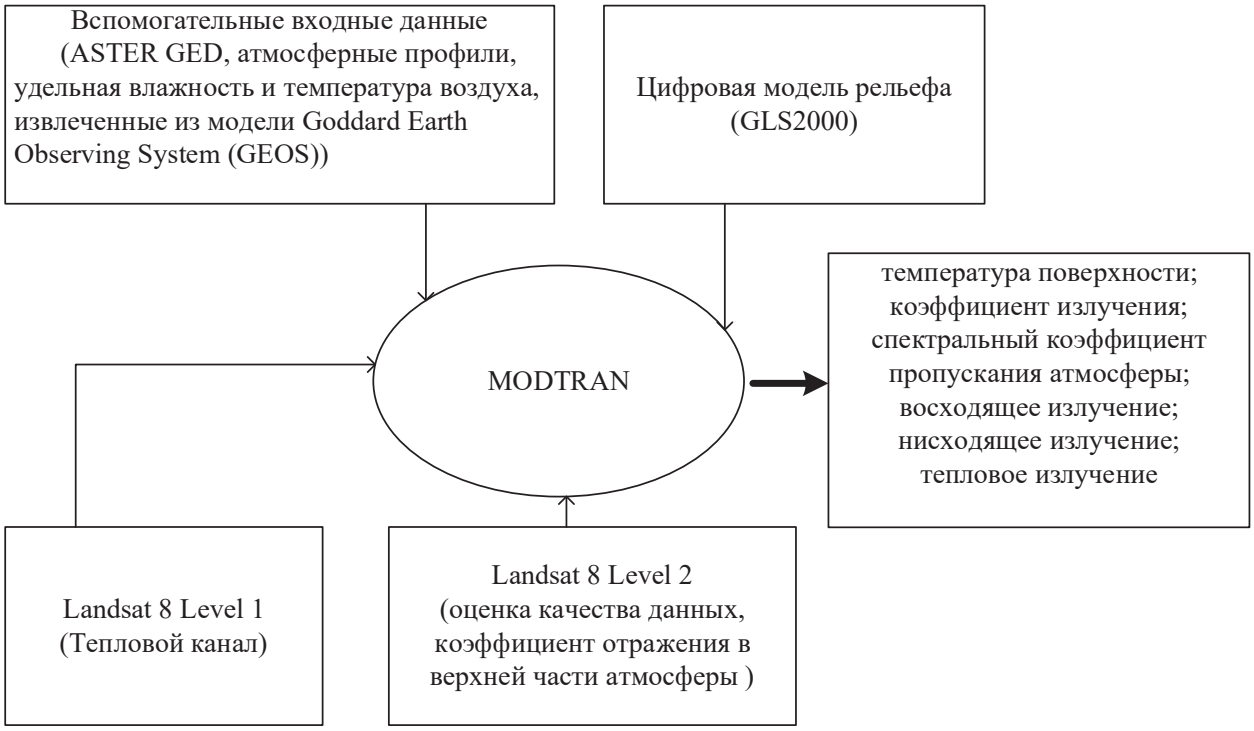


Рис. 4. Схема обработки данных Landsat 8–9 Collection 2 Level 2
Fig. 4. Data processing scheme Landsat 8–9 Collection 2 Level 2

В результате полученные данные доступны для загрузки на сайте агрегатора космических снимков EarthExplorer[1]; для скачивания необходимо выбрать Landsat 8–9 Collection 2 Level 2. В списке файлов представлены слои атмосферных параметров, сформированные по данным MODTRAN (они выделены на рис. 5). Доступны такие данные, как тепловое излучение (ST_TRAD), восходящее излучение (ST_URAD), спектральный коэффициент пропускания атмосферы (ST_ATRAN), нисходящее излучение (ST_DRAD).

Для того чтобы самостоятельно провести вычисление температуры поверхности, необходимо загрузить все данные с параметрами атмосферы, слой B4 (красный), B5 (ближний инфракрасный) и сопроводительный файл с метаданными. Порядок действий для определения температуры поверхности схематично представлен на рисунке 6.

Для определения температуры поверхности необходимо произвести расчет яркости (L), учитывая такие параметры влияния атмосферы, как тепловое излучение (thermal radiance — L_{th}), восходящее излучение (upwelled radiance — L_{uw}), спектральный коэффициент пропускания атмосферы (atmospheric Transmittance — τ), нисходящее излучение (downwelled Radiance — L_{dw}) (рис. 7).

[1] Сайт для поиска, просмотра и загрузки космических снимков из архивов Геологической службы США. Электронный ресурс: https://earthexplorer.usgs.gov (дата обращения 01.04.2023).

Рис. 5. Структура исходных данных
Fig. 5. The structure of the initial data

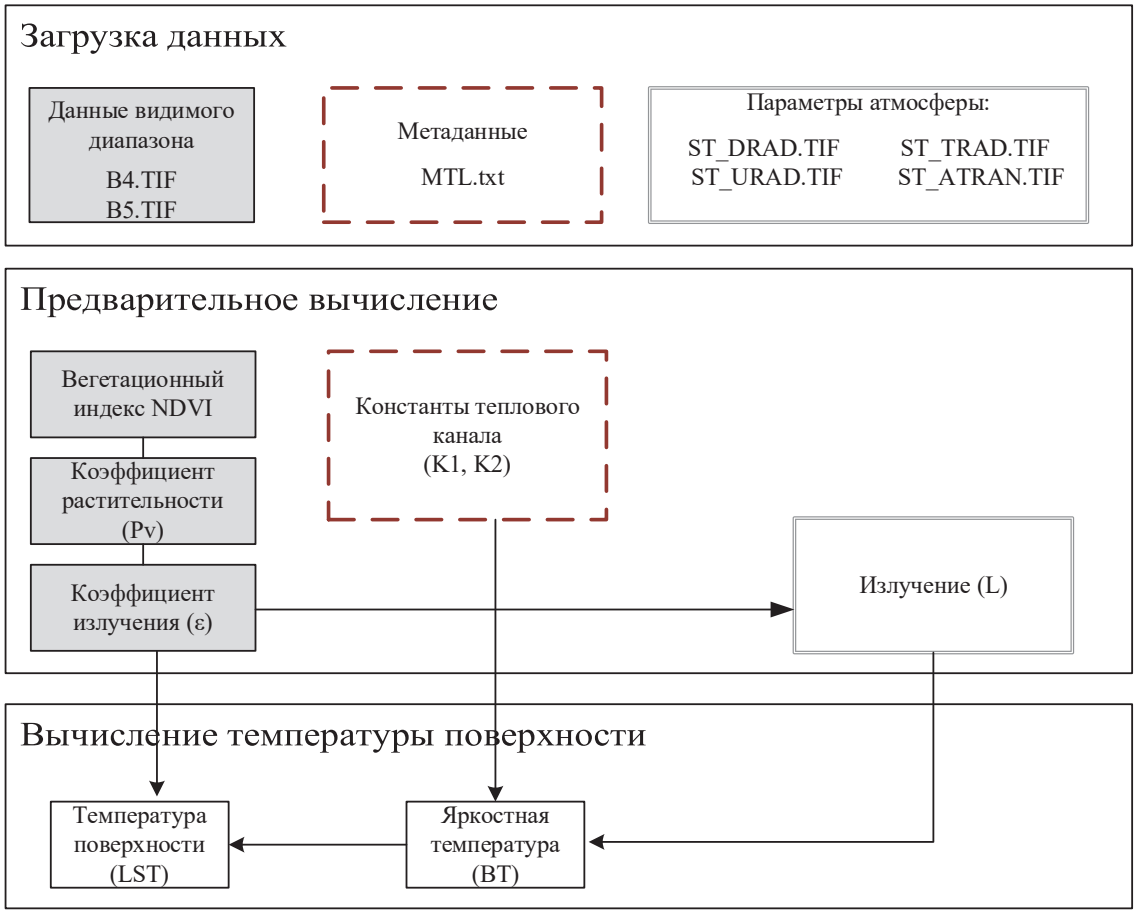


Рис. 6. Схема вычисления температуры поверхности
Fig. 6. Scheme for calculating the surface temperature

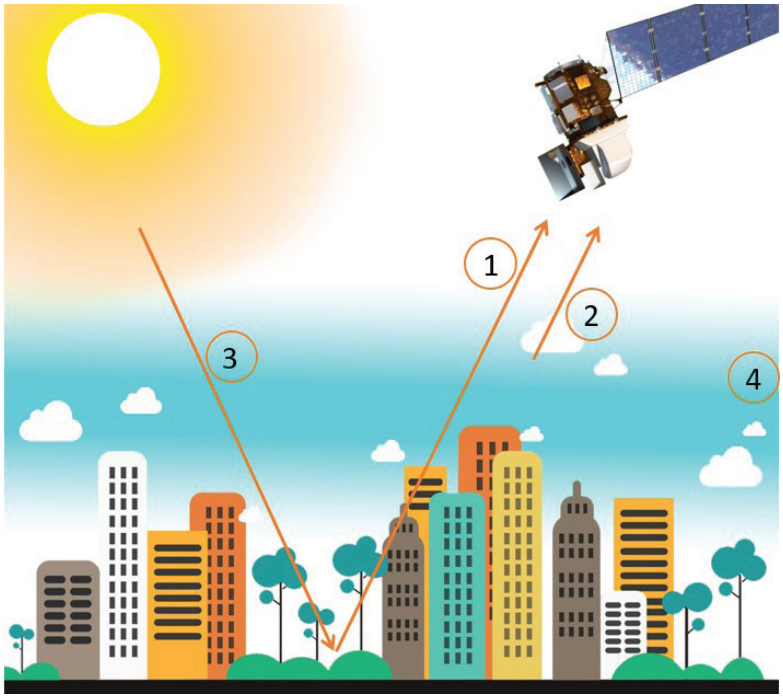


Рис. 7. 1 — тепловое излучение, 2 — восходящее излучение, 3 — нисходящее излучение, 4 — спектральный коэффициент пропускания атмосферы
Fig. 7. 1 — thermal radiance, 2 — upwelled radiance, 3 — downwelled radiance, 4 — atmospheric transmittance

Для вычисления температуры поверхности сначала необходимо произвести вычисление яркости по формуле (1) [*Parastatidis*, 2017]:

$$L = \frac{L_{th} - L_{uw} - (1 - \varepsilon)L_{dw}\tau}{\tau} \quad (1),$$

где ε — коэффициент излучения.

Расчет коэффициента излучения ε состоит из 3 шагов. Первый шаг — вычислить NDVI, используя следующее уравнение (2):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (2),$$

где ρ_{NIR} — отражение в ближней инфракрасной области спектра,
ρ_{RED} — отражение в красной области спектра [*Sobrino*, 2004].

Далее рассчитывается формула

$$\varepsilon = 0.004 * P_v + 0.986 \quad (3).$$

Необходимо определить P_v — коэффициент растительности, используя формулу (4) [*Campbell*, 2011]:

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}\right)^2 \quad (4).$$

Далее вычисляется яркостная температура (BT), которая представляет собой эффективную температуру, видимую спутником при предполагаемом коэффициенте излучения, равном единице (5):

$$BT = \frac{K_2}{ln(\frac{K_1}{L} + 1)} \quad (5),$$

где K_2 и K_1 — константы теплового преобразования для конкретных полос, которые доступны в файле метаданных.

Последним этапом вычисляется температура поверхности (land surface temperature — LST) по формуле (6):

$$LST = \frac{BT}{1 + (\frac{\lambda * BT}{c_2} ln\, \varepsilon)} - 273{,}15 \quad (6),$$

где T — температура спектральной яркости излучения (°C),
λ — длина волны света, λ для 10-го канала Landsat-8,
c_2 = h*c/k = 1.4388*10−2m K = 14388 μm K,
ε — коэффициент излучения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После анализа результатов вычислений по описанному выше алгоритму проведено сравнение полученных и исходной значений температуры. Для сравнения полученных результатов из значений температуры, вычисленных по новому алгоритму, вычитаем значения, представленные в коллекции 2 Landsat 8–9. Были выбраны 3 даты 10.07.21, 20.05.20, 07.09.19.

На рассматриваемой территории можно выделить 4 основных типа поверхности: водные объекты, зеленая зона (лес, растительность), сельскохозяйственные поля, строения (жилые, общественные, промышленные). В пределах одной сцены были выбраны 40 точек, по 10 точек на каждый из 4 описанных типов поверхности. На рисунке 8 обозначены точки; выбор их расположения ограничен наличием данных Landsat 8–9 Collection 2 Level 2.

На рисунке 9 представлены результаты сравнения снимков по типу поверхности на исследуемые даты.

Наблюдаемое расхождение между полученными значениями можно объяснить тем, что для получения коэффициента излучения в источнике ASTER GED для всех сцен используются одни значения коэффициента излучения без учета смены сезонов. Для каждой сцены были определены свои значения коэффициентов излучения; учитывая особенности расположения исследуемой территории, авторы настаивают на необходимости этих вычислений.

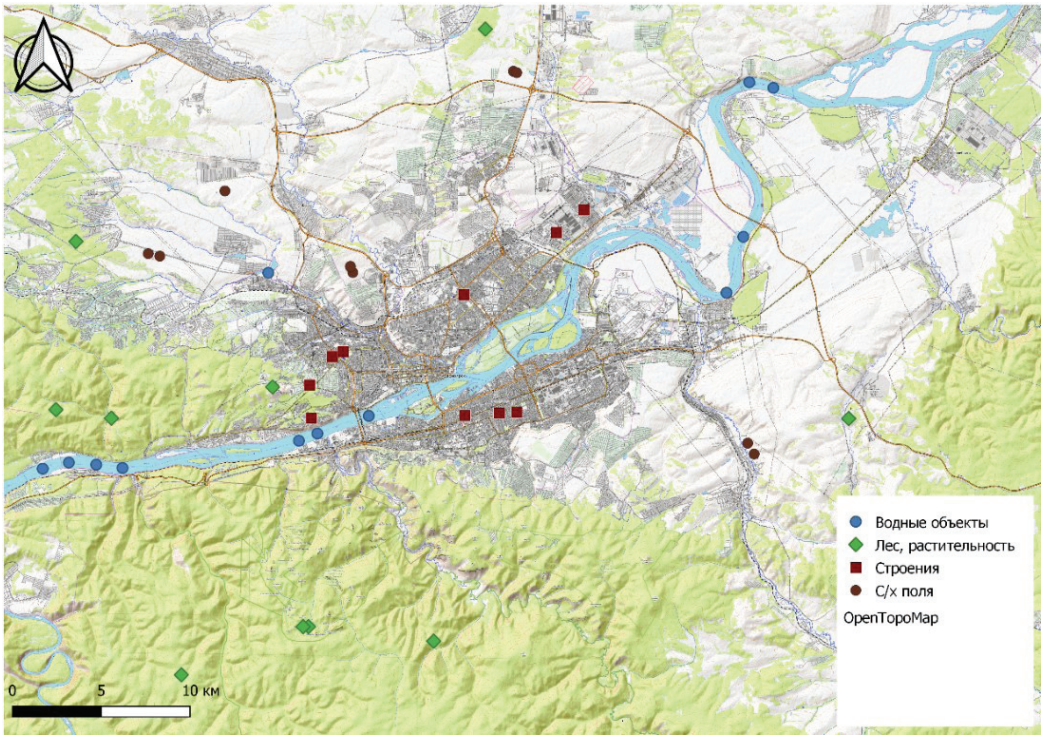
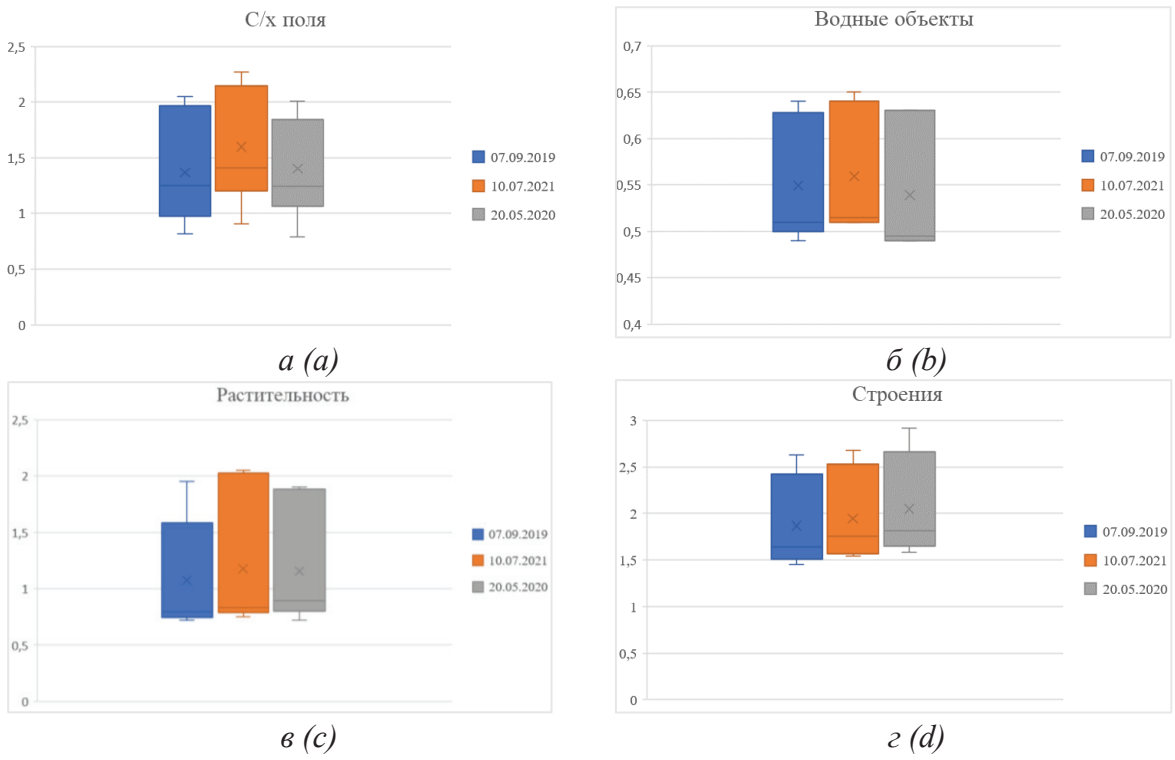


Рис. 8. Точечные объекты, распределенные по 4 типам поверхности
Fig. 8. Point objects distributed over 4 types of surface



а (a) *б (b)*

в (c) *г (d)*

Рис. 9. Результаты сравнения снимков:
а) сельскохозяйственные поля; б) водные объекты; в) растительность; г) строения
Fig. 9. Comparison results: a) agricultural fields; b) water; c) vegetation; d) buildings

ВЫВОДЫ

Исследования значений температуры по космическим снимкам Landsat 8–9 Collection 2 Level 2 имеют большую значимость для решения большого количества различных задач. В связи с этим было необходимо восстановить пустые значения, рассчитав коэффициент излучения с использованием нормализованного относительного индекса растительности.

Таким образом, произведя расчет коэффициента излучения и повторив последовательность вычисления, которая предусмотрена производителями Landsat 8–9, были восстановлены потерянные данные и возможность получения значений температуры поверхности. В результате проведенного исследования полученные значения покрывают всю территорию исследования, могут быть автоматизированы и растиражированы на всю мировую поверхность.

Полученные значения температуры максимально приближены к значениям температуры представленных Landsat 8–9 Collection 2 Level 2. Это было проверено на 4 разных типах поверхности; максимальное схождение значений определено на водных объектах, а максимальные расхождения — на классе строений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гостева А.А., Матузко А.К., Якубайлик О.Э. Дистанционные методы в изучении температуры поверхности земли в городах (на примере г. Красноярска, Россия). ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф., 2018. Т. 24. Ч. 2. С. 195–205. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-195-205.

Гостева А.А., Матузко А.К., Якубайлик О.Э. Выявление изменений городской среды на основе спутниковых данных инфракрасного диапазона (на примере Красноярска) ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф., 2019. Т. 25. Ч. 2. С. 90–100. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-90-100.

Грищенко М.Ю., Калитка Л.С. Изучение сезонной изменчивости теплового поля Краснодара по космическим снимкам со спутника Landsat 8. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф., 2019. Т. 25. Ч. 2. С. 101–111. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-101-111.

Грищенко М.Ю., Лучер Д.А., Бочарников М.В. Оценка возможности дешифрирования растительности по тепловым космическим снимкам на примере Южного Урала и Кузнецкого Алатау. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф., 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 496–507. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-496-507.

Campbell J.B., Wynne R.H. Introduction to remote sensing. 5th Edition. New York: The Guilford Press, 2011. 667 p.

Irons J.R., Loveland T.R. Eighth Landsat satellite becomes operational. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2013. V. 79. No. 5. P. 398–401.

Parastatidis D., Mitraka Z., Chrysoulakis N., Abrams M. Online global land surface temperature estimation from Landsat. Remote Sensing, 2017. V. 9. No. 12. Art. 1208. DOI: 10.3390/rs9121208.

Sobrino J., Jimenez J.-C., Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. Remote Sensing of Environment, 2004. V. 90. Iss. 4. P. 434–440. DOI: 10.1016/j.rse.2004.02.003.

Wan Z., Zhang Y., Zhang Q., Li Z. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature. International Journal of Remote Sensing, 2004. No. 25 (1). P. 261–274. DOI: 10.1080/0143116031000116417.

REFERENCES

Campbell J.B., Wynne R.H. Introduction to remote sensing. 5th Edition. New York: The Guilford Press, 2011. 667 p.

Gosteva A.A., Matuzko A.K., Yakubailik O.E. Remote methods in studying the temperature of the earth's surface in cities (on the example of Krasnoyarsk, Russia). InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International Conference, 2018. V. 24. Part 2. P. 195–205 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-195-205.

Gosteva A.A., Matuzko A.K., Yakubailik O.E. Identification of changes in urban environment on the basis of the satellite data of the infrared range (on the example of Krasnoyarsk). InterCarto. InterGIS. Proceedings of International conference, 2019. V. 25. Part 2. P. 90–100 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-90-100.

Grishchenko M.Yu., Kalitka L.S. Study of the seasonal variability of the Krasnodar thermal field based on space images from the Landsat 8 satellite. InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International conference, 2019. V. 25. Part 2. P. 101–111 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-101-111.

Grishchenko M.Yu., Lucher D.A., Bocharnikov M.V. Estimation of the possibility of interpretation of vegetation on the basis of thermal satellite images on the example of the Southern Urals and Kuznetsk Alatau. InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International conference, 2022. V. 28. Part 1. P. 496–507 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-496-507.

Irons J.R., Loveland T.R. Eighth Landsat satellite becomes operational. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2013. V. 79. No. 5. P. 398–401.

Parastatidis D., Mitraka Z., Chrysoulakis N., Abrams M. Online global land surface temperature estimation from Landsat. Remote Sensing, 2017. V. 9. No. 12:1208. DOI: 10.3390/rs9121208.

Sobrino J., Jimenez J.-C., Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. Remote Sensing of Environment, 2004. V. 90. Iss. 4. P. 434–440. DOI: 10.1016/j.rse.2004.02.003.

Wan Z., Zhang Y., Zhang Q., Li Z. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature. International Journal of Remote Sensing, 2004. No. 25 (1). P. 261–274. DOI: 10.1080/0143116031000116417.

УДК: 502.1+004.9 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-330-345**

В.Ю. Третьяков[1], **А.А. Заколюкина**[2], **С.М. Клубов**[3,4,5]

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОДНОРОДНОСТИ СТВОРОВ МОНИТОРИНГА РЕК ПО ОПТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ — ИНДЕКСУ МУТНОСТИ

АННОТАЦИЯ

Важнейшей государственной задачей является сохранение и улучшение экологического состояния водных ресурсов. Для этого необходим мониторинг расходов и гидрохимических характеристик речного стока. Без этих данных невозможно определение экологически обоснованных норм антропогенного воздействия на водные экосистемы. Очевидно, что условием репрезентативности данных мониторинга является однородность водного тела реки на створе мониторинга. Разумеется, регулярная проверка однородности створов мониторинга по всем определяемым гидрохимическим характеристикам является крайне трудоемкой задачей. В статье представлена методика проверки однородности створа мониторинга с помощью анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Эта методика включает в себя расчеты индекса мутности NDTI на основании спутниковых снимков Sentinel-2 в среде ГИС ArcGIS и QGIS в пределах буферной зоны створа мониторинга, расчеты расстояний между центрами ячеек матрицы значений NDTI и началом створа мониторинга (берегом реки), экспорт результатов в файлы таблиц Microsoft Excel, статистический анализ однородности значений индекса мутности NDTI вдоль створа мониторинга. Анализ однородности выполняется с помощью критериев Стьюдента и Фишера в случае соответствия распределений значений NDTI нормальному закону распределения, и с помощью критериев Уилкоксона-Манна-Уитни и Зигеля-Тьюки — в случае обратном. Обработка данных выполняется с помощью ряда моделей рабочих потоков и компьютерных программ на алгоритмическом языке Python в среде ArcGIS и QGIS, программы, разработанной в среде создания приложений Lazarus и ряда программ, созданных в среде системы компьютерной алгебры Mathcad. Все модели и программы созданы В.Ю. Третьяковым. Приведен пример применения методики для оценки однородности индекса мутности на створе мониторинга на р. Неве ниже впадения в нее р. Славянки в г. Санкт-Петербурге. Разумеется, однородность створа мониторинга по значениям индекса мутности не гарантирует его однородности по всем гидрохимическим параметрам, однако отсутствие однородности по индексу мутности может служить признаком неоднородности речного потока на створе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дистанционное зондирование Земли, анализ однородности, створ мониторинга

[1] Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, 10-я линия Васильевского острова, д. 33-35, Санкт-Петербург, Россия, 199178, *e-mail:* **v_yu_tretyakov@mail.ru**

[2] Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, 10-я линия Васильевского острова, д. 33-35, Санкт-Петербург, Россия, 199178, *e-mail:* **st110668@student.spbu.ru**

[3] Российский государственный гидрометеорологический университет, Экологический факультет, Рижский пр-т., д. 11, Санкт-Петербург, Россия, 190103, *e-mail:* **klubov_stepan@mail.ru**

[4] Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, 10-я линия Васильевского острова, д. 33-35, Санкт-Петербург, Россия, 199178, *e-mail:* **klubov_stepan@mail.ru**

[5] 3 ГБУ ДО ДТ «У Вознесенского моста» Адмиралтейского района Санкт-Петербурга, Гражданская ул., д. 26, Санкт-Петербург, Россия, 190031, *e-mail:* **klubov_stepan@mail.ru**

Victor Yu. Tretyakov[1], **Anna A. Zakolyukina**[2], **Stepan M. Klubov**[3,4,5]

METHODOLOGY FOR EVALUATION OF MONITORING RIVER STATIONS HOMOGENITY BY AN OPTICAL CHARACTERISTIC OF THE WATER SURFACE — THE TURBIDITY INDEX

ABSTRACT

Preservation and improvement of aquatic recourses ecological state is an important state goal. The goal demands monitoring of river discharge and hydrochemical parameters of the river. Only the data allow evaluating of ecologically reasonable anthropogenic impact on an aquatic ecosystem. It is evident that homogeneity of river water at a monitoring river station is the requirement of the monitoring data representativity. Of course, regular control of the homogeneity by each of the identifiable hydrochemical parameters is extremely time-consuming task. The paper presents methodology for check of homogeneity of a monitoring river station by means of Earth remote sensing data analysis. The methodology includes calculation of the Normalized Difference Turbidity Index (NDTI) on the base of Sentinel-2 satellite images in geographical information systems ArcGIS and QGIS within buffer zone of a river section, calculation of distances between cell centers of the NDTI matrix and the initial vertex of the river section (the riverside), the results export in Microsoft Excel files, statistical analysis of the NDTI values homogeneity along the river section. The homogeneity analysis is made by means of the Student and Fisher tests when the NDTI distributions belong the normal law of distribution and by the tests of Wilcoxon-Mann-Whitney and Siegel-Tukey otherwise. The data processing is performed by means a number of workflow models and Python-language programs, a Lazarus-language program, and a number of Mathcad-language programs. The tools are elaborated by Victor Tretyakov. An example of the methodology application is provided in the paper. There is considered evaluation of NDTI homogeneity at the Neva River section located downstream from the Slavyanka River outlet into the Neva River. Of course, the NDTI homogeneity cannot ensure homogeneity of the river section for all the hydrochemical parameters. However, absence of the NDTI homogeneity may serve as a mark of the stream flow non-homogeneity at the river section.

KEYWORDS: Earth remote sensing, homogeneity analysis, monitoring river station

ВВЕДЕНИЕ

Проект обновленного Плана Действий Хельсинской комиссии по Балтийскому морю констатирует, что цели Плана мероприятий по Балтийскому морю 2007 г. не были достигнуты к 2021 г., и Балтийское море по-прежнему подвергается многочисленным видам антропогенных воздействий, при этом антропогенная эвтрофикация остается главной экологической угрозой для экосистем Балтийского моря. Одной из Целей устойчивого развития до 2025 г. является значительное сокращение загрязнения морской

[1] Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 33-35, 10th line of Vasilyevsky island, St. Petersburg, 199178, Russia, *e-mail:* **v_yu_tretyakov@mail.ru**

[2] Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 33-35, 10th line of Vasilyevsky island, St. Petersburg, 199178, Russia, *e-mail:* **st110668@student.spbu.ru**

[3] Russian State Hydrometeorological University, Faculty of Ecology, 11, Rizhsky ave., St. Petersburg, 190103, Russia, *e-mail:* **klubov_stepan@mail.ru**

[4] Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 10th line of Vasilyevsky island, St. Petersburg, 199178, Russia, *e-mail:* **klubov_stepan@mail.ru**

[5] 3 State budgetary institution of additional education, Palace of Child Youth Art «At the Voznesensky Bridge» of the Admiralteysky district, 26, Grazhdanskaya str., St. Petersburg, 190031, Russia, *e-mail:* **klubov_stepan@mail.ru**

среды биогенными элементами — азотом и фосфором, избыточное поступление которых вызывает антропогенное эвтрофирование морских экосистем. Река Нева является самой полноводной рекой бассейна Балтийского моря, а г. Санкт-Петербург — самым крупным мегаполисом на его побережье. Уточнение объемов поступления в Балтийское море азота и фосфора от источников во всех государствах водосборного бассейна Балтийского моря имеет важное международное значение для определения квот этих стран на объемы поступления этих биогенных элементов. Невская губа и восточная часть Финского залива, т. е. фактически внутригородские акватории Санкт-Петербурга, имеют важное рыбохозяйственное и рекреационное значение. Однако они подвержены антропогенному эвтрофированию. В августе 2022 г. в Невской губе наблюдалось активное цветение сине-зеленых водорослей.

Источниками поступления биогенных элементов в Невскую губу и восточную часть Финского залива являются:

- сток р. Невы и других рек, непосредственно впадающих в Невскую губу и восточную часть Финского залива с административной территории Санкт-Петербурга;
- коммунально-бытовые и промышленные стоки;
- стоки ливневой канализации и рассредоточенный сток с частных водосборов р. Невы и ее проток в пределах Санкт-Петербурга, а также водосборов малых рек.

В устьях р. Невы и ее проток уже многие десятилетия выполняется мониторинг содержания соединений азота и фосфора в речном стоке. Поэтому объемы поступления азота и фосфора в составе этих речных вод достаточно точно известны. Уровень очистки от азота и фосфора сточных вод городской канализации Санкт-Петербурга уже достиг 99 %, при этом соединения азота и фосфора не поступают в Невскую губу, а захораниваются на специальных полигонах.

Проблема загрязнения рек урбанизированных территорий актуальна во многих странах. В Европе тщательно исследуется загрязнение рек бассейна Дуная [*Zaharia* et al., 2016]. Выявленная высокая степень загрязнения городских водотоков связана с поступлением канализационного и поверхностного стока с урбанизированных территорий. Исследование загрязнения рек урбанизированных территорий выполнено учеными Национального автономного университета Мексики. Они пришли к выводу, что «The river reaches within the urban zone are basically the open-air drainage ditches» (Городские реки представляют из себя сточные канавы под открытым небом, англ.) [*Caro-Borrero* et al., 2016]. Отмечена высокая степень загрязнения рек западной Африки, что связывается со сбросом неочищенных бытовых вод и с поступлением в реки рассеяно-диффузионного стока с обширных сельскохозяйственных плантаций и городских кварталов [*Kabore* et al., 2018]. В Китае проблема загрязнения городских рек особенно актуальна в связи с высокими темпами развития экономики. Выполнено исследование качества вод р. Циньхуай (бассейн р. Янцзы). Установлено увеличение уровня загрязненности вод реки при ее протекании через г. Нанкин. Авторы связывают это со сбросом недостаточно очищенных промышленных и коммунально-бытовых вод в реку [*Zhiyi*, 2015]. Широко распространено мнение, что основной вклад в загрязнение городских рек вносит сброс недостаточно очищенных сточных вод и поступающий с водосборной площади загрязненный поверхностный сток. Проблема оценки поступления загрязняющих веществ и биогенных элементов с поверхностным стоком изучена недостаточно хорошо в связи с объективными трудностями измерений и расчетов. Поступление загрязняющих веществ с поверхностным стоком в водные объекты урбанизированных территорий является острой экологической проблемой для многих стран. Существенное внимание решению этой проблемы уделяется

в США. В этой стране существует федеральный закон «О чистой воде»[1]. В этом документе указываются требования к сбору и очистке распределенного поверхностного стока. Агентство по охране окружающей среды США отмечает, что поступающий в водные объекты поверхностный сток служит основным источником поступления загрязняющих веществ в водные объекты в городах. Так, 77 из 127 приоритетных загрязняющих веществ США обнаружены в поверхностном стоке (тяжелые металлы, биогенные элементы, пестициды и др.)[2]. Решение проблемы снижения высокого уровня поступления загрязняющих веществ в водные объекты с поверхностным стоком осложняется тем, что, как правило, поверхностный рассеянный сток сбрасывается в водные объекты без очистки. По данным отчетных материалов ГУП «Водоканал СПб» именно так обстоит дело в Санкт-Петербурге. Несомненно, концентрация загрязняющих веществ и особенно биогенных элементов в бытовых и промышленных сточных водах на порядок выше, чем в поверхностном рассеянном стоке, поступающем в водные объекты через ливневую канализацию. Но значительно большие объемы поступления поверхностного стока в водные объекты и отсутствие очистки делает этот источник основным в загрязнении водных объектов.

Приведенные здесь аспекты демонстрируют как актуальность проблемы определения однородности речных створов мониторинга химического состава вод для Санкт-Петербурга и Балтийского региона в целом, так и общемировой характер проблемы антропогенного эвтрофирования и токсического загрязнения водных экосистем.

Качество воды во всех створах мониторинга на р. Неве в 2021 г. оценивалось 3-м классом, преимущественно разрядом «а» («загрязненная», 87,5 %)[3]. Створ «Новосаратовка» 161 (3) расположен в черте г. Санкт-Петербурга на р. Неве, на 0,5 км ниже впадения в нее р. Славянки. В 2021 г. мониторинг экологического состояния водотоков в черте г. Санкт-Петербурга (рис. 1) проводился в 15 пунктах (22 створа). В 2021 г. на створе 161 (3) «Новосаратовка» (левый берег, дно) и на р. Славянка (граница г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области (31,0 км выше устья, поверхность) было зафиксировано высокое загрязнение (ВЗ). Средние многолетние значения концентраций валового фосфора в р. Неве увеличиваются от истока до створа Новосаратовка на 0.09 мг/л. Далее ниже этого створа до створа р. Невы в устье р. Охты происходит резкое уменьшение концентраций валового фосфора [*Говор*, *Шелутко*, 2017]. Возможной причиной этого может служить потребление фосфора гидробионтами. Однако время прохождения водами р. Невы пути от створа Новосаратовки до створа в устье р. Охты слишком незначительно, чтобы могло реализоваться столь интенсивное потребление фосфора планктоном даже при самых благоприятных термических условиях.

На створе «Новосаратовка» 161 (3) пробы отбираются на трех вертикалях. Центральная вертикаль расположена на середине р. Невы, боковые — на расстояниях 0,1 ширины створа от соответствующего берега. При этом в холодное время года отборы проб выполняются только на ближайшей к левому берегу р. Невы вертикали, т. е. в непосредственной близости от устья р. Славянки. Возможно, что повышенное содержание валового фосфора на створе 161 (3) «Новосаратовка» объясняется отбором части проб в потоке вод р. Славянки, который еще не успел смешаться с водами р. Невы. Для проверки

---

1 US Water Pollution Control Act, 1972. Электронный ресурс: https://www.boem.gov/environment/environmental-assessment/clean-water-act-cwa (дата обращения 04.03.2023).

2 US Source Water Protection Practices Bull, 2001. Электронный ресурс: https:// sourcewater-protectiontoolkit.ca/w p-content/uploads/source-water-protection-toolkit.pdf (дата обращения 04.03.2023).

3 Качество поверхностных вод РФ за 2022. Ежегодник с приложением. Сайт Гидрохимического института Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Россия, г. Ростов-на-Дону. Электронный ресурс: https://gidrohim.com/node/44 (дата обращения 05.03.2023).

этого предположения нами был выполнен анализ однородности именно створа 161 (3) «Новосаратовка» по значениям индекса мутности NDTI.

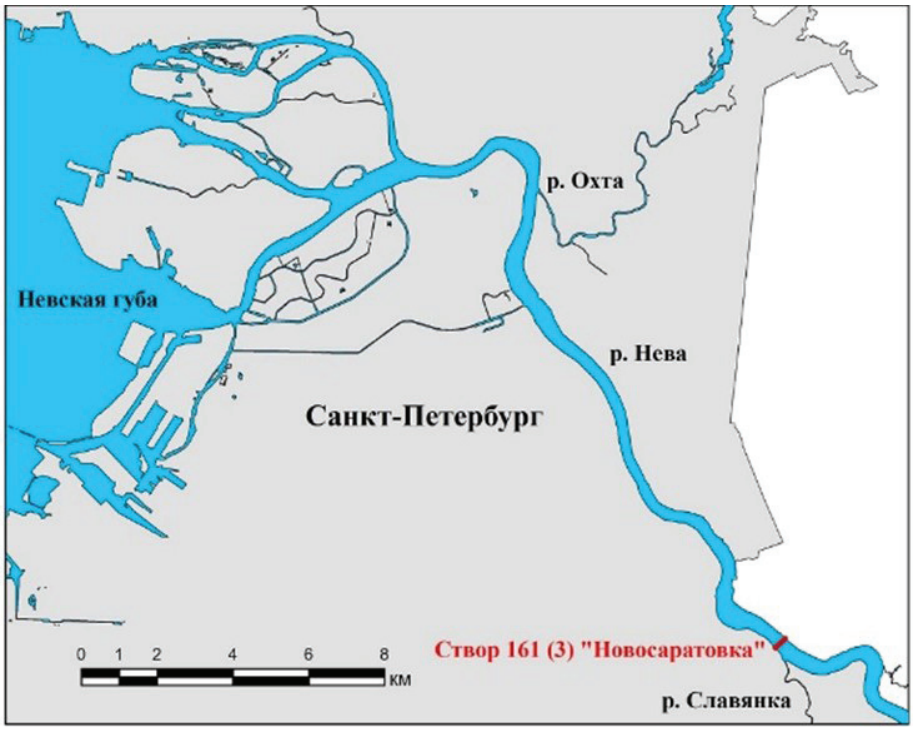


Рис. 1. Створ мониторинга качества поверхностных вод 161(3)
Fig. 1. Surface water quality monitoring river station 161(3)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данная статья имеет преимущественно методологический характер. В статьях этого типа описываются нововведения в исследовательской практике и могут быть представлены как новые подходы к исследованию, так и модификация существующих методов. Детальное описание извлечения информации из спутниковых снимков объясняется нашим стремлением скрупулезно следовать этим требованиям.

Нормализованный разностный индекс мутности (Normalized Difference Turbidity Index, NDTI) является показателем мутности воды, он характеризует уменьшение прозрачности воды из-за взвешенных минеральных и органических частиц, а также планктона в водном объекте. Мутность может быть вызвана поступлением терригенных частиц с водосбора и эрозией береговой линии [*Морозова*, 2019]. Индекс NDTI может принимать значения от −1.0 до +1.0. Чем выше значение индекса, тем больше мутность воды, т. е. выше содержание взвешенных частиц. Индекс NDTI рассчитывается по формуле (1):

$$NDTI = (Red - Green) / (Red + Green) \quad (1),$$

где «Red» — излучение поверхности Земли в красной области спектра;
«Green» — в зеленой области спектра.

В качестве источников данных об интенсивности излучения в этих областях спектра использовались спутниковые снимки Sentinel-2, уровни обработки Level 1C и Level 2A. Sentinel-2 — это семейство спутников дистанционного зондирования Земли Европейского

космического агентства, созданное в рамках проекта глобального мониторинга окружающей среды и безопасности Copernicus. Спутники предназначены для мониторинга использования земель, растительности, лесных и водных ресурсов, могут применяться при ликвидации последствий стихийных бедствий. Эти спутниковые снимки имеют ряд неоспоримых преимуществ. Представленные в Интернете файлы содержат результаты трансформации исходных спутниковых снимков; в них уже устранены искажения, вызванные различием расстояний от спутника до различных участков фотографируемой поверхности Земли и отклонением траекторий излучения от перпендикуляра к поверхности Земли. В выкладываемых в Интернет изображениях каждая ячейка матрицы растра трансформирована таким образом, как будто бы излучение от соответствующего ей участка поверхности Земли поступило на спутник, находящийся строго на вертикали над этим участком. Файлы изображений Sentinel-2 содержат результаты выполнения радиометрической калибровки и атмосферной коррекции: в них представлены значения отражательной способности (reflectance) на верхней границе атмосферы, т. е. отношения интенсивности исходящего от Земли излучения в данном диапазоне спектра к интенсивности приходящего от Солнца излучения в этой же области спектра — безразмерные величины. Преобразованные изображения Sentinel-2 содержатся в файлах формата «jp2», которые уже содержат всю информацию о системе координат снимка (американская система Universal Transverse Mercator, сокращенно — UTM, для г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области зоны 35 и 36) и месте расположения территории и/или акватории снимка на поверхности Земли. Поэтому при их добавлении в качестве растрового слоя электронной карты отсутствует необходимость выполнения процедуры географической привязки изображения. Каждый файл снимков Sentinel-2 содержит одну матрицу (растр) отражательной способности в определенном диапазоне спектра. Для расчетов значений индекса NDTI необходимы данные диапазонов B4 (красного) и B3 (зеленого). Длина волны излучения центра диапазона B3 — 560 нм (нанометров), диапазона B4 — 665 нм. Пространственное разрешение ячеек растров этих диапазонов довольно высокое — 10 м, т. е. ячейки изображений представляют собой квадраты со сторонами 10 на 10 м.

При обработке файлов спутниковых снимков в геоинформационных системах (ГИС) следует иметь в виду, что любая трансформация матрицы растра чревата потерей качества изображения. По этой причине обработку необходимо выполнять на электронных картах с такими же системами координат, как и у самих спутниковых снимков. Анализ изменчивости значений индекса мутности выполняется в непосредственной окрестности створа мониторинга. Поэтому на электронной карте создается буферная зона линейного объекта створа мониторинга (в нашем примере ширина зоны — 40 м), и выполняется обрезка растров интенсивностей излучения в красном и зеленом диапазонах спектра этой буферной зоной. Создаются новые матрицы растров, имеющие форму прямоугольников, описывающих буферную зону со сторонами, параллельными осям координат электронной карты. Ячейки матриц, центры которых находятся в пределах буферной зоны, сохраняют значения ячеек исходных растров. В ячейках, центры которых расположены вне полигона буферной зоны, записывается значение «No data» (нет данных). Затем с помощью Калькулятора растров выполняются расчеты значений индекса NDTI, а результаты записываются в новый растр. Центры ячеек этого растра конвертируются в объекты шейпфайла — векторного слоя точек, в таблицу атрибутов которого записываются значения индекса NDTI. Определяются координаты X и Y всех точек этого слоя в системе координат электронной карты. На следующем этапе обработки определяются координаты одного из узлов створа — т. е. начала или окончания створа на одном из берегов реки. Например, если створ имеет направление с юго-запада на северо-восток, то необходимо

определить координаты крайней вершины створа на берегу реки, расположенном на юго-западе. Далее выполняются расчеты местоположений точек в новой системе координат, точка начала которой совпадает с выбранным узлом створа, а оси координат повернуты таким образом, чтобы направление одной из осей совпадало со створом мониторинга. В результате координаты точек по этой оси будут представлять собой расстояния в метрах от этих точек до одного из берегов реки. Это преобразование координат выполняется в два этапа: сначала производится параллельный перенос начала координат в точку начала створа мониторинга на одном из берегов реки, а затем — поворот осей координат до совпадения одной из них со створом мониторинга.

В ГИС ArcGIS и QGIS все эти операции можно выполнить «вручную», с помощью инструментов интерфейса. Однако в случае обработки большого количества спутниковых снимков возникает необходимость ее автоматизации. Это может быть реализовано с помощью моделей рабочих потоков или компьютерных программ на языке Python. Модели рабочих потоков также на самом деле представляют собой компьютерные программы, создаваемые с помощью инструментов визуального программирования, когда пользователь соединяет обозначения данных и действий над ними в последовательности этапов обработки. На рис. 2 приведен пример графического изображения модели рабочего потока ArcGIS, выполняющей обрезку растров спутниковых снимков изображений в красном и зеленом диапазонах буферной зоной створа мониторинга, расчет с помощью калькулятора растра матрицы значений индекса мутности, его конвертацию в шейпфайл точечных объектов и добавление в его таблицу атрибутов полей «X» и «Y» для последующего расчета координат точек — центров ячеек матрицы значений NDTI.

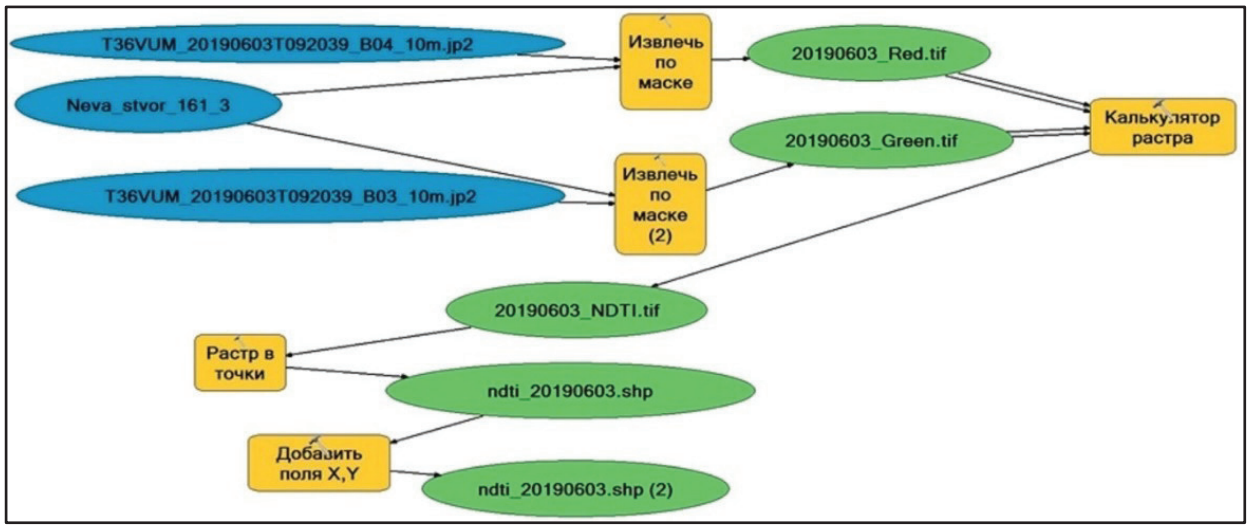


Рис. 2. Модель рабочего потока ArcGIS для расчета индекса NDTI
Fig. 2. The ArcGIS workflow model for NDTI calculation

Рис. 3 демонстрирует модель рабочего потока QGIS для создания растра значений NDTI и его конвертации в шейпфайл точечных объектов, а также электронную карту проекта QGIS с результатами работы этой модели.

На рис. 4 представлена модель рабочего потока QGIS для расчета координат точек в новой системе координат, начало которой находится в начальной точке линии створа мониторинга 161 (3) «Новосаратовка» на левом берегу р. Невы, а ось X совпадает с линией створа. Также на этом рисунке приведен фрагмент таблицы атрибутов слоя точек после пересчета координат. В поле «VALUE» записаны значения NDTI, в полях «x» и «y» —

координаты точек в исходной системе координат проекта QGIS, в полях «x0» и «y0» — координаты после параллельного переноса точки начала осей координат в начальную точку створа мониторинга на левом берегу р. Невы, а в полях «x_new» и «y_new» — координаты после поворота осей координат до совпадения оси X с линией створа. Поле «x_new» содержит расстояния в метрах от точек центров ячеек растра значений NDTI до левого берега р. Невы.

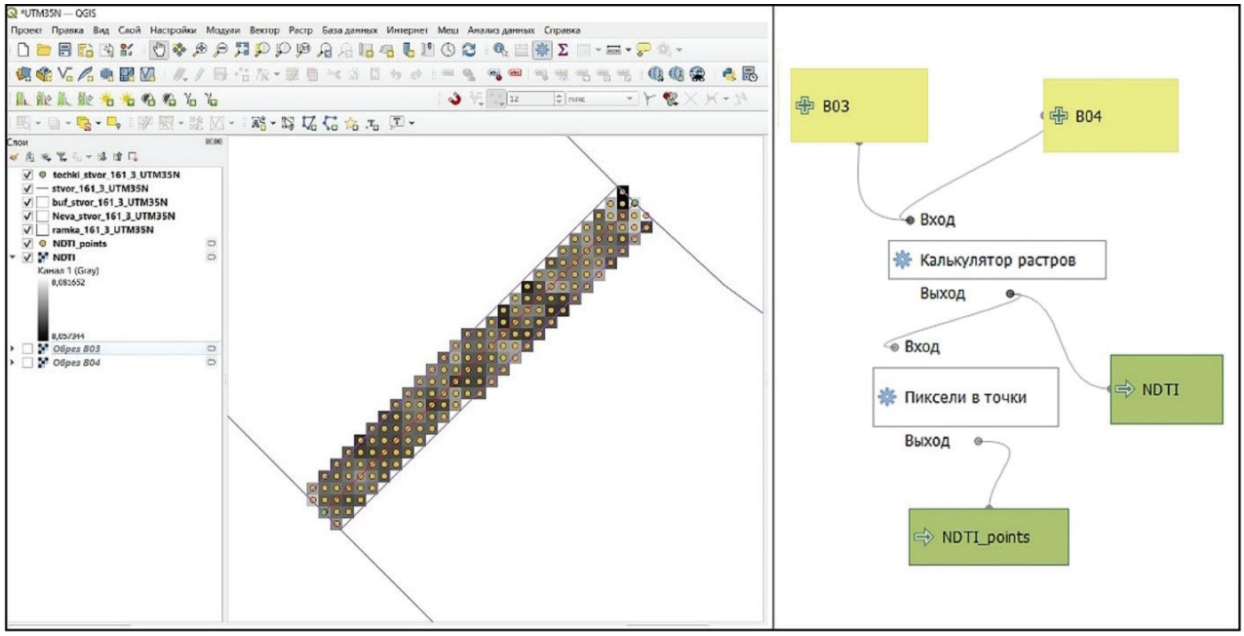
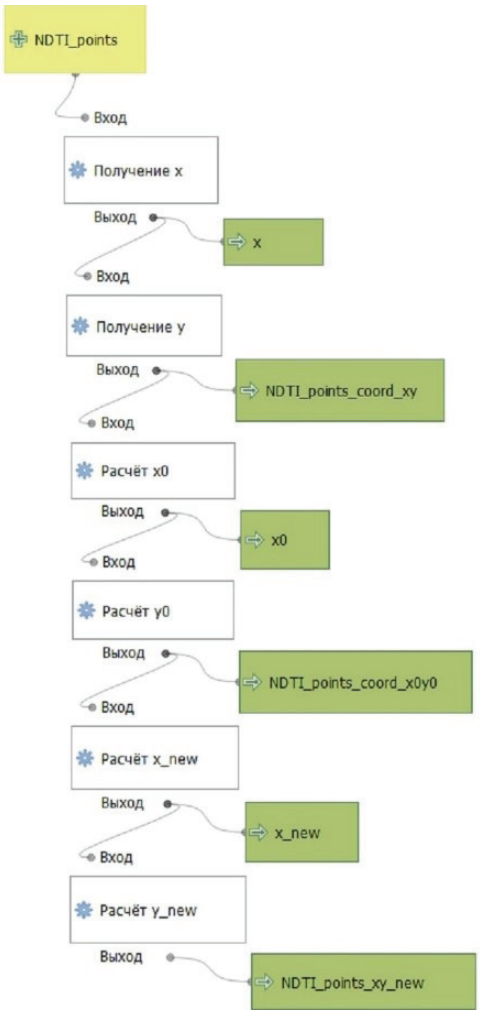


Рис. 3. Модель рабочего потока QGIS для расчета индекса NDTI
Fig. 3. The QGIS workflow model for NDTI calculation

Тем не менее, автоматизация обработки данных с помощью моделей рабочих потоков имеет пределы. Так, в модели рабочего потока ArcGIS при задании новых источников данных необходимо каждый раз корректировать саму модель с указанием как самих источников данных, так и файлов или файловых структур для записи конечных результатов обработки. Модели рабочих потоков QGIS дают пользователю возможность указания и источников исходных данных, и файлов для записи результатов обработки с помощью диалоговых окон. Как видим, в обоих случаях необходимо непосредственное участие пользователя в обработке данных.

Гораздо большие возможности для автоматизации обработки данных предоставляет формализация ее алгоритмов в виде компьютерных программ на языке Python. Имена файлов спутниковых изображений Sentinel-2 включают в себя обозначение шестиградусной зоны системы координат UTM, дату и время производства снимка, обозначение диапазона спектра, разрешение в метрах. Поэтому программирование на языке Python позволяет с помощью нескольких вложенных циклов создавать все возможные имена файлов спутниковых снимков. Для этого в программе создаются списки лет, номеров месяцев, номеров чисел месяца и других элементов названий файлов как строковых значений. Программа перебирает все возможные комбинации этих элементов названий файлов, создает строковые значения адресов и названий файлов спутниковых снимков и проверяет их существование. Разумеется, расчеты NDTI выполняются по данным спутниковых снимков в красном и зеленом диапазонах, выполненным в одно и то же время. Имена

файлов результатов обработки создаются в программе автоматически на основании даты и времени в именах исходных файлов спутниковых снимков.



VALUE	x	y	x0	y0	x_new	y_new
-1	697248,69	6638891,43	248,11	266,8	364,07	14,06
1	697228,9	6638881,57	228,32	256,94	343,09	21,03
0,08903655	697238,79	6638881,57	238,21	256,94	350,1	14,05
0,08084303	697248,69	6638881,57	248,11	256,94	357,11	7,07
-1	697258,59	6638881,57	258,01	256,94	364,12	0,09
1	697219	6638871,72	218,42	247,08	329,12	21,03
0,07783183	697228,9	6638871,72	228,32	247,08	336,13	14,04
0,07962772	697238,79	6638871,72	238,21	247,08	343,14	7,06
0,09018568	697248,69	6638871,72	248,11	247,08	350,16	0,08
0,10462904	697258,59	6638871,72	258,01	247,08	357,17	-6,9
0,08165166	697268,48	6638871,72	267,9	247,08	364,18	-13,88
1	697209,11	6638861,86	208,53	237,23	315,15	21,02
0,07406082	697219	6638861,86	218,42	237,23	322,16	14,04
0,06955288	697228,9	6638861,86	228,32	237,23	329,17	7,06
0,08111888	697238,79	6638861,86	238,21	237,23	336,19	0,08
0,08719346	697248,69	6638861,86	248,11	237,23	343,2	-6,9
0,08885191	697258,59	6638861,86	258,01	237,23	350,21	-13,89
0,08406504	697268,48	6638861,86	267,9	237,23	357,23	-20,87
1	697199,21	6638852	198,63	227,37	301,18	21,01
0,06958393	697209,11	6638852	208,53	227,37	308,19	14,03
0,07088881	697219	6638852	218,42	227,37	315,21	7,05
0,07071429	697228,9	6638852	228,32	227,37	322,22	0,07
0,0702626	697238,79	6638852	238,21	227,37	329,23	-6,91
0,07799443	697248,69	6638852	248,11	227,37	336,25	-13,89
-1	697258,59	6638852	258,01	227,37	343,26	-20,87
1	697189,32	6638842,14	188,74	217,51	287,21	21,01
0,06891601	697199,21	6638842,14	198,63	217,51	294,22	14,03
0,06881721	697209,11	6638842,14	208,53	217,51	301,24	7,04
0,07011867	697219	6638842,14	218,42	217,51	308,25	0,06
0,06891601	697228,9	6638842,14	228,32	217,51	315,26	-6,92
0,06881721	697238,79	6638842,14	238,21	217,51	322,28	-13,9

Рис. 4. Модель рабочего потока QGIS для пересчета координат точек в новую систему координат
Fig. 4. The QGIS workflow model for recalculation of the points coordinates in the new system of axes

Нами для автоматизации обработки спутниковых снимков разработаны 2 программы на языке Python для их применения в ArcGIS. В начале программы расчета значений NDTI необходимо указать кодировку и подключить модули и библиотеки:

```
# -*- coding: utf-8 -*-
import os
import sys
import arcpy
import math
from arcpy import env
import arcpy.mapping as mapping
from arcpy.sa import*
arcpy.CheckOutExtension(“spatial”)
```

Расчеты требуют подключения библиотеки «math» математических функций и «env» приложений окружения. Функция «CheckOutExtension» возвращает лицензию Менеджеру лицензий и другим приложениям, которые могут быть задействованы. Параметр «spatial» обеспечивает возможность применения модуля «Spatial Analyst». Для облегчения загрузки программой всех необходимых файлов все они должны находиться в одной папке, и в этой же папке должен находиться файл документа карты ArcGIS с расширением «mxd», являющийся аналогом файла проекта QGIS. Создаваемые в программе растры имеют формат файлов GeoTIFF, они содержат всю информацию о системе координат и пространственном расположении создаваемых растров. Другая особенность программы: при расчетах NDTI и числитель, и знаменатель дроби умножается на 1.0. Это сделано для универсальности, чтобы была возможность обрабатывать растры с целочисленными значениями. Если не сделать этого умножения, то растр результата будет содержать только числа −1, 0 и 1. Данная программа может быть модернизирована для расчетов других индексов. Необходимо только заменить блок задания исходных растров и расчет значения индекса. В результате работы программы создаются шейпфайлы точечных объектов, атрибутивные таблицы которых содержат значения индекса в каждой точке и прямоугольные координаты точек в системе координат карты. Другая программа для применения в среде ArcGIS производит пересчет координат точек в новую систему по описанному выше алгоритму. Ее особенности: просмотр с пересчетом значений всех записей таблицы атрибутов с помощью создаваемого объекта «курсор» и по завершении расчетов экспорт таблицы атрибутов во внешний файл формата Microsoft Excel:

arcpy.TableToExcel_conversion(str_NDTI_buf, str_excel, “NAME”, “CODE”).

На рисунке 5 представлен результат применения этих двух программ: слой точек, порожденный центрами ячеек растра NDTI в пределах буферной зоны слоя мониторинга, и его таблица атрибутов.

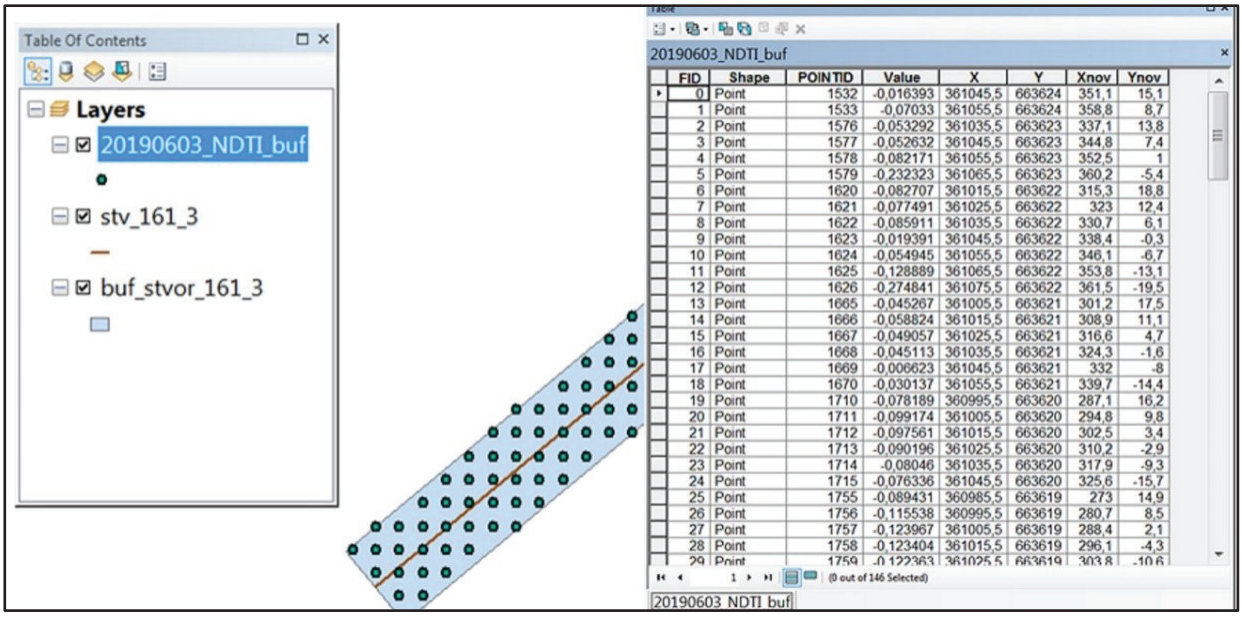


Рис. 5. Результаты обработки спутниковых снимков программами Python в среде ArcGIS
Fig. 5. The results of satellite images processing by Python computer programs in theArcGIS environment

Программа переноса начала осей координат и их поворота разработана также и на варианте языка Python для QGIS. Разумеется, алгоритм расчетов не отличается. Отличия

определяются другим способом просмотра таблицы атрибутов: здесь просмотр и редактирование таблицы атрибутов выполняется по сравнению с ArcGIS более сложно, путем создания и использования объектов типа «Провайдер данных» и «Пространственный объект».

Экспортированные в файлы Microsoft Excel таблицы атрибутов слоев точек со значениями NDTI и расстояний до одного из берегов реки упорядочиваются по расстоянию до берега, и результат сортировки сохраняется в текстовой файл. Затем с помощью специально разработанной в среде создания приложений Lazarus компьютерной программы выделяются две части упорядоченного ряда значений NDTI, наиболее отличающиеся друг от друга по математическим ожиданиям или средним квадратичным отклонениям. Для этого программа проверяет все возможные варианты разбиения числового ряда. Дальнейший анализ выполняется с помощью программ, разработанных в среде системы компьютерной алгебры Mathcad. С помощью критерия согласия Пирсона выполняется проверка нулевой гипотезы о соответствии распределения всего числового ряда значений NDTI и каждой из его частей нормальному закону распределения. Если одна из частей ряда содержит небольшое число элементов, то проверка выполняется с помощью критериев согласия Крамера-Мизеса-Смирнова или Колмогорова. Если для обоих частей ряда это предположение не опровергается, то нулевая гипотеза о принадлежности обоих частей ряда к одной генеральной совокупности, т. е. об отсутствии значимых различий между ними проверяется с помощью критериев однородности Стьюдента и Фишера. В противном случае проверка выполняется с помощью ранговых непараметрических критериев Уилкоксона-Манна-Уитни и Зигеля-Тьюки. При наличии существенных различий в значениях NDTI на створе мониторинга определяется место на створе, где проходит граница между водами с различной мутностью.

Разумеется, в статье рассматривается отдельная задача: методика определения однородности створа мониторинга по индексу мутности водной поверхности. Но эта задача не является частным аспектом исследования только створа мониторинга «Новосаратовка». Даже только для г. Санкт-Петербурга проблема оперативного определения однородности химического состава воды на створах мониторинга весьма актуальна, т. к. адекватное определение поступления в Невскую губу и восточную часть Финского залива азота и фосфора, а также токсических загрязняющих веществ необходимы для разработки действенных мер для сохранения экосистем этих акваторий в устойчивом состоянии. Необходимо подчеркнуть, что эти акватории имеют важное рыбохозяйственное и рекреационное значение. Мы надеемся, что предлагаемая нами методика может применяться для оперативного определения однородности любых речных створов. Разумеется, однородность створа мониторинга по индексу мутности водной поверхности не может гарантировать однородность всей водной толщи реки в месте створа мониторинга по всем нормируемым показателям, однако неоднородность створа по индексу мутности служит признаком неоднородности речных вод на створе мониторинга. Это особенно актуально при расположении створов мониторинга ниже по течению от мест слияния рек или впадения в главную реку притоков.

Известно, что воды р. Невы в ее истоке из Ладожского озера содержат крайне незначительное количество взвешенных частиц. Однако ниже истока в р. Неву впадает ряд рек с более высоким содержанием взвешенных частиц. Бассейн р. Славянки характеризуется высокой плотностью населения, наличием урбанизированных территорий и сельских поселений, промышленных предприятий и сельскохозяйственных угодий, являющихся источниками поступления в воды этой реки взвешенных частиц.

В данной статье рассматривается методика определения однородности створа мониторинга по оптической характеристике поверхности воды, т. е. индексу мутности,

рассчитываемому на основании файлов изображений Sentinel-2, в которых содержатся безразмерные значения отражательной способности на верхней границе атмосферы. Для исследования отбирались снимки с отсутствием облачности в районе створа 161 (3) «Новосаратовка», протяженность которого составляет 365 м. Очевидно, что на столь незначительном расстоянии атмосферное искажение отраженного сигнала одинаково для всех участков поверхности воды в зоне створа, поэтому исследования однородности значений индекса мутности NDTI не требуют выполнения дополнительной атмосферной коррекции значений отражательной способности в красном и зеленом диапазонах спектра. Верификация методики по наземным данным была бы необходима, если бы нами была предложена, например, методика расчета концентрации взвешенных частиц в воде по значению индекса мутности. Но в этом случае было бы невозможно отправиться в прошлое, в моменты производства спутниковых снимков и отобрать на створе мониторинга пробы воды для определения содержания в них взвешенного вещества. Однако цель данного исследования заключается в разработке методики использования индекса мутности воды для получения ответа на вопрос: «Состоит ли створ мониторинга из отдельных участков, существенно различающихся по значению индекса мутности, или же он совершенно однороден по этому параметру?» Этот же вопрос можно сформулировать для створа «Новосаратовка» следующим образом: «Можно ли на створе выделить неразбавленную струю вод р. Славянки?»

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнены исследования изменчивости значений NDTI на створе мониторинга 161 (3) «Новосаратовка» по спутниковым снимкам Sentinel-2, сделанным 21.04.2022, 21.05.2022, 30.06.2022, и 29.08.2022. В табл. 1 представлены результаты статистического анализа числовых рядов значений NDTI на створе мониторинга 161 (3) «Новосаратовка».

Табл. 1. Результаты статистического анализа числовых рядов значений NDTI на створе мониторинга 161 (3) «Новосаратовка» в 2022 г.
Table 1. Results of statistical analysis of numerical series of NDTI values at monitoring site 161 (3) "Novosaratovka" in 2022

Дата	ДЗМО	ДЗСКО	НЗ	НЗЗМО	НЗЗСКО	НЗВМО	НЗВСКО	NDTI	NDTIЗМО	NDTIВМО	NDTIЗСКО	NDTIВСКО	РазлМО	РазлСКО
21.4	357	328	−	−	−		+	0,054	**0,055**	−0,003	**0,056**	0,035	+	+
21.5	350	322	−	+	+		−	0,056	**0,057**	0,038	**0,057**	0,050	З	+
30.6	8	357	+		+	+		−0,068	−0,073	**−0,068**	**−0,068**	−0,073	+	З
29.8	8	50	+		+	−	−	0,061	**0,074**	0,060	**0,071**	0,059	У	У

Обозначения столбцов таблицы имеют следующий смысл: «Дата» — дата производства снимков; «ДЗМО» — длина в метрах западной части створа, которая примыкает к левому берегу р. Невы, с которого в нее впадает р. Славянка (общая протяженность створа составляет 365,1 м, разделение створа выполнено по максимальному различию математических ожиданий NDTI западной и восточной частей створа); «ДЗСКО» — длина в метрах западной части створа при его разделении по максимальному

различию средних квадратичных отклонений NDTI частей створа; «НЗ» — результат проверки соответствия нормальному закону всего ряда значений NDTI («+» — соответствует, «−» — нет); «НЗЗ» и «НЗВ» — соответственно результаты проверки соответствия нормальному закону значений NDTI в западной и восточной частях створа, «МО» и «СКО» — принцип разделения числового ряда: по максимальной разнице математических ожиданий или средних квадратичных отклонений его частей; «NDTI» — среднее значение NDTI для всего створа; «NDTIЗ» и «NDTIВ» — соответственно средние значения NDTI для западной и восточной частей створа, «МО» и «СКО» — принцип разделения числового ряда; «Разл» — наличие или отсутствие существенного различия между значениями NDTI в западной и восточной частях створа, «МО» и «СКО» — принцип разделения числового ряда. Пустая ячейка означает, что для выполнения анализа недостаточно данных. Жирным шрифтом выделены средние значения NDTI в одной из частей створа мониторинга, превышающие среднее значение в другой части створа при данном принципе разбиения ряда. Проверка нулевой гипотезы о принадлежности значений NDTI в обеих частях створа к одной генеральной совокупности выполнена с помощью ранговых непараметрических критериев Уилкоксона-Манна-Уитни и Зигеля-Тьюки. Символ «+» в столбцах «РазлМО» и «РазлСКО» показывает различие значений NDTI между обеими частями створа по обоим критериям, символ «−» — отсутствие различий по обоим критериям, «У» — различие по критерию Уилкоксона-Манна-Уитни, «З» — различие по критерию Зигеля-Тьюки.

На рис. 6 представлено пространственное распределение значений индекса мутности NDTI в зоне створа 161 (3) «Новосаратовка» 03.06.2019. Рис. 7 демонстрирует статистическое распределение значений индекса в зоне створа, а рис. 8 — изменения значений индекса вдоль створа от левого берега р. Невы к правому.

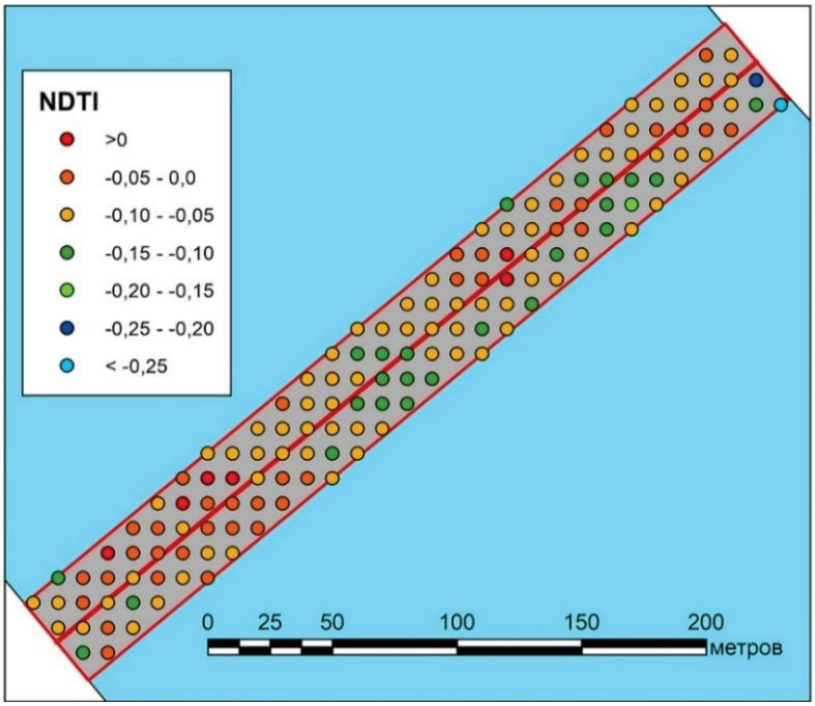


Рис. 6. Значения индекса мутности NDTI в зоне створа 161 (3) «Новосаратовка»
Fig. 6. NDTI turbidity index values within the zone of 161 (3) "Novosaratovka" monitoring section

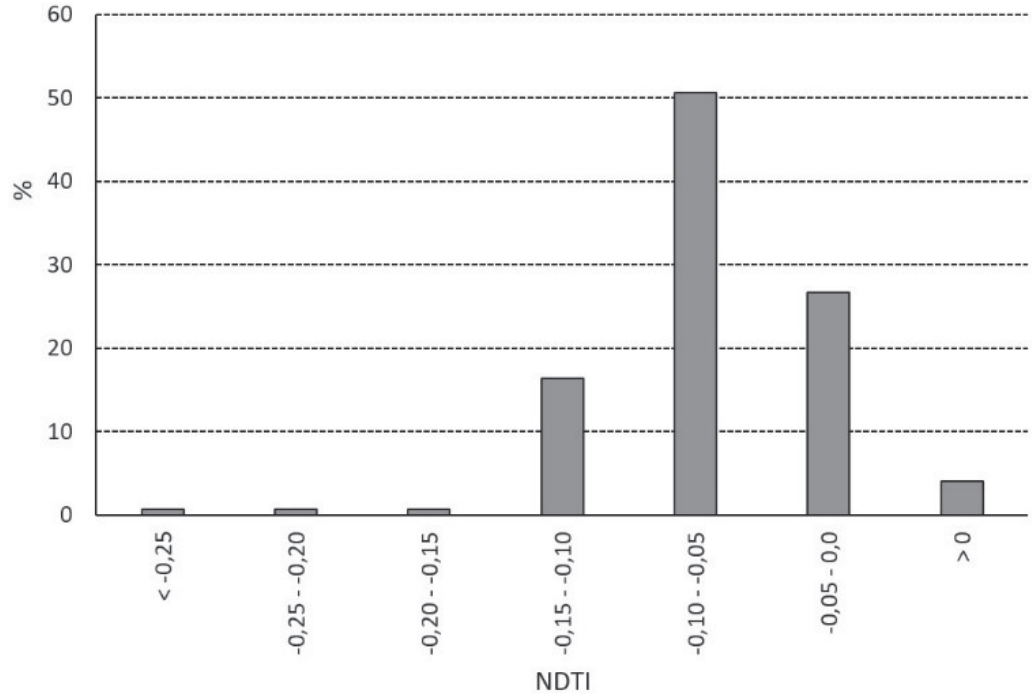


Рис. 7. Статистическое распределение значений индекса мутности NDTI в зоне створа 161 (3) «Новосаратовка» 03.06.2019
Fig. 7. Statistical distribution of the NDTI turbidity index values within the zone of 161 (3) "Novosaratovka" monitoring section on 03.06.2019

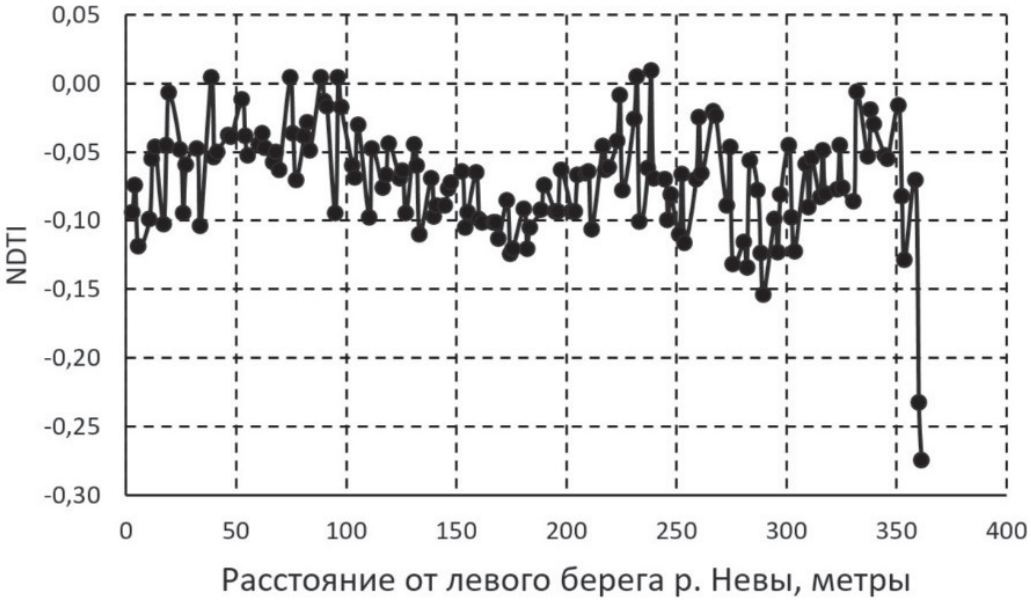


Рис. 8. Изменчивость значений индекса мутности NDTI вдоль створа 161 (3)
Fig. 8. Spatial variability of the NDTI turbidity index values along the monitoring section 161 (3)

Анализ индекса NDTI показал неоднородность створа 161 (3) «Новосаратовка» по мутности воды. При этом в 7 из 8 способов разбиения створа на 2 части более мутной

оказалась вода в западной части створа. Однако объяснить это влиянием неразбавленной струи р. Славянки не представляется возможным, т. к. в 5 из 8 разбиений створа это разбиение было произведено практически у самого восточного берега р. Невы, а воды р. Славянки никак не могут занимать столь обширное пространство. Интересно падение мутности воды 30.06.2022. Возможно, оно объясняется снижением концентрации планктона после весенней вспышки, а повышенная мутность 29.08.2022 — уже его осенним развитием.

ВЫВОДЫ

Исследование подтвердило возможности использования спутниковых снимков и индекса NDTI для анализа неоднородности мутности акваторий. Но для учета влияния на мутность развития фитопланктона также необходим пространственный анализ значений вегетационных индексов, например, нормализованного разностного вегетационного индекса (Normalized difference vegetation index, NDVI), который показывает интенсивность фотосинтеза. Кроме этого, необходим совместный пространственный анализ NDTI и глубин водных объектов.

В тех случаях, когда обнаружена явная неоднородность створа мониторинга, расположенного ниже впадения в основную реку притока или слияния двух рек, необходим пересчет средней концентрации субстанции на створе. Для этого следует рассчитать отношение объемов двух различных потоков на створе мониторинга. Это соотношение равно соотношению площадей сечений потоков на створе. Отношение площади сечения одного потока к общей площади всего сечения створа мониторинга является весом этого потока при расчете средней концентрации субстанции на створе мониторинга. Например, если одна вертикаль отбора проб на створе мониторинга расположена в одном потоке, а две прочие — в другом потоке, то расчет среднего значения выполняется следующим образом. Среднее из двух значений концентрации субстанции в одном потоке умножается на вес этого потока, одно значение в другом потоке умножается на вес этого потока. Разумеется, сумма весов потоков должна быть равна 1. Сумма произведений значений на веса потоков и будет средним значением субстанции на створе. Сложнее выполнить перерасчет в том случае, когда на створе имеется только одна точка отбора проб, расположенная в пределах одного потока, а по другому потоку данные о его химическом составе отсутствуют. Здесь в качестве концентрации субстанции в данном потоке приходится использовать данные с ближайшего створа мониторинга, расположенного выше впадения притока или места слияния двух рек. При пересчете значений для зимнего периода с наличием ледяного покрова в качестве границы двух потоков следует использовать осредненные значения, полученные для ближайших дат с отсутствием льда на створе мониторинга.

Нами уже выполнено исследование однородности значений индекса мутности NDTI в разные даты и сезоны года на створе «Новосаратовка», и это исследование продолжается. Также запланировано исследование значений индекса мутности на других створах мониторинга в пределах Санкт-Петербурга.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-27-10011) и при финансовой поддержке Санкт-Петербургского научного фонда.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by Russian Science Fund (grant No. 23-27-10011) and by Saint Petersburg Science Fund.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Говор А.А., Шелутко В.А. Анализ приращений соединений валового фосфора в реке Неве в пределах Санкт-Петербурга. Метеорологический вестник, 2017. Т. 9. № 2. С. 47–50.

Морозова В.А. Расчет индексов для выявления и анализа характеристик водных объектов с помощью данных дистанционного зондирования. Современные проблемы территориального развития, 2019. № 2. Электронный ресурс: https://terjournal.ru/2019/id85/ (дата обращения 10.03.2023).

Caro-Borrero A., Carmona J. J., Mazari H. M. Evaluation of ecological quality in peri-urban rivers in Mexico: A proposal for identifying and validating reference sites using benthic macroinvertebrates as indicators. Journal of Limnology, 2016. V. 75 (s1). P. 1–16. DOI: 10.4081/jlimnol.2015.1304.

Kabore I., Moog O., Oueda A., Sendzimir J., Ouédraogo R., Guenda W., Melcher A. Developing reference criteria for the ecological status West-African rivers. Environment Monitoring and Assessment, 2018. V. 190. No. 2. P. 1–17. DOI: 10.1007/s10661-017-6360-1.

Zaharia L., Ioana-Toroimac G., Cocoş O., Ghiţă F.A., Mailat E. Urbanization effects on the river systems in the Bucharest City region. Ecosystem Health and Sustainability, 2016. V. 2. No. 11. P. 1–19. DOI: 10.1002/ehs2.1247.

Zhiyi L. Analysis on pollution factors of urban river. Journal of Geoscience and Environment Protection, 2015. V. 3. P. 9–16. DOI: 10.4236/gep.2015.310002.

REFERENCES

Caro-Borrero A., Carmona J. J., Mazari H. M. Evaluation of ecological quality in peri-urban rivers in Mexico: A proposal for identifying and validating reference sites using benthic macroinvertebrates as indicators. Journal of Limnology, 2016. V. 75 (s1). P. 1–16. DOI: 10.4081/jlimnol.2015.1304.

Govor A.A., Shelutko V.A. Analysis of the increments of total phosphorus in the Neva River within St. Petersburg. Meteorological Bulletin, 2017. V. 9. No. 2. P. 47–50 (in Russian).

Kabore I., Moog O., Oueda A., Sendzimir J., Ouédraogo R., Guenda W., Melcher A. Developing reference criteria for the ecological status West-African rivers. Environment Monitoring and Assessment, 2018. V. 190. No. 2. P. 1–17. DOI: 10.1007/s10661-017-6360-1.

Morozova V.A. Calculation of indices for the analysis of water objects according to remote sensing data. Modern Problems of Territorial Development, 2019. No. 2. Web resource: https://terjournal.ru/2019/id85/ (accessed 10.03.2023) (in Russian).

Zaharia L., Ioana-Toroimac G., Cocoş O., Ghiţă F.A., Mailat E. Urbanization effects on the river systems in the Bucharest City region. Ecosystem Health and Sustainability, 2016. V. 2. No. 11. P. 1–19. DOI: 10.1002/ehs2.1247.

Zhiyi L. Analysis on pollution factors of urban river. Journal of Geoscience and Environment Protection, 2015. V. 3. P. 9–16. DOI: 10.4236/gep.2015.310002.

УДК: 528.88+551.24+004.93

DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-346-360

В.А. Мелкий[1], **О.В. Купцова**[2], **А.А. Верхотуров**[3]

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ В РАЙОНЕ ПЕРЕШЕЙКА ПОЯСОК (САХАЛИН) ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

Автоматизированное картографирование нарушений сплошности земной коры позволяет оперативно выявлять участки развития опасных геологических процессов, и определить меры, которые следует предпринять для организации безопасной эксплуатации протяженных линейных сооружений (автомобильных и железных дорог, трубопроводов, линий электропередач), пролегающих через территории со сложными природными условиями. Основным триггерным механизмом, вызывающим активизацию опасных геологических процессов, являются смещения в зонах активных разрывных нарушений в земной коре. Мониторинг состояния разломных зон и своевременное выявление проявлений опасных процессов — актуальные задачи обеспечения устойчивого развития региональной инфраструктуры. В качестве объекта исследования был выбран район перешейка Поясок (о. Сахалин), по территории которого проходят автомобильная и железная дороги, линии электропередач, а по побережью перешейка проложен магистральный трубопровод проекта «Сахалин-2». Для выявления разрывных нарушений исследуемой территории производился линеаментный анализ спутниковых снимков и данных SRTM с помощью программного комплекса LEFA методом бинарно-морфологической эрозии для детектирования границ, а также отбор протяженных линий посредством выполнения операций по математическим алгоритмам Кэнни с последующими преобразованиями Хафа. Полученные промежуточные данные обрабатывались при помощи инструментария программного комплекса QGIS и позволили составить карту дизъюнктивных нарушений для изучаемой местности. Линеаментный анализ позволил выделить разломы, ограничивающие блоковую мегаструктуру перешейка Поясок с севера и юга. Седловина перешейка Поясок разделяет крупные Центрально-Сахалинский и Южно-Сахалинский сегменты Хоккайдо-Сахалинской системы островных поднятий. Непосредственно к седловине примыкают структуры Центрально-Камышового и Южно-Камышового блоковых мегаподнятий (3 порядка) в Западно-Сахалинских горах. Южная часть Центрально-Камышового мегаподнятия представлена серией поднятий, разделенных узкими впадинами, ограниченными разломами. Количество поднятий увеличивается с удалением к северу от перешейка Поясок. Северная часть Южно-Камышового мегаподнятия разделена разломами северо-восточного простирания на клавишные блоковые структуры. Полученные данные пригодны для выполнения детального сейсморайонирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дистанционное зондирование, геоинформационное картографирование, опасные геологические процессы, разломы

[1] Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, лаборатория вулканологии и вулканоопасности, ул. Науки, д. 1Б, Южно-Сахалинск, Россия, 693022, *e-mail:* **vamelkiy@mail.ru**

[2] Сахалинский государственный университет, Технический нефтегазовый институт, ул. Пограничная, д. 2, Южно-Сахалинск, Россия, 630023, *e-mail:* **Korsuncevaolesy@gmail.com**

[3] Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Центр коллективного пользования, ул. Науки, д. 1Б, Южно-Сахалинск, Россия, 693022, *e-mail:* **ussr-91@mail.ru**

Vyacheslav A. Melkiy[1], **Olesya V. Kuptsova**[2], **Alexey A. Verkhoturov**[3]

AUTOMATED MAPPING OF FAULTS IN THE AREA OF POYASOK ISTHMUS (SAKHALIN) BY REMOTE SENSING DATA

ABSTRACT

Automated mapping of disturbances in the earth's crust allows you to quickly identify areas of development of dangerous geological processes, and to determine the measures that should be taken to organize the safe operation of extended linear structures (roads and railways, pipelines, power lines) that run through areas with difficult natural conditions. The main trigger mechanism causing the activation of dangerous geological processes is displacements in zones of active faults in the earth's crust. Monitoring the state of fault zones and timely detection of manifestations of hazardous processes are urgent tasks for ensuring the sustainable development of regional infrastructure. The area of the Poyasok isthmus (Sakhalin Island) was chosen as the object of research, along the territory of which there are automobile and railway roads, power lines, and the main pipeline of the Sakhalin-2 project was laid along the isthmus coast. Lineament analysis of space images and SRTM data using the LEFA software package by binary morphological erosion method to highlight boundaries, as well as made selection long lines by performing mathematical operations using Canny algorithms, with subsequent Hough transformations, were carried out to identify faults of research territory. The obtained intermediate data were processed using the tools of the QGIS software package and made it possible to compile a map of disjunctive disturbances for the area under study. Lineament analysis made it possible to identify faults that bound the block megastructure of the Poyasok isthmus from the north and south. The saddle of Poyasok isthmus separates the large Central Sakhalin and South Sakhalin segments of the Hokkaido-Sakhalin system of island uplifts. Structures of the Central-Kamyshovy and South-Kamyshovy lifted megablocks (3 orders) in the West-Sakhalin Mountains adjoin directly to the saddle. The southern part of the Central-Kamyshovy mega-uplift is represented by a series of uplifts separated by narrow depressions bounded by faults. The number of uplifts increases with the distance to the north from the Poyasok isthmus. The northern part of the South-Kamyshovy mega-uplift is divided by faults of the northern-east strike into block structures. The obtained data are suitable for performing detailed seismic zoning.

KEYWORDS: remote sensing, geoinformation mapping, dangerous geological processes, faults

ВВЕДЕНИЕ

Основными опасными геологическими процессами, оказывающими воздействие на протяженные линейные сооружения (автомобильные и железные дороги, трубопроводы, кабельные линии подземного проложения), являются смещения в зонах активных разрывных нарушений в земной коре. Диагностика на наличие потенциально опасных участков разломных зон территории, планируемой для строительства линейных

[1] Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of Russian Academy of Sciences, Laboratory of volcanology and volcanic danger, 1B, Nauki str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, *e-mail:* **vamelkiy@mail.ru**

[2] Sakhalin State University, Technical Oil and Gas Institute, 2, Pogranichnaya str., Yuzhno-Sakhalinsk, 630023, Russia, *e-mail:* **Korsuncevaolesy@gmail.com**

[3] Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of Russian Academy of Sciences, Center for collective use, 1B, Nauki str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, *e-mail:* **ussr-91@mail.ru**

сооружений, должна проводиться на стадии инженерных изысканий. Необходимо выявить места пересечения трасс линейных сооружений разрывными нарушениями земной коры и обратить особое внимание при проектировании, чтобы организовать постоянный мониторинг при эксплуатации в местах возможных подвижек грунтовых масс. Исследования геологических условий территории традиционно выполняются посредством полевого геологического опробования, геофизических и геодезических измерений. Традиционные методы являются достаточно высокоточными, однако они способны охватить сравнительно небольшую площадь, требуют привлечения существенных трудовых и финансовых ресурсов. Поэтому для изучения больших территорий целесообразно использовать данные дистанционного зондирования Земли, для обработки которых применять методы геоинформационного анализа, получившие в настоящее время широкое распространение.

Методы дешифрирования космических снимков территорий с целью определения их состояния рассматриваются в работах многих исследователей [*Карпик*, 2004; *Малинников* и др., 2009; *Барталев* и др., 2015; *Братков* и др., 2020; *Аковецкий* и др., 2021; *Кравцова*, 2021; *Романюк* и др., 2022] в связи с освоением новых территорий, подверженных воздействию опасных геологических процессов. Большой интерес вызывают работы, в которых представлены результаты исследования территорий с помощью методов линеаментного анализа и моделирования геотехнических систем [*Бондур, Зверев*, 2005; *Зверев* и др., 2005; *Савиных* и др., 2012; *Долгополов* и др., 2022; *Mercante, Antunes*, 2010].

В значительной степени экономика и социальное развитие о. Сахалин зависят от экспорта энергоносителей: остров обладает значительными запасами углеводородов и другими невозобновляемыми и возобновляемыми энергетическими ресурсами. В Восточной Азии активно развиваются процессы экономической интеграции, которые характеризуются разнонаправленными и трудно прогнозируемыми изменениями обстановки. Для оптимизации управления энергетическим сектором необходимо использовать систему поддержки принятия решений. В статье рассматриваются возможности использования автоматизированного дешифрирования для выявления разломов в целях обеспечения безопасной эксплуатации сооружений и устойчивое развитие экономики острова в условиях широкого спектра рисков и угроз в рамках концепции Цифровой Земли [*Мелкий* и др., 2017; *Hiromichi* et al., 2021].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа разрывных нарушений различного ранга используются снимки разного масштаба и обзорности. Чем меньше масштаб и разрешение снимка, тем более крупного ранга линеаменты будут на нем отображаться. Соответственно для уточнения региональных и локальных разрывов отбирались спутниковые снимки Landsat-8, разрешение которых было различным:

- 15 м — в панхроматическом канале, что соответствовало масштабу 1: 100 000;
- 30 м — в каналах коротковолновой, видимой красной и ближней инфракрасной зон электромагнитного спектра, которые соответствовали масштабу 1: 150 000;
- 100 м — в тепловом инфракрасном диапазоне, соответствующие масштабу 1: 500 000.

При исследовании территории использовались цифровые модели рельефа на основе SRTM, разрешение которых составляет от 1 до 3", т. е. от 30 до 90 м. Данные космических съемок Landsat-8[1] и SRTM скачивались с вебсайта Геологической службы США USGS[2] в формате с географической привязкой GeoTIFF. На территорию исследования были отобраны космические снимки с низким облачным покрытием (табл. 1).

Табл. 1. Характеристика сцен Landsat 8, выбранных для исследования
Table 1. Characteristics of the Landsat 8 scenes selected for the research

Спутник / сканер	Идентификатор сцены	Разрешение, м	Дата съемки	Облачность над объектом (%)
Landsat 8 / OLI	108027_20190909	15–30	09.09.2019	0,26
Landsat 8 / OLI	108027_20190917	15–30	17.09.2019	0,00
Landsat 8 / OLI	108027_20180204	15–30	04.02.2018	0,00
Landsat 8 / OLI	108027_20170403	15–30	03.04.2017	0,00
Landsat 8 / OLI	108027_2015241	15–30	29.08.2015	0,24
Landsat 8 / OLI	108027_20150930	15–30	30.09.2015	0,00
Landsat 8 / OLI	108027_20151016	15–30	16.10.2015	0,00

На первом этапе обработки снимков были выполнены: оценка точности позиционирования, определение влияния отражения электромагнитных волн от поверхности Земли, а также отражательной способности поверхности, рассеивающей способности атмосферы [*Kuptsova* et al., 2021]. Последующая обработка проводилась непосредственно в процессе дешифрирования.

Выделение разломов производилось на основе принципов «множественности» и «комплексности» последовательной обработки спутниковых данных, позволяющих повысить достоверность дешифрирования с помощью линеаментного анализа. Принцип «множественности» реализован в использовании целой серии снимков исследуемой территории, различных по времени съемки. Принцип «комплексности» применен при последовательном дешифрировании снимков, различных по обзорности, спектральному диапазону, масштабу и разрешению [*Купцова* и др., 2021]. Программное обеспечение комплексов QGIS и LEFA [*Шевырев*, 2018] позволило выполнить автоматизированное дешифрирование и анализ линеаментных структур исследуемой территории. Изображения поверхности данными SRTM и Landsat обрабатывались с помощью операции бинарно-морфологической эрозии для детектирования границ, а также посредством выполнения действий по математическим алгоритмам Кэнни [*Купцова* и др., 2021; *Canny*, 1986].

Объекты изображения представлены в формуле (1) в виде множества A всех фоновых точек-пикселов. Эрозия обрабатываемого изображения A по структурному элементу B — это множество всех точек z, при попадании в которые элемент B полностью содержится в множестве A, что позволяет выделить линейные элементы рельефа в виде штрихов:

[1] Landsat Quality Assessment ArcGIS Toolbox. United States Geological Survey (USGS) website. Электронный ресурс: https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-quality-assessment-arcgis-toolbox (дата обращения 25.01.2023).

[2] USGS EROS Archive. Digital Elevation — Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Void Filled. GloVis Website USGS (U.S. Geological Survey). Электронный ресурс: https://glovis.usgs.gov/aP (дата обращения 25.01.2023).

$$A \ominus B = \{z|(B)z \subseteq A\}, \quad (1)$$

где $A \in Z^2$, $B \in Z$ [*Canny*, 1986].

Дальнейшая обработка изображения в программе LEFA выполняется посредством преобразований Хафа [*Xue, Pan*, 2009]. Протяженные линеаменты, трассирующие основные глубинные разломы, определяются с помощью алгоритма Хафа с помощью теории вероятности с учетом коллинеарности. Трансформация Хафа предназначена для упрощения группировки граничных точек в наборы с определенными параметрами. Прямую можно задать либо уравнением $y = kx + b$, либо в виде формулы (2):

$$y = \left(-\frac{\cos\theta}{\sin\theta}\right)x + \left(\frac{r}{\sin\theta}\right) \quad (2)$$

Через любую точку на плоскости может проходить бесконечно много прямых. Так для точки с координатами (x_0, y_0) это будут прямые, описываемые формулой (3):

$$r(\Theta) = x_0 \times \cos\Theta + y_0 \times \sin\Theta, \quad (3)$$

где r — расстояние от начала координат до ближайшей точки на прямой;
Θ — угол между осью x и линией, соединяющей начало координат с ближайшей точкой.

Ряд точек, которые формируют прямую линию, определяют синусоиды, которые пересекаются в точке параметров (r_0, Θ_0) для этой линии, поэтому обнаружение коллинеарных точек сводится к обнаружению пересекающихся кривых. На изображении, выстроенном в полярных координатах, достаточно выбрать наиболее крупные пятна для обнаружения соответствующих прямых [*Кудрина*, 2014; *Ballard*, 1981].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Автоматизированное дешифрирование нарушений территории перешейка Поясок, выполненное с помощью инструментария программного обеспечения LEFA с использованием методов линеаментного анализа, позволило определить не только местонахождение разломов, но и проанализировать определенные характеристики разрывных нарушений: определить их длину и ширину области влияния.

Технология дешифрирования линеаментных структур с целью выявления разрывных нарушений

Обработка изображений SRTM и Landsat проводилась комплексом методов многоступенчатых алгоритмов. Работа с данными позволила выявить дизъюнктивные нарушения исследуемой территории (рис. 1).

Программное обеспечение QGIS использовалось для анализа результатов дешифрирования линеаментов и построения карты. Карта разломов строилась путем суммирования шейп-файлов линий и штрихов на основе их комплексного анализа по предлагаемой технологии (рис. 2). Комплексирование всех обработанных изображений в разных зонах спектра позволило выделить наиболее достоверные зоны разрывных нарушений. Путем наложения данных дешифрирования SRTM и спутниковых снимков линеаменты были отфильтрованы, при этом исключены те, которые не подтверждены другими параметрами и не относящиеся к разрывным нарушениям. В результате

построен новый слой подтвержденных дизъюнктивных нарушений и создана карта дизъюнктивных нарушений.

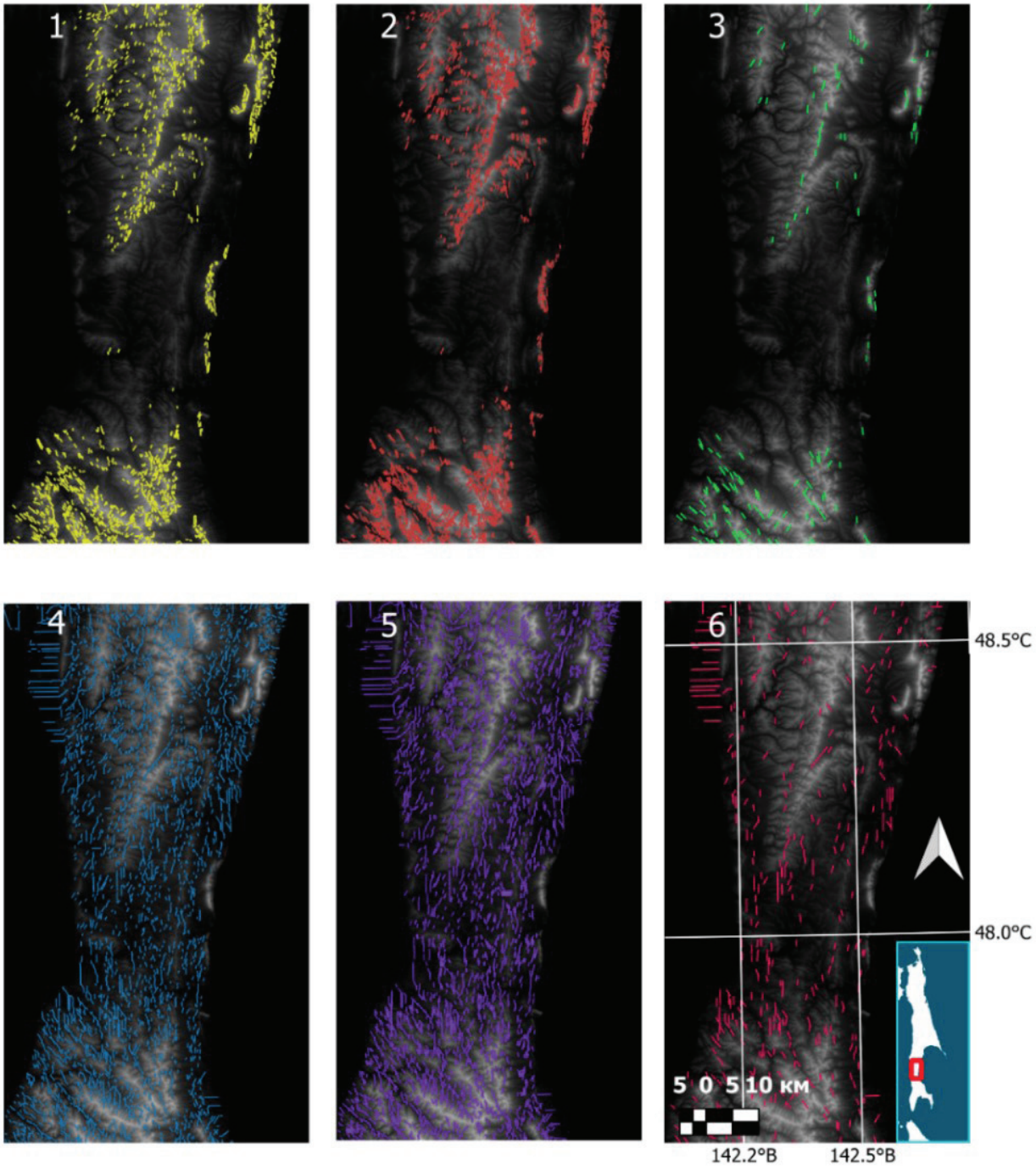


Рис. 1. Фрагменты космических снимков с линеаментами, выделенными в программе LEFA при использовании инструментария, работающего на различных алгоритмах: 1 — Canny many; 2 — Canny medium; 3 — Canny small; 4 — Erosion many; 5 — Erosion medium; 6 — Erosion small

Fig. 1. Fragments of satellite images with lineaments identified in the LEFA program using tools that work on various algorithms: 1 — Canny many; 2 — Canny medium; 3 — Canny small; 4 — Erosion many; 5 — Erosion medium; 6 — Erosion small

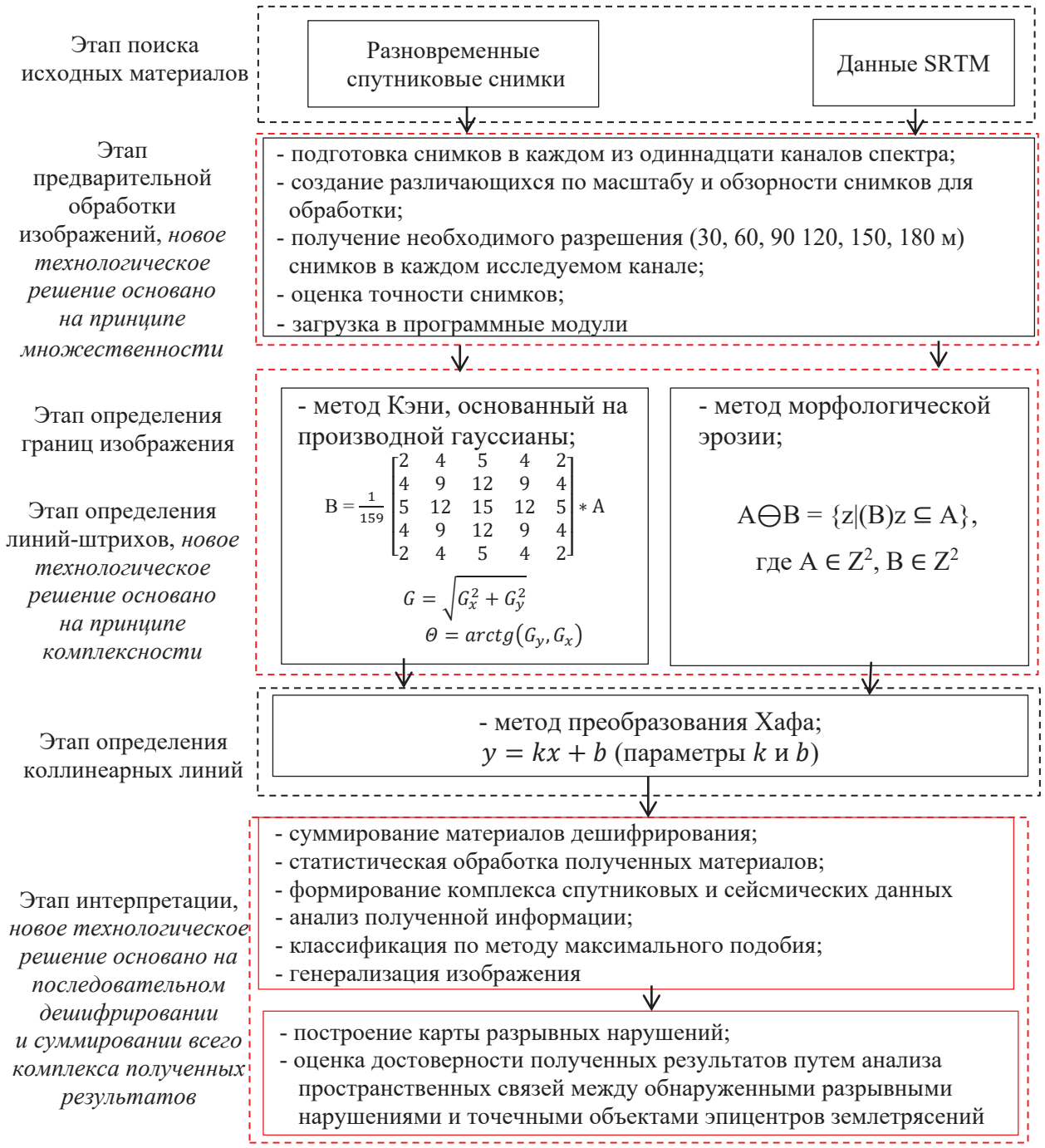


Рис. 2. Технология дешифрирования с целью выявления разрывных нарушений
Fig. 2. Decryption technology to detect disjunctive violations

Исследуемая территория в тектоническом плане относится к Хоккайдо-Сахалинской системе островных поднятий [*Сергеев*, 1982]. В рельефе структура представлена антиклинорием Западно-Сахалинских гор. Седловина перешейка Поясок разделяет крупные Центрально-Сахалинский и Южно-Сахалинский сегменты-поднятия. Непосредственно к седловине примыкают структуры Центрально-Камышового и Южно-Камышового блоковых мегаподнятий (3 порядка), состоящие из более мелких блоков, разделенных разломами (рис. 3).

В программе LEFA нет ограничений по числу направлений сторон света, поэтому показываются линейные штрихи и протяженные линеаменты во всех направлениях, изображенных на карте. Роза-диаграмма строится максимум по 32 основным направлениям разрывных нарушений. Для диаграммы, отображающей линейные нарушения, не имеет значения ориентация линий. Направления с севера на юг и с юга на север рассматриваются как равнозначные, поэтому вместо 0–360° берется 0–180°, т. к. линии с противоположными направлениями попадают в ячейку одного направления. Роза-диаграмма, отображающая преобладающие направления разломов территории, показана также на рис. 3.

Анализ структурной позиции и картографирование разрывных нарушений в районе перешейка Поясок

Зоны наиболее крупных протяженных выделены при линеаментном анализе с помощью алгоритма Хафа на западной и восточной окраинах изученной территории, расположенной севернее перешейка Поясок. Западный склон антиклинория Центрально-Камышового поднятия ограничен бортом Южно-Татарского рифтового грабена, представленным ступенчатым сбросом по серии субмеридиональных разрывных нарушений в зоне Западно-Сахалинского разлома. С восточной стороны изучаемого участка четко выделяются разрывные нарушения Центрально-Сахалинской разломной зоны, расположенной на границе Ильинско-Макаровской антиклинали Центрально-Камышового мегаподнятия и Терпениевской мегавпадины. Вдоль берега о. Сахалин в заливе Терпения протянулись с севера на юг Макаровский и Фирсовский прогибы, по-видимому, также имеющие рифтообразную структуру. В пользу рифтогенной природы грабенов, ограничивающих антиклинорий с запада и востока, свидетельствуют признаки молодого вулканизма по их периферии и повышенный тепловой поток. Особенно высокими значениями теплового потока выделяются наиболее погруженные участки впадин, где его величина находятся в пределах 60–80 мВт/м^2 [*Веселов* и др., 2006].

Литосферные надрегиональные разломы выделялись в работах многих исследователей [*Рождественский*, 1982; *Стрельцов, Кожурин*, 2002; *Воейкова* и др., 2007; *Ломтев, Жердева,* 2015], отражены в базе данных разломов Евразии, где представлены их основные характеристики [*Харахинов* и др., 1984; *Бачманов* и др., 2017] (табл. 2). Крупные разломы и разломные зоны отчетливо проявились при автоматизированном дешифрировании линеаментов.

Табл. 2. Характеристика основных глубинных разломов перешейка Поясок
Table 2. Characteristics of the main deep faults of the isthmus Poyasok

Название	Амплитуда смещений (км)		Размеры (км)		Морфология, тип
	горизонт	вертикал	ширина	протяженность	
Западно-Сахалинский	≈3–5	≈1,5	≈10	> 1000	Взбросо-сдвиг
Центрально-Сахалинский	≈5–7	≈2,0	≈10	> 1000	Сброс, взбросо-сдвиг

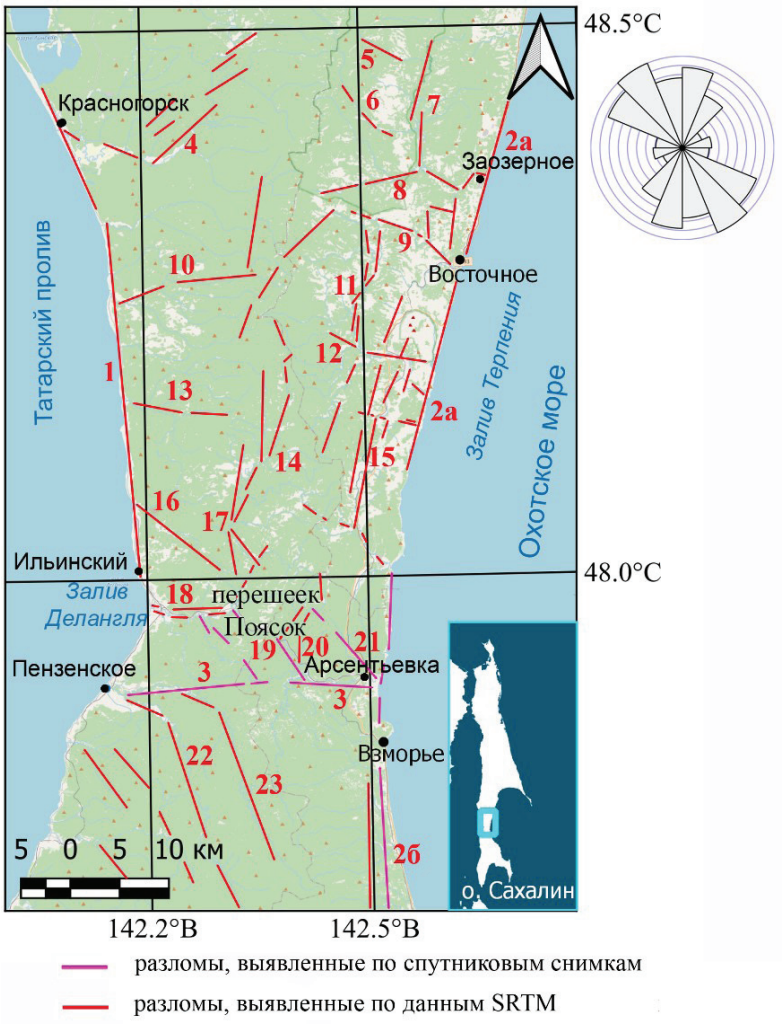


Рис. 3. Схема разломов и разломных зон исследуемой территории: 1 — Ильинско-Парусный фрагмент Западно-Сахалинского разлома; 2а — Терпеньевский фрагмент Центрально-Сахалинского разлома; 2б — Арсентьевско-Тепловодский фрагмент Центрально-Сахалинского разлома; 3 — Мануй-Черемшанская зона; 4 — Заломовский; 5 — Араксовский; 6 — Званкинский; 7 — Лазовская зона; 8 — Малахитовский; 9 — Восточный; 10 — Белинский; 11 — Юлай-Пугачевская зона; 12 — Емельяновско-Пугачевский; 13 — Енисейский; 14 — Повитухинский; 15 — Травяно-Тиховская зона; 16 — Софийско-Колесницкий; 17 — Пахомовско-Ильинский; 18 — Ильинская зона; 19 — Комогоркинский; 20 — Моховсккской; 21 — Казанский; 22 — Старицкий; 23 — Верхне-Черемшанский. Роза-диаграмма направленности разломов показана вверху справа

Fig. 3. Diagram of faults and fault zones of the research territory: 1 — Ilyinsko-Parusny fragment Zapadno-Sakhalinskaya fault zone; 2a — Terpenievsky fragment Tsentral'no-Sakhalinskaya fault zone; 2b — Arsentievsko-Teplovodsky fragment Tsentral'no-Sakhalinskaya fault zone; 3 — Manuj-Cheremshanskaya zone; 4 — Zalomovsky fault; 5 — Araksovsky; 6 — Zvankinsky; 7 — Lazovskaya fault zone; 8 — Malakhitovsky; 9 — Vostochny; 10 — Belinsky; 11 — Yulaj-Pugachevskaya fault zone; 12 — Emelyanovsko-Pugachevsky; 13 — Eniseysky; 14 — Povitukhinsky; 15 — Travyano-Tikhovskaya fault zone; 16 — Sofiysko-Kolesnitsky; 17 — Pakhomovsko-Ilyinsky; 18 — Ilyinskaya fault zone; 19 — Komogorkinsky; 20 — Mokhovskskoj; 21 — Kazansky; 22 — Staritsky; 23 — Verkhne-Cheremshansky. Rose-diagram of orientation of faults is shown at the top right

Разломные зоны регионального масштаба ранее исследовались не так активно, как надрегиональные, поэтому ряд разломов выделен в результате линеаментного анализа на исследуемой территории впервые. Ортогональные разломы исследуемого района Малахитовский (8), Белинский (10), Енисейский (13), Пахомовско-Ильинский (17), а также Ильинская зона (18) разрывных нарушений играют второстепенную роль в формировании современного структурного плана рельефа. Широтные крупные разломы встречаются редко и проявляются в виде сбросо-сдвигов.

На исследованной территории ведущая роль принадлежит диагональной сети разломов. Использование алгоритма Erosion medium позволило выделить ряд разломных зон северо-восточного простирания: Лазовскую (7), Юлай-Пугачевскую (11) и Травяно-Тиховскую (15). В этом же направлении проявились разломы: Заломовский (4), Повитухинский (14), Комогоркинский (19) и Моховскской (20).

Большое количество линеаментов северо-восточного направления, характерных для территории, ограниченной периметром Арсентьевка – Пензенское – Красногорск – Заозерное разграничивает структуры поднятий и глубоко врезанных долин 4-го порядка. Для территории характерен структурно-эрозионный тип рельефа. Гряды положительных складок в большинстве своем ориентированы в направлениях, совпадающих со структурным планом территории, имеют асимметричную крутизну склонов, моноклинальное залегание пластов. Аструктурный склон — крутой, другой склон, совпадающий по падению с залеганием пластов, более плавно опускается в долину. Направление гряд поднятий обусловлено простиранием выходов устойчивых к размыву пластов позднемеловых, палеогеновых и неогеновых пород. Высота гряд зависит от интенсивности новейших поднятий, свойственных сахалинской поздненеоген-четвертичной (N_2^3–Q_1) фазе складчатости, и колеблется в гребнях хребтов от 200 до 850 м. Подобного рода гряды образуют главный водораздел Центрально-Камышового мегаподнятия. Для гидросети в условиях структурно-эрозионного рельефа характерен решетчатый рисунок.

При помощи алгоритмов Erosion many и Erosion medium хорошо выявляется коли-неарность линеаментных линий по разломам северо-западного простирания: Званкинскому (6), Восточному (9), Емельяновско-Пугачевскому (12), Софийско-Колесницкому (16), Казанскому (21), Старицкому (22) и Верхне-Черемшанскому (23). Развитие подобного рода аструктурного эрозионного рельефа возникает в районах локальных осложнений складчатой структуры, что возможно вблизи крупных разломов, где в зонах активного дробления и переслаивания отложений пород происходит интенсивное эрозионное расчленение.

Очаги землетрясений, как правило, расположены вдоль протяженных зон активных разломов и других наименее прочных структур земной коры. Выявление местоположения сейсмоактивных, а следовательно — сейсмоопасных геологических структур заложено в основу сейсмического районирования. Идентификация зон возникновения очагов землетрясений и определение параметров их сейсмического режима является самым сложным и наиболее ответственным звеном в исследованиях по сейсмическому районированию, поскольку от этого зависит надежность всех последующих построений [*Уломов, Шумилина*, 1999]. При проведении работ по детальному сейсмическому районированию территории, которое необходимо учитывать при проектировании объектов промышленного и гражданского назначения, следует использовать данные о местоположении выявленных разрывных нарушений [*Уломов,* 2008].

ВЫВОДЫ

Линеаментный анализ позволил выделить зоны литосферных надрегиональных разломов, ограничивающих самую узкую часть Хоккайдо-Сахалинской системы островных поднятий с запада и востока. В результате уточнена пространственная позиция крупных разломов в пределах трансрегиональных зон: ранее положение этих разломов разными исследователями определялось не однозначно. Выявленные зоны оконтуривают структуру Центрально-Камышового блокового мегаподнятия (3 порядка) Западно-Сахалинского антиклинория и показывают, что ступенчатые взбросы поднятого крыла в бортах соседних Южно-Татарского, Макаровского и Фирсовского грабенов четко проявляются в береговых уступах. Седловина перешейка Поясок разделяет крупные Центрально-Сахалинский и Южно-Сахалинский сегменты Хоккайдо-Сахалинской системы островных поднятий. Выявлено, что блоковая структура перешейка Поясок имеет в плане треугольную форму, слабо приподнятую денудационную поверхность; скорость вертикальных движений в его пределах замедлена по сравнению со структурами, расположенными южнее и севернее. В рамках территории, выбранной для исследования, выявлено, что перешеек Поясок разделяет участки с преобладанием разрывных нарушений различной господствующей направленности. Если гряды Центрально-Камышового блокового мегаподнятия образуют структурно-эрозионный тип рельефа, то в северной части Южно-Камышового мегаподнятия доминируют довольно крупные антиклинальные неотектонические структуры, ограниченные разломами северо-западного простирания Верхне-Черемшанским, Старицким и им подобным. Генеральное направление геодинамического воздействия определяет пространственное положение изосейст местных землетрясений, поэтому полученные данные целесообразно использовать при построении карт детального сейсморайонирования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке гранта Правительства Сахалинской области в форме субсидии молодым ученым на реализацию научно-исследовательского проекта (Постановление ПСО № 486 от 27.10.2022 г.), выданного Министерством цифрового и технологического развития Сахалинской области (Протокол № 2 от 12.12.2022 г).

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was performed with the support of a grant from the Government of the Sakhalin Region in the form of a grant to young scientists for the implementation of a research project (GSR Resolution No. 486 of 27.10.2022), issued by the Ministry of Digital and Technological Development of the Sakhalin Region (Protocol No. 2 of 12.12.2022).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аковецкий В.Г., Афанасьев А.В., Ильченко А.А. Аэрокосмический мониторинг в задачах оценки геоэкологических рисков аварийных разливов нефти и нефтепродуктов. Вычислительные технологии, 2021. Т. 26. № 1. С. 72–85. DOI: 10.25743/ICT.2021.26.1.006.

Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А. Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015. № 12 (5). С. 203–221.

Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии. Геодинамика и тектонофизика, 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736.

Бондур В.Г., Зверев А.Т. Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеаментов. Исследования Земли из космоса, 2005. № 3. С. 37–52.

Братков В.В., Воробьев В.А., Мелкий В.А., Верхотуров А.А. Картографирование динамики растительных сообществ северной части бореальных лесов острова Сахалин на основе данных дистанционного зондирования Земли. Мониторинг. Наука и технологии, 2020. № 3 (45). С. 6–13. DOI: 10.25714/MNT.2020.45.001.

Веселов О.В., Грецкая Е.В., Ильев А.Я., Кононов В.Э., Кочергин Е.В., Патрикеев В.Н., Семакин В.П., Сеначин В.Н., Агеев В.Н., Васюк И.Б., Волгин П.Ф., Злобина Л.М., Жигулев В.В., Корнев О.С., Кочергин А.В., Куделькин В.В. Тектоническое районирование и углеводородный потенциал Охотского моря. М.: Наука, 2006. 130 с.

Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. Неотектоника и активные разрывы Сахалина. М.: Наука, 2007. 185 с.

Долгополов Д.В., Мелкий В.А., Баборыкин М.Ю. Применение технологий дистанционного зондирования Земли для обеспечения геотехнического мониторинга и картографирования на трубопроводном транспорте. Региональные геосистемы, 2022. Т. 46. № 3. С. 339–355. DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-3-339-355.

Зверев А.Т., Малинников В.А., Ареллано-Баеса А. Изучение динамики линеаментов, вызванных землетрясениями в Южной Америке, с применением линеаментного анализа данных спутника ASTER (TERRA). Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2005. № 5. С. 56–65.

Карпик А.П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий: монография. Новосибирск: Сибирская гос. геодез. акад. (СГГА), 2004. 259 с.

Кравцова В.И. Возможности сравнения разновременных снимков различного разрешения при исследованиях динамики северных дельт. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 1. С. 277–291. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-277-291.

Кудрина М.А. Использование преобразования Хафа для обнаружения прямых линий и окружностей на изображении. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2014. Т. 16. № 4 (2). С. 476–478.

Купцова О.В., Верхотуров А.А., Мелкий В.А. Картографирование разломов на территории Северо-Сахалинской равнины по данным дистанционного зондирования земли. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 1. С. 317–329. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-317-329.

Ломтев В.Л., Жердева О.А. К сейсмотектонике Сахалина: новые подходы. Геология и полезные ископаемые Мирового океана, 2015. № 3. С. 56–68.

Малинников В.А., Алтынов А.Е., Попов СМ., Стеценко А.Ф. Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами. М.: МИИГАиК, 2009. 140 с.

Мелкий В.А., Тикунова И.Н., Еремченко Е.Н., Черешня О.Ю., Хиромичи Фукуи, Марта С., Тахджана Я. Геоинформационная поддержка принятия решений по использованию энергетических ресурсов Сахалина. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2017. Т. 23. Ч. 3. С. 132–143. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-3-23-132-143.

Рождественский В.С. Роль сдвигов в формировании структуры о. Сахалин. Геотектоника, 1982. № 4. С. 99–111.

Романюк В.А., Пищальник В.М., Зарубина Д.В. Анализ вариаций ледовитости Охотского моря на основе авиационных и спутниковых наблюдений. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 5–34. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-441-449.

Савиных В.П., Малинников В.А., Учаев Д.В., Учаев Дм.В. Автоматизированная технология дешифрирования и анализа линейных и кольцевых структур на космических изображениях. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2012. № 6. С. 53–65.

Сергеев К.Ф. О тектонической природе поднятия Западно-Сахалинских гор. Тихоокеанская геология, 1982. № 1. С. 75–83.

Стрельцов М.И., Кожурин А.И. Активные разломы и катастрофические землетрясения Сахалина (Апреловский активный разлом, результаты тренчинга). Южно-Сахалинск: Институт морской геологии и геофизики Сахалинского научного центра ДВО РАН, 2002. 4 с.

Уломов В.И. Оценка сейсмической опасности и актуализация инженерных решений. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2008. № 3. С. 16–21.

Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации — ОСР-97. Масштаб 1: 8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 57 с.

Харахинов В.В., Гальцев-Безюк С.Д., Терещенков А.А. Разломы Сахалина. Тихоокеанская геология, 1984. № 2. С. 77–86.

Шевырев С.Л. Программа LEFA: автоматизированный структурный анализ космической основы в среде Matlab. Успехи современного естествознания, 2018. № 10. С. 138–143.

Ballard D.H. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. Pattern Recoqnition, 1981. V. 13. No. 2. P. 111–122.

Canny J.F. A computational approach to edge detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986. V. 8. P. 679–698.

Hiromichi F., Man D.C., Phan A. Digital Earth: A platform for the SDGs and green transformation at the global and local level, employing essential SDGs variables. Big Earth Data, 2021. V. 5. No. 4. P. 476–496. DOI: 10.1080/20964471.2021.1948677.

Kuptsova O.V., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A. Identification of disjunctive dislocations as one of the parameters for estimating a territory seismicity of North Sakhalin. 4th GeoProNH. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. V. 946. Id. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/946/1/012003.

Mercante E., Antunes J.F.G. Simulation of a gas pipeline pathway integrating remote sensing data and geographic information systems. Acta Scientiarum. Technology, 2010. V. 32. No. 2. P. 171–178.

Xue L.-Y., Pan J.-J. Edge detection combining wavelet transform and Canny operator based on fusion rules. IEEE. 2009 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 2009. P. 324–328. DOI: 10.1109/ICWAPR.2009.5207422.

REFERENCES

Akovetskiy V.G., Afanasiev A.V., Ilchenko A.A. Aerospace monitoring in the problems for assessment of geoecological risks for accidental spills of oil and petroleum products. Computational technologies, 2021. V. 26. No. 1. P. 72–85 (in Russian). DOI: 10.25743/ICT.202 1.26.1.006.

Bachmanov D.M., Kozhurin A.I., Trifonov V.G. Database of active faults of Eurasia. Geodynamics and tectonophysics, 2017. V. 8. No. 4. P. 711–736 (in Russian).

Ballard D.H. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. Pattern Recognition, 1981. V. 13. No. 2. P. 111–122.

Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A. Current state and development prospects of satellite mapping methods of Russia's vegetation cover. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2015. V. 12. No. 5. P. 203–221 (in Russian).

Bondur V.G., Zverev A.T. A Method of Earthquake forecast based on the lineament dynamic analysis using satellite imagery. Issledovanie Zemli iz Kosmosa, 2005. No 3. P. 37–52 (in Russian).

Bratkov V.V., Vorobyov V.A., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A. Mapping the dynamics of plant communities in the northern part of the boreal forests of Sakhalin Island based on remote sensing data. Monitoring. Science and technology, 2020. No. 3 (45). P. 6–13 (in Russian). DOI: 10.25714/MNT.2020.45.001.

Canny J.F. A computational approach to edge detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986. V. 8. P. 679–698.

Dolgopolov D.V., Melkiy V.A., Baborykin M.Yu. The use of earth remote sensing technologies to provide geotechnical monitoring and mapping in pipeline transport. Regional Geosystems, 2022. V. 46 (3). P. 339–355 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-3-339-355.

Hiromichi F., Man D.C., Phan A. Digital Earth: A platform for the SDGs and green transformation at the global and local level, employing essential SDGs variables. Big Earth Data, 2021. V. 5. No. 4. P. 476–496. DOI: 10.1080/20964471.2021.1948677.

Karpik A.P. Methodological and technological bases of geoinformation support of territories: monograph. Novosibirsk: Siberian State Geodesy Academy (SSGA), 2004. 259 p.

Kharakhinov V.V., Galtsev-Bezyuk S.D., Tereshchenkov A.A. Faults of Sakhalin. Pacific Geology, 1984. No. 2. P. 77–86 (in Russian).

Kravtsova V.I. The possibilities of comparing for multitemporal imagery of various resolution under the northern river deltas dynamics investigation. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2021. V. 27. Part 1. P. 277–291 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-277-291.

Kudrina M.A. Using Hough transformation for detecting lines and circles in pictures. Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2014. V. 16. No. 4 (2). P. 476–478 (in Russian).

Kuptsova O.V., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A. Identification of disjunctive dislocations as one of the parameters for estimating a territory seismicity of North Sakhalin. 4th GeoProNH. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. V. 946. Id. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/946/1/012003.

Kuptsova O.V., Verkhoturov A.A., Melkiy V.A. Mapping of faults on territory of the North Sakhalin plain by remote sensing data. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2021. V. 27. Part 1. P. 317–329 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-317-329.

Lomtev V.L., Zherdeva O.A. To seismotectonic Sakhalin: new approaches. Geology and useful minerals of the World Ocean, 2015. No. 3. P. 56–68 (in Russian).

Malinnikov V.A., Altynov A.E., Popov S.M., Stetsenko A.F. Monitoring of the natural environment by aerospace means. Moscow: MIIGAiK, 2009. 140 p. (in Russian).

Melkiy V.A., Tikunova I.N., Eryomchenko E.N., Chereshnia O.Y., Hiromichi F., Sukendra M., Tahjana J. GIS decision-making support for the use of energy resources of Sakhalin. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2017. V. 23. Part 3. P. 132–143 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2017-3-23-132-143.

Mercante E., Antunes J.F.G. Simulation of a gas pipeline pathway integrating remote sensing data and geographic information systems. Acta Scientiarum. Technology, 2010. V. 32. No. 2. P. 171–178.

Romanyuk V.A., Pishchal'nik V.M., Zarubina D.V. Analysis of the ice cover variations in the arctic sea of Okhotsk based on aircraft and satellite observations InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2022. V. 28. Part 1. P. 441–449 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-441-449.

Rozhdestvensky V.S. The role of shifts in the formation of the structure of Sakhalin Island. Geotectonics, 1982. No. 4. P. 99–111 (in Russian).

Savinykh V.P., Malinnikov V.A., Uchaev D.V., Uchaev Dm.V. Automated technology of decoding and analysis of linear and ring structures in satellite images. Izvestia vuzov "Geodesy and Aerophotosurveying", 2012. No. 6. P. 53–65 (in Russian).

Sergeev K.F. On the tectonic nature of the uplift of the Western Sakhalin Mountains. Pacific geology, 1982. No. 1. P. 75–83 (in Russian).

Shevyrev S.L. LEFA software: an automatized structural analysis of remote sensing imagery in MATLAB environment. Advances in current natural sciences, 2018. No. 10. P. 138–143 (in Russian).

Streltsov M.I., Kozhurin A.I. Active faults and strong earthquakes in Sakhalin Isl. (Aprelovka active fault, results of trenching). Yuzhno-Sakhalinsk: Institute of Marine Geology & Geophysics FEB RAS, 2002. 4 p. (in Russian).

Ulomov V.I. Seismic hazard assessment and updating of engineering solutions. Earthquake engineering. Constructions safety, 2008. No. 3. P. 16–21 (in Russian).

Ulomov V.I., Shumilina L.S. A set of maps of the general seismic zoning of the territory of the Russian Federation — OSR-97. Scale 1: 8 000 000. Explanatory note and list of cities and settlements located in earthquake-prone areas. Moscow: UIFE RAS, 1999. 57 p. (in Russian).

Veselov O.V., Gretskaya E.V., Ilyev A.Ya., Kononov V.E., Kochergin E.V., Patrikeev V.N., Semakin V.P., Senachin V.N., Ageev V.N., Vasyuk I.B., Volgin P.F., Zlobina L.M., Zhigulev V.V., Kornev O.S., Kochergin A.V., Kudelkin V.V. Tectonic zoning and hydrocarbon potential of the Sea of Okhotsk. Moscow: Nauka, 2006. 130 p. (in Russian).

Voeikova O.A., Nesmeyanov S.A., Serebryakova L.I. Neotectonics and active breaks of Sakhalin. Moscow: Nauka, 2007. 185 p. (in Russian).

Xue L., Pan J. Edge detection combining wavelet transform and Canny operator based on fusion rules. IEEE. 2009 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, IEEE, 2009. P. 324–328. DOI: 10.1109/ICWAPR.2009.5207422.

Zverev A.T., Malinnikov V.A., Arellano-Baesa A. Studying dynamics of lineaments caused by earthquakes in South America, using the lineament analysis of ASTER (TERRA) satellite data. Izvestia vuzov "Geodesy and aerophotosurveying", 2005. No. 5. P. 56–65 (in Russian).

DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-361-377

УДК: 551.4.03+528.067.4

Л.Н. Трофимец[1], Е.А. Паниди[2], Б.И. Кочуров[3], Н.Н. Чаадаева[4], А.П. Тяпкина[5], А.М. Сараева[6], А.В. Тарасов[7], А.О. Баркалов[8], А.И. Петелько[9]

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЭРОЗИОННЫХ ПОТЕРЬ ПОЧВЫ НА РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКАХ РАСПАХИВАЕМОГО СКЛОНА (БАССЕЙН ВЕРХНЕЙ ОКИ)

АННОТАЦИЯ

В работе приводятся результаты подробных исследований эрозионных потерь почвы с использованием радиоцезиевого метода за послечернобыльский период в пределах экспериментального полигона, расположенного в Орловском районе Орловской области (бассейн верхней Оки). Приводится анализ условий увлажнения в последние десятилетия и в 2021–2022 гг., когда было отмечено увеличение грунтового питания рек и озер. Установлено, что, несмотря на снижение объема талых вод в последние годы, интенсивные апрельские осадки оказывают сильное эродирующее действие на почву. Анализ температурных условий подтвердил факт потепления зимнего сезона в последнее десятилетие и в 2022 г. Эрозионный потенциал талых вод уменьшился почти вдвое. Интенсивные осадки в сентябре – октябре 2021 г., теплая зима и интенсивные дожди в апреле 2022 г. обусловили интенсивный смыв почвы весной. В почве после промерзания и оттаивания нарушается межагрегатное сцепление, и интенсивные весенние осадки формируют смыв. Смыв почвы на изучаемом поле осуществляется по сложной системе ложбин и эрозионных борозд. В статье излагаются основные подходы к разработке полуэмпирической методики расчета потерь почвы вследствие эрозии и разработанные на ее основе уравнения, полученные для 6 участков, отличающихся строением поверхности. Основу методики составили материалы авторских полевых исследований, выполненных в 2014–2017 гг. Оценены зависимости удельной активности цезия-137 от морфометрических показателей рельефа «площадь сбора» и «профильная кривизна». Опорное значение цезия-137 принято по данным послойных измерений по глубине в пределах 3 блочных повышений

[1] Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail:* **trofimetc_l_n@mail.ru**

[2] Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Кафедра картографии и геоинформатики, 10-я линия Васильевского острова, д. 33, Санкт-Петербург, Россия, 199178, *e-mail:* **panidi@ya.ru; e.panidi@spbu.ru**

[3] Институт географии РАН, Старомонетный пер., д. 29, Москва, Россия, 119017, *e-mail:* **camertonmagazin@mail.ru**

[4] Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail:* **n.chaadaeva@list.ru**

[5] Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail:* **angelikpt@mail.ru**

[6] Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail:* **amsaraeva-osu@yandex.ru**

[7] Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Медицинский институт, Кафедра внутренних болезней, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail:* **arcorel@yandex.ru**

[8] Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail:* **7oup@mail.ru**

[9] Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, ул. Семашко, д. 2а, Мценск, Россия, 303035, *e-mail:* **zaglos@mail.ru**

на водораздельной поверхности. Положенные в основу расчета смыва почвы уравнения позволили построить сеточную карту интенсивности эрозионных потерь почвы для склоновой поверхности южной экспозиции. Расчет смыва почвы при условии принятия глубины пахотного слоя 25 см и плотности почвы 1110 г/м^3 показал, что на изучаемом участке серых лесных тяжелосуглинистых почв смыв почвы меняется от 5 т/га•г. до более чем 20 т/га•г. Предложенная методика может быть уточнена за счет укрупнения масштаба исследований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радиоцезиевый метод, интенсивность смыва почвы, ГИС, площадь сбора, профильная кривизна

Lyubov N. Trofimetz[1], Evgeny A. Panidi[2], Boris I. Kochurov[3], Natalya N. Chaadaeva[4], Angela P. Tyapkina[5], Anna M. Saraeva[6], Arkady V. Tarasov[7], Aleksandr O. Barkalov[8], Anatoly I. Petelko[9]

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF EROSIONAL SOIL LOSS IN VARIOUS AREAS OF THE ARABLE SLOPE (UPPER OKA BASIN)

ABSTRACT

The paper presents the results of detailed erosional study of soil loss observed during the post-Chernobyl period. Radiocaesium method was applied in the experimental area located in Oryol district of the Oryol region (Upper Oka basin). The humidification conditions analysis was conducted for recent decades (2021–2022), an increase in the groundwater supply of rivers and lakes was observed. It was found that intense April precipitation has a strong erosional impact onto the soil cover, despite the decrease in the volume of meltwater in recent years. The analysis of temperature conditions confirmed the warming of the winter season in the last decade and in 2022, erosional potential of meltwater has almost halved. Intense precipitation in September and October of 2021, a warm winter and intense rains in April 2022 caused intensive soil washing in spring. The inter-aggregate adhesion is disrupted in the soil after freezing and consequent thawing, so the intense spring precipitation forms a soil washout. Soil runoff in the studied area is carried out by a complex system of furrows and erosional ravines. The article describes the main approaches applied to develop a semi-empirical methodology for erosional soil loss estimation, and the

1 Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Oryol, 302026, Russia, *e-mail:* **trofimetc_l_n@mail.ru**

2 Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, 33, 10th line of Vasilyevsky island, St. Petersburg, 199178, Russia, *e-mail:* **panidi@ya.ru; e.panidi@spbu.ru**

3 Institute of Geography RAS, 29, Staromonetny ln., Moscow, 119017, Russia, *e-mail:* **camertonmagazin@mail.ru**

4 Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Oryol, 302026, Russia, *e-mail:* **n.chaadaeva@list.ru**

5 Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Oryol, 302026, Russia, *e-mail:* **angelikpt@mail.ru**

6 Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Oryol, 302026, Russia, *e-mail:* **amsaraeva-osu@yandex.ru**

7 Orel State University, Medical Institute, Department of Internal Medicine, 95, Komsomolskaya str., Oryol, 302026, Russia, *e-mail:* **arcorel@yandex.ru**

8 Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Oryol, 302026, Russia, *e-mail:* **7oup@mail.ru**

9 Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 2a, Semashko str., Mtsensk, 303035, Russia, *e-mail:* **zaglos@mail.ru**

equations obtained on its basis for six zones of studied area differing in the structure of the surface. The methodology is based upon the in-situ data collected by authors in 2014–2017. The dependences of caesium-137 specific activity on morphometric variables (namely catchment area and profile curvature) are estimated. The reference value of caesium-137 specific activity was establish reducing the results of layer-by-layer in-depth measurements within three block elevations on the watershed. The equations used for the calculation of soil runoff amount were applied to produce a grid map of the soil runoff intensity for the sloping surface of the southern exposure. Estimation of the soil runoff (provided under the conditions of 25 cm arable layer depth and 1110 g/m^{3}soil material density) shows that in the studied area of gray forest heavy loam soils, the soil runoff value varies from 5 t/ha/year to more than 20 t/ha/year. The proposed methodology can be refined by enlarging the (spatial) scale of research.

KEYWORDS: radiocaesium method, soil runoff intensity, GIS, catchment area, profile curvature

ВВЕДЕНИЕ

Радионуклид цезий-137 все чаще используется как маркер для расчета эрозионных потерь почвы [*Ларионов*, 1993; *Литвин* и др., 1996; *Walling*, *He*, 1999; *Zhidkin* et al., 2022]. Используя средства автоматизации, доступные в универсальных географических информационных системах (ГИС), возможно точечно оценивать эти потери, если известны точечные значения содержания цезия-137 в почве. Точечные значения, в свою очередь, можно получить в результате отбора проб, сопровождаемого ГНСС-съемкой (определением координат) точек, в которых из слоя 0–25 см отбираются пробы почвы с последующим их гамма-спектрометрическим анализом. Совместное использование полевых исследований, морфометрического анализа рельефа с использованием ГИС и радиоцезиевого метода делают возможным поиск количественных связей в системе рельеф-почва. Как утверждают Савин с соавторами [*Савин* и др., 2019], «…при использовании точечных полевых данных в рамках подходов ЦПК (цифрового почвенного картографирования) достаточно составить представительную обучающую выборку и выбрать подходящий метод для построения статистической модели». Применительно к нашей задаче — построению картины латерального распределения потерь почвы на основе радиоцезиевого метода и ГИС, можно утверждать, что в случае, если удастся разработать алгоритм расчета активности цезия-137 чернобыльского происхождения по морфометрическим показателям рельефа для характерных участков изучаемого сельскохозяйственного поля, в первом приближении будут найдены индикаторы для выделения участков поверхности, отличающихся по характеру влияния рельефа на потери почвы. Впоследствии разработанный алгоритм может быть расширен за счет учета свойств почв и других (кроме рельефа) факторов почвообразования. При этом рельеф, несомненно, окажется важнейшим в ряду факторов. Н.М. Сибирцев в 1901 г., говоря о пестроте пахотных земель в России, писал: «комбинаций существует, конечно, много, они весьма различны по качеству участвующих почв и по их количественным соотношениям. Но для каждой местности число их вовсе не безгранично, и они повторяются множество раз с замечательной правильностью и постоянством» [*Сибирцев*, 1951].

Выбрав в качестве экспериментального участка участок сельскохозяйственного поля, расположенного в пределах склоновой поверхности в Орловской области, в лесостепной зоне, в левобережье р. Оки (в бассейне ее левого притока р. Сухой Орлицы), в зоне серых лесных почв, мы можем ожидать, что разрабатываем алгоритмы, которые могут быть использованы при формировании обучающей модели для определенной комбинации почв, свойственных этой местности. В частности, можно ожидать, что похожие почвенные

комбинации (в пределах склоновых поверхностей, для которых характерен комплекс форм рельефа, существовавших некогда в перигляциальных областях Русской равнины) будут встречаться «с замечательной правильностью и постоянством».

Известно, что в почвенном картографировании формы рельефа с колебаниями относительных отметок 1–10 м относят к формам мезорельефа, до 1 м — микрорельефа, до 30 см — нанорельефа. Такое подразделение с большой достоверностью позволяет устанавливать связь между генетическими типами рельефа и закономерностями пространственного размещения компонентов почвенного покрова [*Евдокимова*, 1981]. На рассматриваемом экспериментальном участке (рис. 1) встречаются все перечисленные формы рельефа. Сложность учета в расчетных моделях потерь почвы современного строения поверхности состоит еще и в том, что смыв почвы проходит не только по тальвегам ложбин разного размера. Изучаемое поле пересечено свально-развальными бороздами (результат неправильной организации обработки почвы). Анализ спутниковых снимков показал, что свально-развальные борозды разных лет (обнаруживаются на спутниковых снимках) на отдельных участках поля накладываются друг на друга. Причина, видимо, в том, что пахота начиналась от одного и того же «постоянного начала» в разные годы. Понижения в рельефе, как показали полевые наблюдения и анализ спутникового снимка сверхвысокого разрешения (0,5 м/пикс), часто оказываются приуроченными не к тальвегам ложбин, а к тальвегам свально-развальных борозд. Это выясняется при нанесении координат точек отбора проб почвы на спутниковый снимок. Картина усложняется и микроручейковой сетью. Весенний сток талых вод осуществляется по сложной системе ложбин и эрозионных борозд.

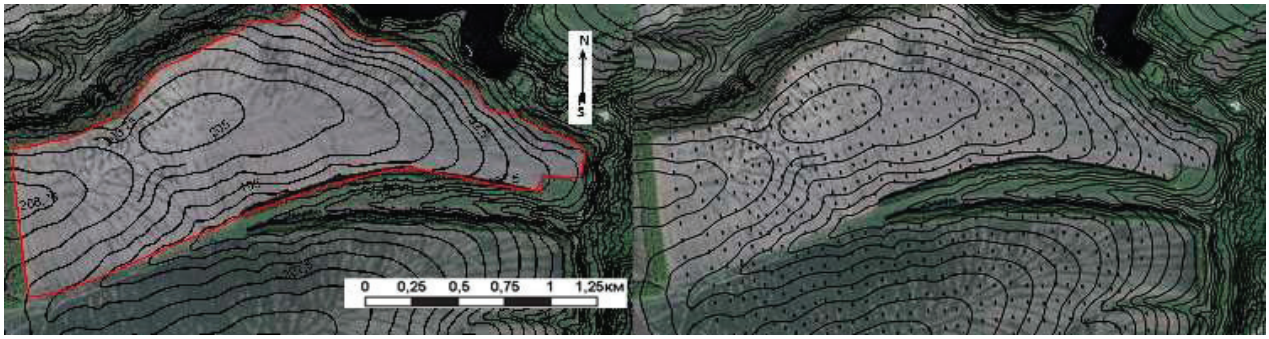


Рис. 1. Экспериментальный участок в бассейне р. Сухая Орлица на спутниковом снимке (слева, выделен красным контуром). Справа пунктиром показаны свально-развальные борозды, ориентированные вдоль падения склона

Fig. 1. Experimental area in the Sukhaya Orlitsa River basin in a satellite image (in the left image, bounded by the red line). In the right the dotted lines show the dump furrows oriented along the dip of the slope

Условия формирования смыва почвы в последние десятилетия изменились. Об этом свидетельствует тот факт, что интенсивность доставки смытой почвы в принимающие балки на рассматриваемом участке в 1986–2020 гг. сократилась по сравнению с периодом 1963–1986 гг. в 1,7–6 р. [*Трофимец* и др., 2022]. Понять, что в большей степени повлияло на уменьшение смыва почвы в изучаемом регионе можно, проанализировав особенности режима температур и осадков в осеннее-зимний и весенний периоды «после-чернобыльских» лет. Зимние месяцы стали теплее. В декабре в 1986–2020 гг. (по сравнению с 1946–1963 гг.) средняя месячная (и максимальная месячная) температура чаще превышала 0 °С (в 4 р. чаще). В последние годы не отмечалось ни одного года, когда бы средняя

месячная температура в январе превысила 0 °С. Но число лет с максимальной температурой в январе, превысившей 0 °С, выросло в 4 р. Число лет с максимальной месячной температурой в феврале, превысившей 0 °С, выросло до 17 в 1986–2020 гг. (в 1946–1963 гг. такие случаи не зарегистрированы). Это говорит о том, что в последние десятилетия увеличилась повторяемость оттепельных периодов, что отмечают многие исследователи. В частности, Долгов с соавторами [2018] утверждают, что «…за период наблюдений с конца 1950-х годов по 2016 год… во время весеннего половодья и за холодный период в целом инфильтрация значительно преобладает над поверхностным склоновым стоком».

Анализ эрозионного потенциала талых вод, проведенный авторами настоящей статьи, показал, что после 1986 г. эрозионный потенциал талых вод уменьшился вдвое. Отдельно приводится анализ условий формирования эрозионного потенциала талых вод в 2022 г., когда впервые за последние годы на реках Орловской обл. было отмечено сравнительно высокое половодье. В 2022 г. заполнилась водой чаша пересыхающего оз. Индовище в Шаблыкинском р-не. Авторы статьи объясняют это сочетанным действием 3 факторов: осенью 2021 г. интенсивные осадки увлажнили почво-грунты на водосборах; зимой оттепели пополнили влагозапасы в почве; весной интенсивные осадки в конце марта − начале апреле вместе с талыми водами сформировали приток в водоемы талых и дождевых вод. Авторы высказывают мнение, что интенсивный смыв почвы в последние годы происходит не столько летом (в результате эродирующего действия ливневых осадков), сколько весной, если интенсивные осадки выпадают в конце марта − начале апреля на почву, оттаявшую с поверхности и ставшую податливой к эродирующему воздействию талых и дождевых вод. Все вышесказанное свидетельствует о том, что для изучаемого экспериментального участка полуэмпирические подходы к построению методики расчета потерь почвы вследствие эрозии являются сегодня наиболее предпочтительными.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эрозионный потенциал талых вод. В работе приводятся результаты анализа условий, влияющих на формирование эрозионного потенциала талых (за период 1959–2016 гг.) и дождевых (1946–2022 гг.) вод. Анализ эрозионного потенциала талого стока проводился с использованием данных Новосильской зональной агролесомелиоративной опытной станции им. А.С. Козменко (ЗАГЛОС). Эрозионный потенциал (Е) рассчитывался по формуле (1):

$$E = S \times a_c \quad (1),$$

где S — максимальный запас воды в снежном покрове (мм),
a_c — интенсивность снеготаяния в часы пик (0,20 мм/мин [*Иванова* и др., 2020]).

Анализ показал, что на зяби за период 1959–1986 (27 лет) эрозионный потенциал талого стока в 15 годах превысил 20. В 4 из 27 лет эрозионный потенциал талых вод превысил 30 (рис. 2).

После 1986 г. (30 лет) лишь в 9 годах эрозионный потенциал талого стока превысил 20, и ни в одном году не превысил 30. На уплотненной пашне за период 1959–1986 гг. в 17 годах из 27 эрозионный потенциал талого стока превысил 20, в 6 годах превысил 30 и в 1 год превысил 40. После 1986 г. на уплотненной пашне не было ни одного года, когда бы эрозионный потенциал талого стока превысил 40. Лишь в 1987 г. он превысил 30. Превышение эрозионным потенциалом талого стока величины 20 отмечено в 9 годах (это почти в 2 р. меньше, чем до 1986 г.). Приведенные данные свидетельствуют о том, что инфильтрация влаги в почву после 1986 г. была больше, чем до 1986 г. Казалось бы, можно

согласиться с мнением Жидкина с соавторами [*Zhidkin* et al., 2022], что смыв почвы в последние годы формируется преимущественно ливневыми осадками. Однако полевые наблюдения авторов настоящей статьи показали, что сток по ложбинам и по эрозионным бороздам весной идет достаточно интенсивно (рис. 2). Чем он вызван — талыми водами, осадками или и тем и другим? Для ответа на этот вопрос авторы проанализировали осадки в апреле – мае 2022 г., когда на изучаемом поле были обнаружены следы глубоких эрозионных борозд (рис. 2). Анализ показал, что, скорее всего, в последние годы наиболее интенсивный смыв почвы проходит не летом, а весной. Наиболее интенсивны потери почвы в те годы, когда в период оттепелей нарушается микроагрегатное состояние почвы, и осадки в апреле достаточно интенсивны (превышают 10 мм/сут.). На рисунке 3 видно, что интенсивные осадки в апреле 2022 г. не могли не вызвать формирование разветвленной микроручейковой сети на изучаемом поле, которая выносила почву в балочную сеть. Возникает вопрос, почему на стоковых площадках ЗАГЛОС не фиксировался сток ни с зяби, ни с уплотненной пашни в 2022 г. Этот вопрос остается открытым.

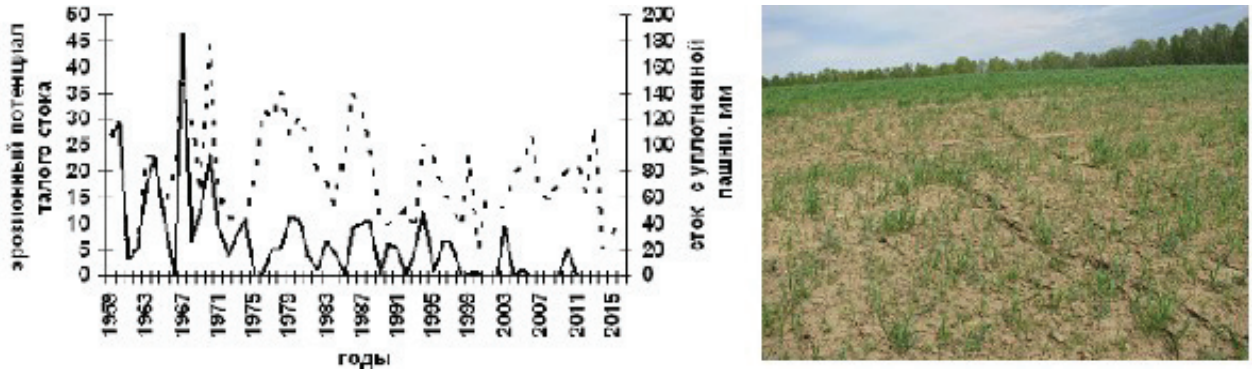


Рис. 2. Слева — совмещенный график хода эрозионного потенциала талых вод и стока с уплотненной пашни. Пунктирная линия — эрозионный потенциал талых вод. Справа — вид эрозионных борозд на местности, на склоне южной экспозиции, май 2022 г. Фото Л.Н. Трофимец

Fig. 2. Combined graphs of the meltwater erosion potential and runoff from compacted arable soil cover — on the left (dotted line is the graph of erosion potential). On the right — a view of erosion furrows on the terrain, southern exposure slope, May 2022. Photo by L.N. Trofimets

Следует согласиться с мнением исследователей степных агроландшафтов Поволжья, что наиболее опасны для потерь почвы интенсивные осадки апреля, мая, июня, сентября [*Евсеева* и др., 2018]. В эти месяцы поля или еще не защищены всходами сельскохозяйственных культур, или почва находится в состоянии распаханности.

Анализ повторяемости интенсивных осадков по метеостанции Орел показал, что апрель 2022 г. отличался большой повторяемостью интенсивных осадков (табл. 1).

Табл. 1. Повторяемость интенсивных осадков в апреле в 1946–2022 гг.(метеостанция Орел)
Table 1. The frequency of intense precipitation in April of 1946–2022 (Orel weather station)

Период	**Апрель (повторяемость интенсивных осадков)**		
	10 мм	**20 мм**	**30 мм**
1946–1986(41)	32	5	1
1987–2020(34)	9		
2022(1)	9		

Из табл. 1 видно, в апреле 2022 г. за месяц было 9 дней с интенсивными осадками (не менее 10 мм). За 34 года (в 1987–2020 гг.) отмечено всего 9 случаев с осадками такой интенсивности в апреле.

Анализ осадков в летне-осенние месяцы за ряд последних лет (2010–2022 гг.) показал, что ни в одном месяце не отмечалось такой частой повторяемости интенсивных осадков, как в апреле 2022 г. Следовательно, микроручьи (фото на рис. 2) сформировались в результате деятельности талых вод, усиленных интенсивными осадками. На рис. 3 видно, что каждую неделю шли дожди с интенсивностью более 10 мм. Эрозионный потенциал их достигал в марте и апреле 6. Он рассчитывался по формуле (2) [*Ларионов*, 1993]:

$$D = 0{,}25841 \times H \times I_{30} - 0{,}14921 \qquad (2),$$

где D — эрозионный потенциал осадков,
H — слой выпавших осадков (21 мм),
I_{30} — максимальная интенсивность дождя за 30-минутный интервал, мм/мин (24 мм).

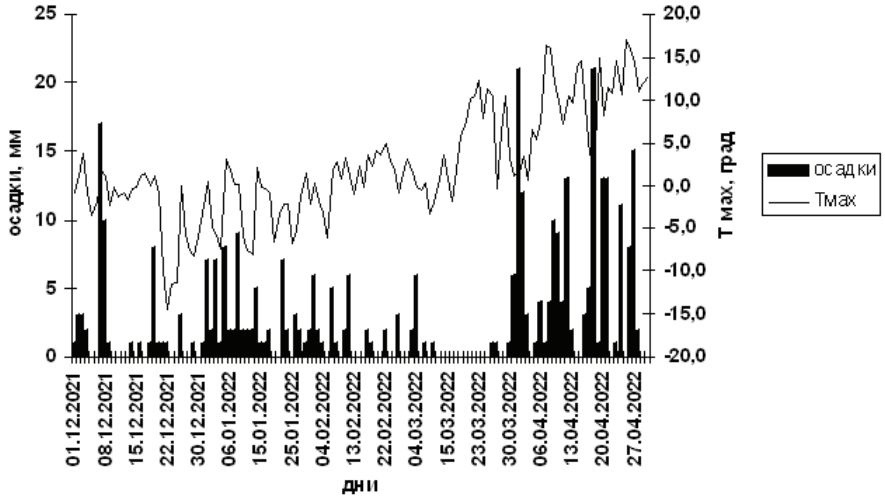


Рис. 3. Совмещенный график хода максимальных температур и осадков (с 01.01.2021 по 27.04.2022)
Fig. 3. Combined graph of the maximum temperature and precipitation values (from 01.01.2021 to 27.04.2022)

Отдельно были проанализированы интенсивные осадки (интенсивностью не менее 10 мм) за период 2011–2022 гг. Именно в этот период (за исключением 2018 г., когда сток с зяби составил 8,1 мм) стоковая площадка ЗАГЛОС фиксировала в течение всего весеннее-осеннего периода нулевой сток с зяби и с уплотненной пашни. В табл. 2 приведена повторяемость осадков разной интенсивности. Обращает на себя внимание, что наиболее часто (3–4 р. в месяц) интенсивные осадки отмечались в июне – августе, а в 2021 и 2022 гг. — и в сентябре – октябре. В сентябре и октябре 2021 г. суточная сумма осадков достигала 27–40 мм, причем в обоих месяцах по 3 дня шли дожди с интенсивностью не менее 10 мм. Такое увлажнение почв осенью привело к увеличению подземного питания водоемов на территории области. Последовавший затем зимний сезон, нарушаемый оттепельными периодами (рис. 3), усугубил ситуацию. Бессточное оз. Индовище (памятник природы в Шаблыкинском р-не Орловской обл.), в сухом днище которого авторы в 2020 г. отбирали пробы почвы, весной 2022 г. заполнилось водой (фото на рис. 4). Озеро могло

заполниться водой в результате притока грунтовых вод (запас которых сформировался осенью – зимой 2021–2022 гг.) и апрельских интенсивных осадков.

Таким образом, процесс смыва почвы на изучаемом участке в 2022 г. был подготовлен осенними интенсивными осадками, теплой зимой с оттепелями (максимальные температуры достигали в январе 3,8 °С, в феврале — 4,9 °С, в марте — 12,2 °С), интенсивными осадками в апреле (осадки непрерывно продолжались по 5–14 дней, с максимальным суточным слоем, достигавшим 20 мм). Потери почвы, обусловленные эрозионным воздействием талых вод, вероятно, были наиболее интенсивны с 19 по 29 марта 2022 г. В эти дни максимальная температура находилась в пределах 5–10 °С (рис. 3).

Табл. 2. Повторяемость осадков разной интенсивности в апреле – октябре 2011–2022 гг.
Table 2. The frequency of different intensity precipitation in April – October of 2011–2022

Год	Апрель		Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь	
≥Хмм	≥10	≥20	≥10	≥20	≥10	≥20	≥10	≥20	≥10	≥20	≥10	≥20	≥10	≥20
2011	1		—		1	1	4	3	5	2(30*)	2		—	
2012	1		—		3	1	2		4		—		4	1
2013	1		2	1	3	1		—	2		—		—	
2014	1		4	3	3	1	1		—		1	1 (30)	—	
2015	1		1	1	2	1	1		—		2		—	
2016	2		1	1	3		5	1 (40)	3	1 (40)	—		2	1 (30)
2017	1		1	1	1	1	6	1 (50)	3		—		1	
2018	—		1		—		4	1 (20)	—		1		1	
2019	1		4	2	1	1	2	1 (30)	1		1		1	
2020	—		2		3	1	4	1	—		—		1	
2021	1		—		1		2	1	2		3	3 (1–40)	3	1 (27)
2022	9		1		1	1	2	1	1		4	1	2	1

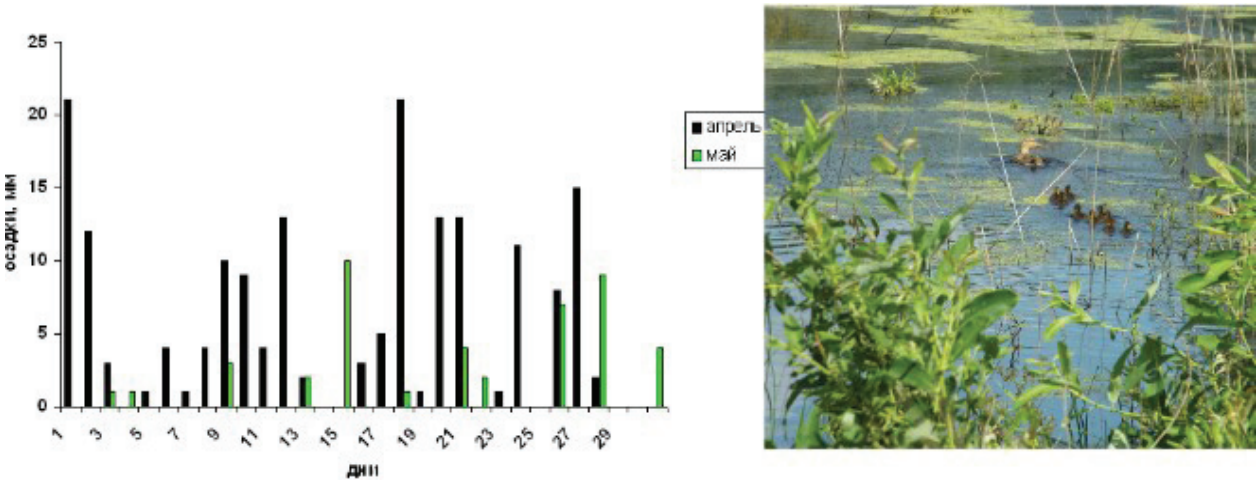


Рис. 4. Совмещенный график хода осадков в апреле – мае 2022 г. (слева). Вид заполненного водой озера Индовище в 2022 г. (справа)

Fig. 4. Combined graph of the precipitation in April – May of 2022 (in the left image). A view of the Indovishche Lake filled with water in 2022 (in the right image)

Как показали исследования Окулик [2006] «…период весеннего снеготаяния, когда среднесуточная температура воздуха находится в интервале 4,1–5,0 °С, является наиболее опасным в эрозионном отношении. В почве после зимне-весенних циклов промерзания-оттаивания нарушено межагрегатное сцепление. Почва при нарастании положительных температур оттаивает с поверхности и становится чрезвычайно податливой к эродирующему воздействию временных водных потоков». После 29 марта пошли дожди (рис. 3, 4), «заработал» их эрозионный потенциал.

Не менее сложно формируется смыв почвы на разных участках склоновой поверхности. Говоря об эрозионном потенциале рельефа, следует отметить, что поверхность изучаемого поля нарушена системой ложбин разного размера. Воднобалансовые наблюдения на изучаемом участке не ведутся, поэтому расчет потерь почвы вследствие эрозии предпочтительно делать, используя расчетные методы.

Для осуществления цели настоящей работы — разработки подходов к созданию полуэмпирической методики расчета интенсивности потерь почвы вследствие эрозии — авторы в качестве основного метода использовали радиоцезиевый метод.

Радиоцезиевый метод и ГИС. Цезий-137 чернобыльского происхождения, являясь маркером почв разной степени смытости [*Шамшурина* и др., 2016; *Мальцев* и др., 2019], позволяет идентифицировать участки, отличающиеся по величине эрозионного потенциала рельефа. В настоящей работе за интегральные показатели эрозионного потенциала рельефа были приняты рассчитанная в ГИС площадь сбора [*Шарый*, 2005; *Costa-Cabral*, *Burges*, 1994] и знак профильной кривизны [*Evans*, 1972]. В основу выделения характерных участков были положены зависимости активности цезия-137 от площади сбора и знака профильной кривизны.

Были выделены 6 характерных участков, для которых решалась задача создания расчетной методики оценки активности цезия-137, а по ней — смыва почвы в точке. Микроручейковая сеть на склоновой поверхности экспериментального участка сельскохозяйственного поля (рис. 1, 3), которая дополняет систему ложбин и свально-развальных борозд, сформировавшуюся на изучаемом поле за долгие годы пахоты вдоль склона, в настоящей работе не рассматривалась. Она требует отдельного рассмотрения.

Как было сказано выше, наиболее полно учесть смыв почвы со склонов, нарушенных сложной системой эрозионных борозд, можно с помощью радиоцезиевого метода. Почвенно-морфологический метод потребовал бы большого количества прикопок [*Zhidkin* et al., 2022]. Для создания подробной картины эрозионных потерь необходимо было бы в нашем случае сформировать сеть прикопок в нижней части склона южной экспозиции на выходе из каждой ложбины, а также свально-развальной борозды и микроручья. Это трудоемко. Точечные значения потерь почвы сегодня исследователи рассчитывают с помощью различных моделей эрозии. Жидкин с соавторами [*Zhidkin* et al., 2022], которые провели верификацию моделей WaTEM/SEDEM (дождевая эрозия) в сочетании с моделью Российского гидрологического института (эрозия при снеготаянии) пришли к выводу, что модели могут занижать величину эрозии до 4 р. По результатам исследования авторы сделали вывод о необходимости калибровки параметров моделей для конкретного региона. Этот вывод говорит о том, что сегодня, помимо уточнения параметров моделей, описывающих «метеорологическую» часть, стоит проблема объективного выделения экспериментальным путем на изучаемых территориях характерных участков с разными условиями формирования эрозионного процесса. Поскольку все элементы эрозионной системы на изучаемом склоне в бассейне р. Сухой Орлицы пока не представляется возможным учесть в схемах расчета, мы поставили задачу выявить на изучаемом поле наиболее характерные участки и разработать для них эмпирические расчетные зависимости. Статистическую выборку составили данные отбора проб за ряд лет (всего

более 500 проб). Расчетные уравнения для ложбин с площадью сбора 23 000м^2 и 50 000 м^2 и для участка предположительно с выпаханными почвами были опубликованы ранее [*Трофимец* и др., 2022]. В настоящей статье обосновывается выделение еще 4 участков (участки 4, 4.2, 5, 6), для которых приводятся разработанные уравнения расчета смыва почвы. Статистическая выборка была сформирована в 2016–2017 гг. из точек отбора проб (из пахотного горизонта 0–25 см), назначенных вдоль 12 трансект (рис. 5).

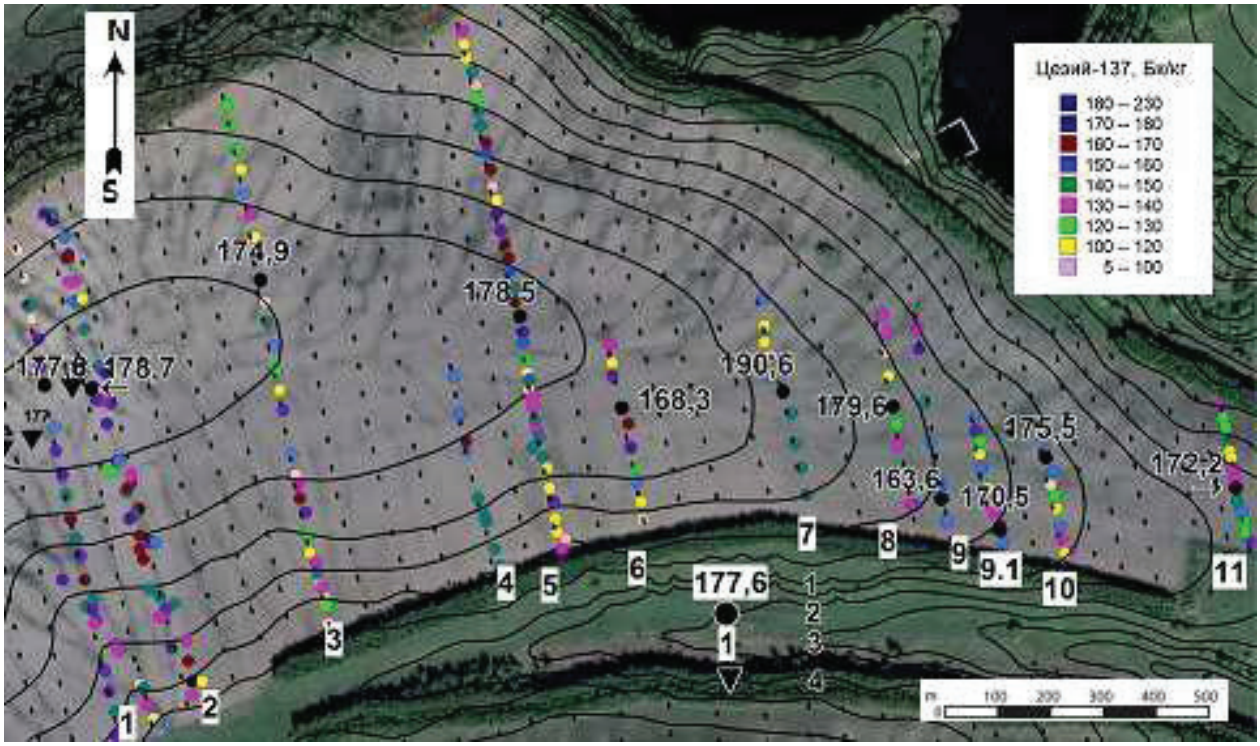


Рис. 5. Точки отбора проб на спутниковом снимке: 1 (177,6) — активность цезия-137 (Бк/кг); 2 — точки, расположенные на водораздельной поверхности; 3 — номера катен; 4 — точки отбора проб, принятые к расчету опорного значения
Fig. 5. Soil sampling points pointed in the satellite image: 1 (177,6) — caesium-137 activity (Bq/kg); 2 — points on the watershed; 3 — catenae numbers; 4 — sampling points accepted when establishing reference value of caesium-137 activity

Для каждой точки отбора по результатам гамма-спектрометрического анализа проб были получены точечные данные об активности цезия-137. Сеточные карты площади сбора и профильной кривизны использованы для расчета активности цезия-137 по разработанным эмпирическим уравнениям зависимости ее от морфометрических показателей рельефа.

Координаты участка исследования: 53°0'1,58" с. ш., 35°56'44,6" в. д. На участке распространены серые лесные тяжелосуглинистые почвы. Участок можно считать представительным для левобережья верхней Оки в пределах Орловской обл. Точки пробоотбора назначались вдоль тальвегов ложбин и свально-развальных борозд (на момент отбора проб борозды распознавались в поле по характерным продольным углублениям в рельефе) (рис. 5). Назначение точек отбора проб почвы вдоль тальвегов понижений было продиктовано тем, что в качестве предиктора использовался морфометрический показатель «площадь сбора». Площадь сбора — это потенциальная площадь, с которой в каждую точку (пиксель) карты может поступать почва, смываемая с вышерасположенных участков. По мере увеличения площади сбора ложбин должен увеличиваться смыв почвы, что делает

понятным характер процесса и наблюдающееся уменьшение удельной активности цезия-137 по мере увеличения площади сбора. Цифровая модель рельефа (ЦМР) создана по данным топографической основы м-ба 1: 10 000. По ЦМР рассчитаны морфометрические показатели рельефа с использованием инструментов программного обеспечения SAGA GIS.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наложение точек пробоотбора на карту площади сбора показало, что не все катены (трансекты) «попали» в тальвеги ложбин (рис. 6). Так, например, катена № 6 совпала по положению с тальвегом ложбины. Катена № 5 лишь в верхней своей части и в нижней совпала с тальвегами ложбин. Катены №№ 7, 8, 9 попали не в тальвеги ложбин, а в тальвеги свально-развальных борозд (пунктирные линии на рис. 5, 6). Участки аккумуляции смытого почвенного материала удалось маркировать с помощью знака профильной кривизны. На карте профильной кривизны (рис. 6) видно, что зоны аккумуляции (в пределах распахиваемой части склона) пересекают катены №№ 1–3, 5, 6. Катены №№ 7–10 имеют небольшие зоны аккумуляции лишь в своей приводораздельной части. Для этого участка склоновой поверхности знак профильной кривизны при построении расчетных зависимостей не учитывался (т. к. точек в приводораздельной части склона оказалось недостаточно для того, чтобы могла быть сформирована представительная статистическая выборка).

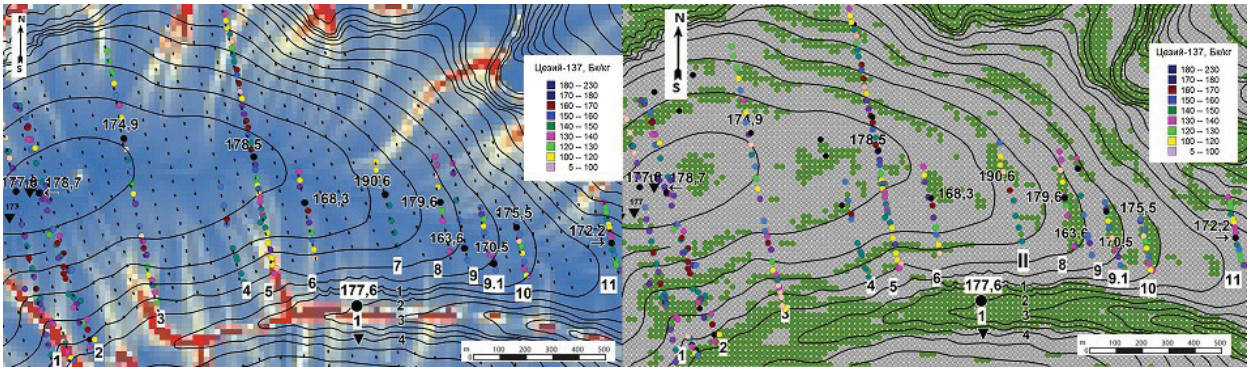


Рис. 6. Карта площади сбора (слева) и профильной кривизны (справа)
Fig. 6. Catchment area (left image) and profile curvature (right image) maps

Следует еще раз заметить, что в поле распознать тальвеги ложбин не всегда представлялось возможным, также не представилось возможным учесть все элементы эрозионной сети на изучаемом склоне. Тем не менее, удалось выделить на склоновой поверхности 6 характерных участков, отличающихся по степени нарушенности поверхности ложбинным комплексом (рис. 7).

Отбор проб почвы вдоль катен (рис. 5) и установление гамма-спектрометрическим методом удельной активности в каждой точке пробоотбора дали необходимую информацию в пределах 6 участков для поиска эмпирических зависимостей активности цезия-137 от морфометрических показателей рельефа. Одновременно с поисками расчетных уравнений решалась задача обоснования положения участка вдоль водораздельной поверхности, в пределах которого следует назначать опорные площадки для выделенных 6 участков.

Рис. 7. Зоны, для которых разработаны уравнения из табл. 3
Fig. 7. Zones used to develop equations presented in table 3

Табл. 3. Уравнения для расчета активности цезия-137 в пределах зон 1–6 (рис. 7)
Table 3. Equations for used for estimation of caesium-137 activity in zones 1–6 (fig. 7)

№ уравнения	Уравнение	Условия применения уравнения			
		Площадь сбора	Экспозиция	Зона смыва (аккумуляции)	Знак профильной кривизны
1	У = −0,0004Х + 146,57	≤50000	южная	смыва	+
	У = −0,0004Х + 192,99	≤50000	южная	аккумуляции	−
2	У = −0,0022Х + 152,95	≤23000	южная	смыва	+
	У = −0,0021Х + 184,15	≤23000	южная	аккумуляции	−
3	У = −0,0097Х + 69,25	≤6000	южная	(участок «выпаханных почв»)	
4	У = −0,0117Х + 164,11	≤4200	южная	смыва	+
	У = −0,0119Х + 188,78	≤4200	южная	аккумуляции	−
4.2	У = −0,0596Х + 189,69	100≤500	южная	смыв	+
5	У = −0,0164Х + 178,6	≤4200	южная	смыв	+
6	У = −0,0891Х + 197,73	≤4200	южная	смыв	+

Анализ карты площади сбора и измеренных значений активности цезия-137 (рис. 5), а также учет ранее сделанных рекомендаций по назначению опорной площадки в пределах блочных повышений на водораздельной поверхности [*Трофимец* и др., 2022] позволили рекомендовать выбирать «пояс минимальной эрозии» в пределах значений площади сбора 100–500 м^2. Вариабельность цезия-137 в пределах этого пояса составляет 0,3. Это значит, что выборка однородная, но степень рассеивания значительная. Средние, рассчитанные по однородной выборке, значимы, поэтому мы считаем, что в пределах площади сбора 100–500 м^2 можно назначать опорные площадки. Выделить площадь сбора, в пределах которой вариабельность активности цезия-137 была бы меньше, не удалось. Эту задачу следует решать отдельно в ходе более крупномасштабных исследований. Ранее [*Трофимец* и др., 2022] мы установили, что водораздельная поверхность изучаемого участка характеризуется

чередованием блочных повышений и межблочных понижений, вдоль которых возможен смыв почвы. Эти формы рельефа различимы на спутниковых снимках сверхвысокого разрешения. На карте профильной кривизны (рис. 6) видно, что в пределах пояса, названного авторами статьи поясом минимальной эрозии, имеются зоны аккумуляции, характеризующиеся отрицательными значениями профильной кривизны. Для каждого локального участка, вероятно, необходимо уточнять опорное значение цезия-137. При этом выбирать диаграмму распределения цезия-137 по глубине необходимо, следуя рекомендациям, изложенным в работе [*Шамшурина* и др., 2016]. За опорное значение была принята величина 174,7 Бк/кг [*Трофимец* и др., 2022]. Это значение использовали при пересчете удельной активности в интенсивность смыва почвы [*Трофимец* и др., 2022].

Анализ спутникового снимка сверхвысокого разрешения (рис. 1, 5), степени нарушенности поверхности поля свально-развальными бороздами (исказившими картину естественного процесса формирования эрозионных потерь почвы) и карт площади сбора и профильной кривизны (рис. 6) позволил вычленить на рассматриваемой поверхности сельскохозяйственного поля 6 участков, отличающихся по условиям протекания эрозионных процессов (рис. 7) и сформировать для них эмпирические зависимости (табл. 3, рис. 8), по которым, в свою очередь, рассчитаны данные для построения карты интенсивности смыва почвы на склоне южной экспозиции (рис. 9).

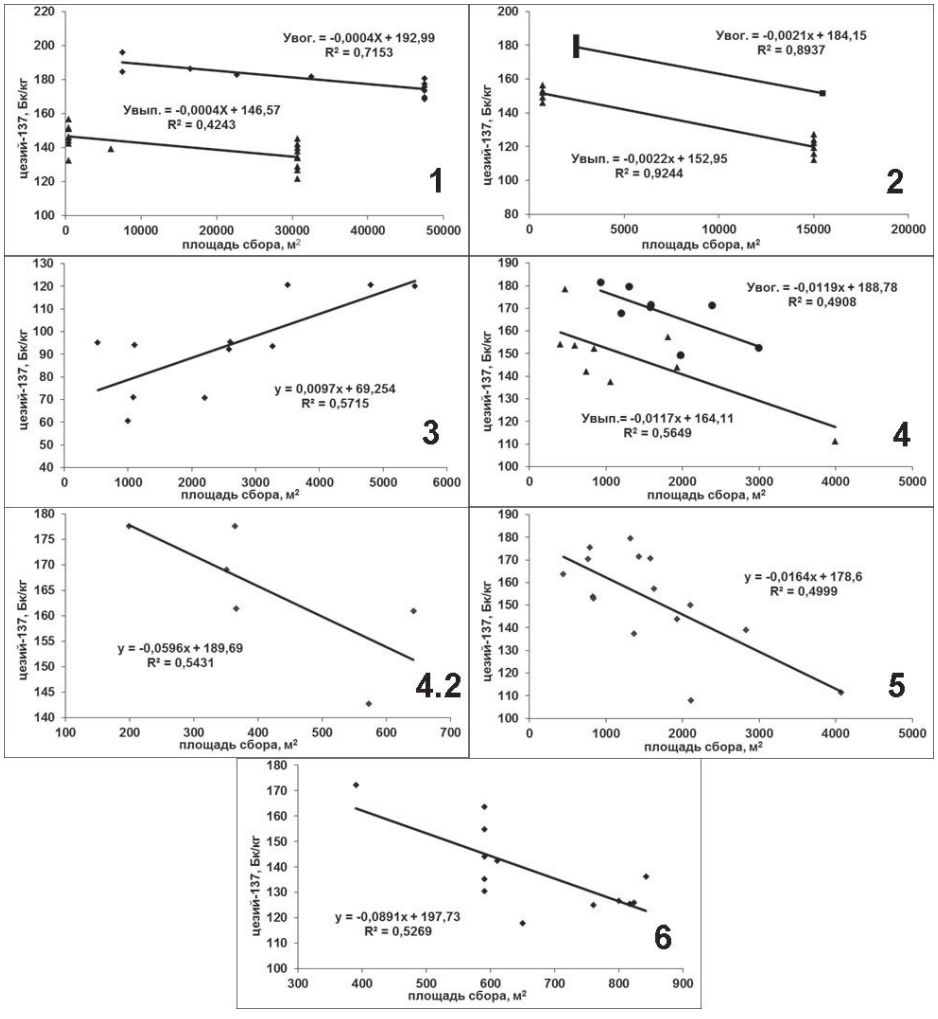


Рис. 8. Расчетные уравнения для зон №№ 1–6 (табл. 3)
Fig. 8. Equations for zones No.No. 1–6 (table 3)

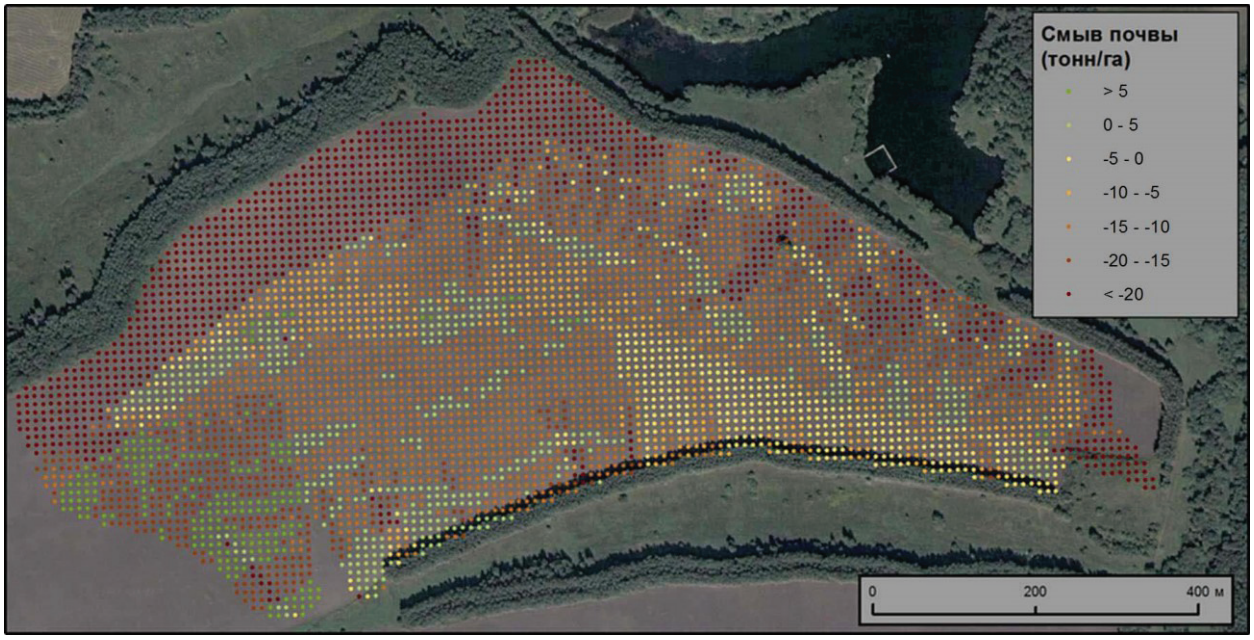


Рис. 9. Карта интенсивности смыва почвы
Fig. 9. Map of soil runoff intensity

Границы участков проводились по водораздельным линиям, за исключением участка № 6. Этот участок включает в себя истоки микроложбин на конечном участке поля. Участок № 1 включает водосбор ложбины с площадью 50000 м^2. Участок № 2 включает водосборы ложбин с площадью не более 23000 м^2. Участок № 3 включает часть поля предположительно с выпаханными почвами. Участок № 4 — склоновая поверхность с площадями сбора не более 4200 м^2. Участок № 4.2 — приводораздельная поверхность в пределах площадей сбора не более 500 м^2.

ВЫВОДЫ

Авторские полевые исследования, позволившие получить выборку из более чем 500 значений активности цезия-137, сделали возможным выделить на изучаемом поле 6 участков, отличающихся по характеру статистической связи активности цезия-137 и морфометрических показателей рельефа (площадь сбора и знак профильной кривизны). Выделенный в пределах площадей сбора 100–500 м^2 пояс минимальной эрозии можно рекомендовать использовать при назначении местоположения опорных площадок (вариабельность активности цезия-137 в пределах пояса — не более 0,3). Уточнение положения пояса минимальной эрозии возможно за счет учета микропонижений на водораздельной поверхности при укрупнении масштаба исследований. Разработанные для 6 участков расчетные уравнения позволили построить сеточную карту интенсивности смыва почвы. Результаты расчета потерь почвы по предложенной в настоящей статье методике в будущем следует подтвердить почвенно-морфологическим методом. Прикопки на участках, замыкающих 6 предложенных характерных участков, позволят подтвердить или опровергнуть целесообразность такого подробного деления склоновой поверхности на расчетные полигоны. Карта интенсивности потерь почвы вследствие эрозии позволяет более точно оценивать потери почвы на склоновых поверхностях, отличающихся микрорельефом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РНФ, грант № 23-27-00298[1]. Спутниковые снимки предоставлены DigitalGlobe Foundation.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out with the support of the RSF, grant № 23-27-00298[2]. Satellite imagery courtesy of DigitalGlobe Foundation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А. Современные изменения поверхностного стока и инфильтрации талых вод на сельскохозяйственных угодьях в лесостепной и степной зонах Русской равнины и их последствия. Водное хозяйство России, 2018. № 4. С. 78–91.

Евдокимова Т.И. Почвенная съемка. М.: Издательство Московского Университета, 1981. 264 с.

Евсеева Н.С., Квасникова З.Н., Каширо М.А., Батманова А.С. Факторы развития и интенсивность ливневой эрозии на пашне Томь-Яйского междуречья. Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле», 2018. Т. 23. С. 51–63. DOI: 10.26516/2073-3402.2018.23.51.

Иванов В.Д., Кузнецова Е.В., Попов В.Г. Эрозионная опасность как сопряженная функция интенсивности дождя и водопроницаемости почв. Почвоведение, 1990. № 8. С. 106–117с.

Иванова О.И., Бураков Д.А. Эрозия почв: учебное пособие. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2020. 103 с.

Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв. М.: Издательство Московского Университета, 1993. 199 с.

Литвин Л.Ф., Голосов В.Н., Добровольская Н.Г., Иванова Н.Н., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф. Перераспределение 137Cs процессами водной эрозии почв. Водные ресурсы, 1996. Т. 23. № 3. С. 314–320.

Мальцев К.А., Иванов М.А., Шарифуллин А.Г., Голосов В.Н. Изменение темпов смыва почвы в речных бассейнах южного мегасклона Европейской части России за последние 30 лет. Почвоведение, 2019. № 6. С. 755–766. DOI: 10.1134/S0032180X19060091.

Окулик Е.В. Эрозия почв и миграция химических веществ с талым стоком (на примере серых лесных почв). Дисс… канд. биол. н. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2006. 142 с.

Осипов А.Г. Интегральная оценка устойчивости ландшафтов при создании сельскохозяйственных угодий природно-антропогенных систем. Вестник СПбГУ. Серия 7. Геология. География, 2016. Вып. 3. С. 150–162.

Савин И.Ю., Жоголев А.В., Прудникова Е.Ю. Современные тренды и проблемы почвенной картографии. Почвоведение, 2019. № 5. С. 517–528. DOI: 10.1134/S0032180X19050101.

Сибирцев Н.М. Избранные сочинения. М.: Сельхозгиз, 1951. Т. 1. 472 с.

Трофимец Л.Н., Паниди Е.А., Курочицкая М.Г., Александрова А.П., Тяпкина А.П., Сараева А.М., Тарасов А.В., Баркалов А.О., Степанова В.И., Лаврусевич А.А., Петелько А.И. Применение цезия-137 чернобыльского происхождения для расчета эрозионных потерь почвы

[1] Российский научный фонд. Электронный ресурс: https://rscf.ru/project/23-27-00298/ (дата обращения 23.03.2023).

[2] Russian Science Foundation. Electronic resource: https://rscf.ru/project/23-27-00298/ (access date 23.03.2023).

на участках выпаханных почв в бассейне верхней Оки. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 2. С. 813–828. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-813-828.

Трофимец Л.Н., Паниди Е.А., Лаврусевич А.А. Некоторые особенности применения радиоцезиевого метода изучения потерь почвы вследствие эрозии в перигляциальной области бассейна верхней Оки. Геоморфология, 2022. Т. 53. № 5. С. 155–162. DOI: 10.31857/S0435428122050170.

Шамшурина Е.Н., Голосов В.Н., Иванов М.М. Пространственно-временная реконструкция поля выпадения чернобыльского ^{137}Cs на почвенный покров в верховьях бассейна реки Локны. Радиационная биология. Радиоэкология, 2016. Т. 56. № 4. С. 414–425.

Шарый П.А. Оценка взаимосвязей рельеф-почва-растения с использованием новых методов в геоморфометрии. Автореферат дисс… канд. биол. наук. Тольятти: Институт экологии Волжского бассейна РАН, 2005. 23 с.

Costa-Cabral M.C., Burges S.J. Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. Water Resources Research, 1994. V. 30. Iss. 6. P. 1681–1692. DOI: 10.1029/93WR03512.

Evans L.S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. Spatial Analysis in Geomorphology. London: Methuen & Co. Ltd., 1972. P. 17–90.

Walling D.E., He Q. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. J. Environ. Qual., 1999. V. 28. No. 2. P. 611–622.

Zhidkin A., Gennadiev A., Fomicheva D., Shamshurina E., Golosov V. Soil erosion models verification in a small catchment for different time windows with changing cropland boundary. Geoderma, 2023. V. 430. Art. 116322. DOI: 1016/j.geoderma.2022.116322.

REFERENCES

Costa-Cabral M.C., Burges S.J. Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. Water Resources Research, 1994. V. 30. Iss. 6. P. 1681–1692. DOI: 10.1029/93WR03512.

Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Barabanova E.A. Modern changes in surface runoff and infiltration of meltwater on agricultural lands in the forest-steppe and steppe zones of the Russian Plain and their consequences. Water Sector of Russia, 2018. No. 4. P. 78–91 (in Russian).

Evans L.S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. Spatial Analysis in Geomorphology. London: Methuen & Co. Ltd., 1972. P. 17–90.

Evdokimova T.I. Soil survey. Moscow: Moscow University Press, 1981. 264 p. (in Russian).

Evseyeva N.S., Kvasnikova Z.N., Kashiro M.A., Batmanova A.S. Development factors and intensity of heavy rains erosion on the arable land of the Tom-Yaya interfluve. Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya “Nauki o Zemle” (The Bulletin of Irkutsk State University. Series “Earth Sciences”), 2018. V. 23. P. 51–63 (in Russian). DOI: 10.26516/2073-3402.2018.23.51.

Ivanov V.D., Kuznetsova E.V., Popov V.G. Erosion hazard as a conjugate function of rain intensity and soil permeability. Eurasian Soil Science, 1990. V. 8. P. 106–117 (in Russian).

Ivanova O.I., Burakov D.A. Soil erosion: Study guide. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agricultural University, 2020. 103 p. (in Russian).

Larionov G.A. Soil erosion and deflation. Moscow: Moscow University Press, 1993. 199 p. (in Russian).

Litvin L.F., Golosov V.N., Dobrovolskaya N.G., Ivanova N.N., Kiruhina Z.P., Krasnov S.F. Redistribution of 137Cs by processes of water erosion of soil cover. Water Resources, 1996. V. 23. No. 3. P. 314–320 (in Russian).

Maltsev K.A., Ivanov M.A., Sharifullin A.G., Golosov V.N. Changes in the rate of soil loss in river basins within the southern part of European Russia. Eurasian Soil Science, 2019. No. 6. P. 755–766 (in Russian). DOI: 10.1134/S0032180X19060091.

Okulik E.V. Soil erosion and migration of chemicals with melt runoff (on the example of gray forest soils). Diss… PhD of biological sciences. Moscow: Moscow State University, 2006. 142 p. (in Russian).

Osipov A.G. Integral assessment of landscape stability when establishing agricultural lands in natural and anthropogenic systems. Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 7. Geology. Geography, 2016. V 3. P. 150–162 (in Russian).

Savin I.Yu., Zhogolev A.V., Prudnikova E.Yu. Modern trends and problems of soil mapping. Eurasian Soil Science, 2019. No. 5. P. 517–528 (in Russian). DOI: 10.1134/S0032180X19050101.

Shamshurina E.N., Golosov V.N., Ivanov M.M. Spatiotemporal reconstruction of the Chernobyl origin ^{137}Cs fallout field on the soil cover in the upper Lokna River basin. Radiation biology. Radioecology, 2016. V. 56. No. 4. P. 414–425 (in Russian).

Shary P.A. Assessment of the relief-soil-plants interlinkages using new methods of geomorphometry. Abstract of diss… PhD of biological sciences. Tolyatti: Institute of Ecology of the Volga Basin of RAS, 2005. 25 p. (in Russian).

Sibirtsev N.M. Selected works. Moscow: Selkhozgiz, 1951. V. 1. 472 p. (in Russian).

Trofimetz L.N., Panidi E.A., Kurochitskaya M.G., Alexandrova A.P., Tyapkina A.P., Saraeva A.M., Tarasov A.V., Barkalov A.O., Stepanova V.I., Lavrusevich A.A., Petelko A.I. Application of caesium-137 of Chernobyl origin for calculating erosional losses of soil in plowed soil areas in the upper Oka Basin. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2022. V. 28. Part 2. P. 813–828 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-813-828.

Trofimetz L.N., Panidi E.A., Lavrusevich A.A. Some features of the radiocaesium method applied to study of soil losses due to erosion on the periglacial area of the Upper Oka basin. Geomorfologiya, 2022. V. 53. No. 5. P. 154–161 (in Russian). DOI: 10.31857/S0435428122050170.

Walling D.E., He Q. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. J. Environ. Qual., 1999. V. 28. No. 2. P. 611–622.

Zhidkin A., Gennadiev A., Fomicheva D., Shamshurina E., Golosov V. Soil erosion models verification in a small catchment for different time windows with changing cropland boundary. Geoderma, 2023. V. 430. Art. 116322. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116322.

УДК: (504.054+622.816):528.8(571.122) **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-378-392**

В.И. Кравцова[1], **Е.Р. Чалова**[2]

ОЦЕНКА ЭВОЛЮЦИИ ЛАНДШАФТОВ САМОТЛОРСКОГО НЕФТЕГАЗОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

Самотлорское нефтегазовое месторождение в Западной Сибири, одно из крупнейших в мире по запасам нефти, разрабатывается с 1969 г. Природные лесоболотные ландшафты испытывают сильнейший антропогенный пресс в связи с созданием густой сети площадок кустового бурения, соединяющих их дорог с трубопроводами, предприятий по первичной переработке нефти, линий коммуникаций. Деятельность по нефтедобыче и транспортировке нефти при разработке Самотлорского месторождения сопровождается загрязнением территории и деградацией растительности, сокращением площадей лесов. Для выявления динамики природных лесоболотных ландшафтов, проявляющейся в изменении соотношения площадей лесов и болот разных типов, использовано сравнение обзорно-топографической карты м-ба 1: 200 000 1980 г., показывающей распределение лесов, а также проходимых и непроходимых болот, с современными космическими снимками высокого разрешения, по которым отдешифрированы границы лесов и различных видов болот — верховых грядово-мочажинных, грядово-озерково-мочажинных и низинных. Сравнение разновременных материалов выполнено на участке 7,5 × 13,5 км юго-восточней оз. Самотлор. Сопоставление составленных карт 1980 г. и 2019 г. показывает, что площадь лесов здесь сократилась почти втрое; на месте сведенных лесных массивов образовались травянисто-кустарниковые сообщества с небольшими островками остаточных лесов. Среди болот выявлено сокращение площадей низинных болот, их локализация вдоль берегов озер, при расширении площадей верховых болот. На месте непроходимых болот 1980 г. сформировались грядово-озерково-мочажинные комплексы верховых болот, при широком распространении грядово-мочажинных. Показано, что наряду с негативными процессами антропогенного сокращения лесов, загрязнения экосистем и деградации растительности, при разработке месторождения происходит увеличение дренированности территории, сопровождаемое локальным увеличением озелененности, чему дополнительно способствует тенденция к потеплению климата.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: типы болот, леса, нефтеразработки, динамика, космические снимки

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991,
e-mail: **valentinamsu@yandex.ru**

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991,
e-mail: **ekar28@yandex.ru**

Valentina I. Kravtsova[1], **Ekaterina R. Chalova**[2]

ESTIMATION OF LANDSCAPE EVOLUTION OF THE SAMOTLOR OIL-GAS FIELD

ABSTRACT

The Samotlor oil and gas field in Western Siberia, one of the largest in the world in terms of oil reserves, has been developed since 1969. Natural forest and marsh landscapes are experiencing the strongest anthropogenic pressure due to the creation of a dense network of cluster drilling sites, roads connecting them with pipelines, enterprises for primary oil refining, lines of communication. Oil production and transportation activities during the development of the Samotlor field are accompanied by pollution of the territory and degradation of vegetation, and a reduction in forest areas. To identify the dynamics of natural forest-bog landscapes, which manifests itself in a change in the ratio of forest and swamp areas, we used a comparison of a survey topographic map at a scale of 1: 200 000 in 1980, showing the distribution of forests, as well as passable and impenetrable swamps, with modern high-resolution satellite images, according to which deciphered the boundaries of forests and various types of swamps-raised ridge-hollow, ridge-lake-hollow and lowland. Comparison of materials from different times was carried out on a 7,5×13,5 km site southeast of Lake Samotlor. A comparison of maps compiled in 1980 and 2019 shows that the area of forests here has almost tripled; Herbaceous-shrub communities with small islands of residual forests formed on the site of reduced forest tracts. Among the swamps, a reduction in the areas of lowland fen was revealed, their localization along the shores of lakes, with the expansion of the areas of raised bogs. In place of the impenetrable swamps of 1980, ridge-lake-hollow complexes of raised bogs were formed, with wide distribution of ridge-hollow. It has been shown that, along with the negative processes of anthropogenic deforestation, ecosystem pollution and vegetation degradation, during the development of the deposit there is an increase in the drainage of the territory, accompanied by a local increase in greenery, which is additionally promoted by the tendency to climate warming.

KEYWORDS: swamp types, forests, oil development, dynamics, space images

ВВЕДЕНИЕ

Самотлорское месторождение в Нижневартовском районе Ханты-Мансийского автономного округа, являющееся одним из крупнейших в мире по запасам нефти, расположено в северной части Западно-Сибирской низменности на правобережье широтного отрезка долины р. Оби, в пределах плоской, заболоченной и заозеренной Сургутской низины. Особенности природы севера Западной Сибири хорошо передает термин «лесоболотная зона» [*Орлов*, 1968]. Для этой территории характерны среднетаежные ландшафты низменных озерно-аллювиальных равнин с широким развитием верховых сфагновых и низинных мохово-травяных болот. Повышенной гидроморфности лесоболотных ландшафтов способствуют равнинность территории, наличие многолетней мерзлоты и водоупорных горизонтов, избыточность атмосферных осадков и затрудненность поверхностного стока [*Исаченко*, 1985; Рациональное…, 1989; *Астапов* и др., 2012].

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **valentinamsu@yandex.ru**

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **ekar28@yandex.ru**

На месторождении, открытом в 1965 г., уже в 1969 г. началась добыча нефти, которая ведется, таким образом, на протяжении 53 лет, и в течение этого периода природные экосистемы региона подвергаются сильнейшему антропогенному прессингу. В процессе воздействия нефтегазодобычи на природные комплексы Западной Сибири выделяют 4 этапа: разведочный, строительный, добывающий и ликвидационный, при хронологическом сосуществовании всех этих этапов [*Соромотин*, 2010]. Наиболее заметные изменения в природный фон вносит строительный этап обустройства промыслов, включающий сооружение буровых площадок, площадок предприятий по подготовке и переработке нефти, строительство автодорог, трубопроводов, линий электропередач. На этапе добычи эксплуатация созданной инфраструктуры связана с аварийностью и нефтяными разливами в процессе добычи нефти на буровых скважинах и при ее транспортировке по нефтепроводам, при работе станций перекачки нефти, факелов сжигания попутных газов. Срок рентабельности скважин не превышает 20 лет, а уже к 2000 г. здесь было пробурено более 14 000 скважин, большая часть оборудования которых устарела, что обусловливает ежегодное увеличение роста числа аварий [*Соромотин*, 2010]. В течение 53-летнего срока эксплуатации месторождения темпы освоения территории и нефтедобычи были неравномерными; наиболее интенсивное развитие пришлось на 1980-е гг., для 1990-х характерно снижение добычи, сменившееся в 2000-х гг. новым подъемом дальнейшего освоения месторождения и добычи нефти.

Ханты-Мансийский округ продолжает лидировать не только в России, но и в мире по чрезвычайным техногенным ситуациям, связанным с выбросом нефти и нефтепродуктов. В 1980-е гг. в округе ежегодно фиксировалось 150–250 аварий, в середине 1990-х гг. количество аварий оценивалось в 2300–2500 случаев [*Чижов*, 1998].

Развитие инфраструктуры месторождения — сети площадок кустового бурения, соединяющих их дорог, транспортных коридоров с линиями электропередач и системами трубопроводов — достаточно хорошо отражаются на космических снимках с ресурсных спутников, которые начали поступать с 1970-х гг. — российских Ресурс-Ф (работавших до середины 1990-х гг. и обеспечивавших многозональные фотоснимки с разрешением 10–12 м) и американских Landsat (с разрешением оптико-электронных снимков, полученных системами MSS — 80 м, TM — 30 м, ETM+, OLI — 15 м) [*Книжников* и др., 2011] (рис. 1).

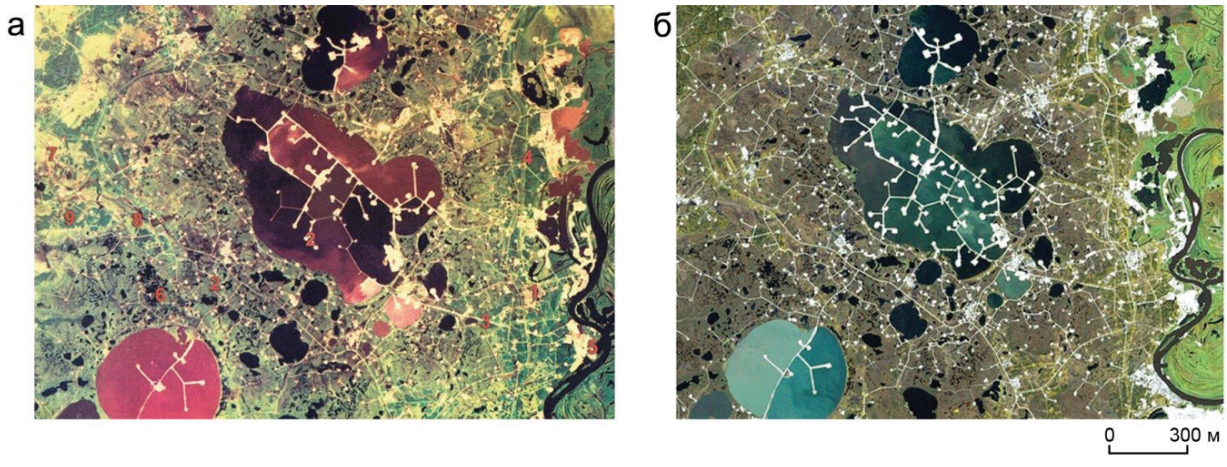


Рис. 1. Нефтедобыча в районе озера Самотлор. Снимки со спутников Ресурс-Ф 1986 г. (а) и Landsat 2002 г. (б)

Fig. 1. Oil production in the area of Lake Samotlor. Images from satellites Resurs-F 1986(a) and Landsat 2002 (б)

Снимки со спутников Ресурс-Ф были положены в основу выполнявшейся в нашей стране программы комплексной картографической инвентаризации природных ресурсов. В рамках этой программы сотрудником Госцентра «Природа» О.И. Котовой была составлена обзорная карта изменений природной среды в районе оз. Самотлор в связи с нефтедобычей [*Котова*, 1993; Космические..., 1998], с указанием участков крупных нефтяных разливов, пятен нефтяного загрязнения поверхности, районов подтопления территории. Карта отражает различные виды воздействия на природу при нефтедобыче, но не отвечает на вопрос — как изменяются лесоболотные ландшафты в условиях техногенного прессинга. Сложная задача изучения преобразования ландшафтов, их эволюции под сильнейшим антропогенным воздействием, безусловно, требует тщательных и продолжительных наземных исследований и экспериментов на пробных площадях. Они широко проводятся западно-сибирскими исследователями и отражены в статьях и научных монографиях о воздействии добычи нефти на экосистемы Западной Сибири [*Подкошникова*, *Сущеня*, 1981; *Шуйцев*, 1982; *Московченко*, 1998; *Чижов*, 1998; *Москаленко*, 2006; *Соромотин*, 2010]. Однако пространственной картины изменения ландшафтов региона с выходом на картографирование их динамики в этих работах не дается.

Сложность охвата наземными исследованиями значительных по площади территорий побуждает обратиться к материалам дистанционных съемок, а учитывая значительные площади месторождений — прежде всего к космическим снимкам, которые в настоящее время по детальности вышли на уровень субметрового пространственного разрешения, а также использования новых спектральных съемочных диапазонов, расширяющих возможности дешифрирования исследуемых объектов. В связи с этим поставлена задача — оценить современное состояние лесоболотных ландшафтов, распределение и соотношение в них лесных и болотных комплексов разного типа, и на основании сравнения с картографическими материалами прошлых лет выявить изменения в состоянии и распределении лесов и болот, произошедшие под влиянием нефтедобычи. Задача решается на примере одного из районов наиболее сильного воздействия нефтедобычи на природные ландшафты — Самотлорского месторождения. Как эталонный участок выбраны ландшафты в районе оз. Самотлор.

Район исследования

Границы исследуемого района определяются наличием снимков сверхвысокого пространственного и спектрального разрешения со спутника WorldView-3, послуживших основным материалом для оценки современного состояния ландшафтов. Изучаемый район площадью 7,5×13,5 км находится в юго-восточной части Самотлорского месторождения — между юго-восточным берегом оз. Самотлор на западе и меридиональным отрезком долины р. Вах перед ее впадением в Обь на востоке. Это низменные озерно-аллювиальные и аллювиальные террасы с абсолютными высотами 50–55 м и превышениями над урезом Оби 20–27 м [*Астапов* и др., 2012]. Толща горизонтально залегающих слоистых мелкозернистых песков и супесей (2–5 м) подстилается водоупорными ленточными глинами [*Подкошникова*, *Сущеня*, 1981]. Наличие водоупорных горизонтов и многолетней мерзлоты при избыточном количестве осадков 600–700 мм приводят к сильной заболоченности местности. Район относится к подзоне средней тайги [Национальный..., 2007]; леса по породному составу сосново-кедрово-березовые [*Овечкина*, 2016], занимают лишь наиболее дренированные территории в восточной части района вдоль долины р. Вах. Большая часть района, окружающая оз. Самотлор, занята низинными и верховыми болотами. Для переходной зоны между болотами и лесами характерно сочетание островных участков лесов на микроповышениях рельефа с ложбинами между ними, занятыми травянисто-кустарничковыми сообществами (рис. 2).

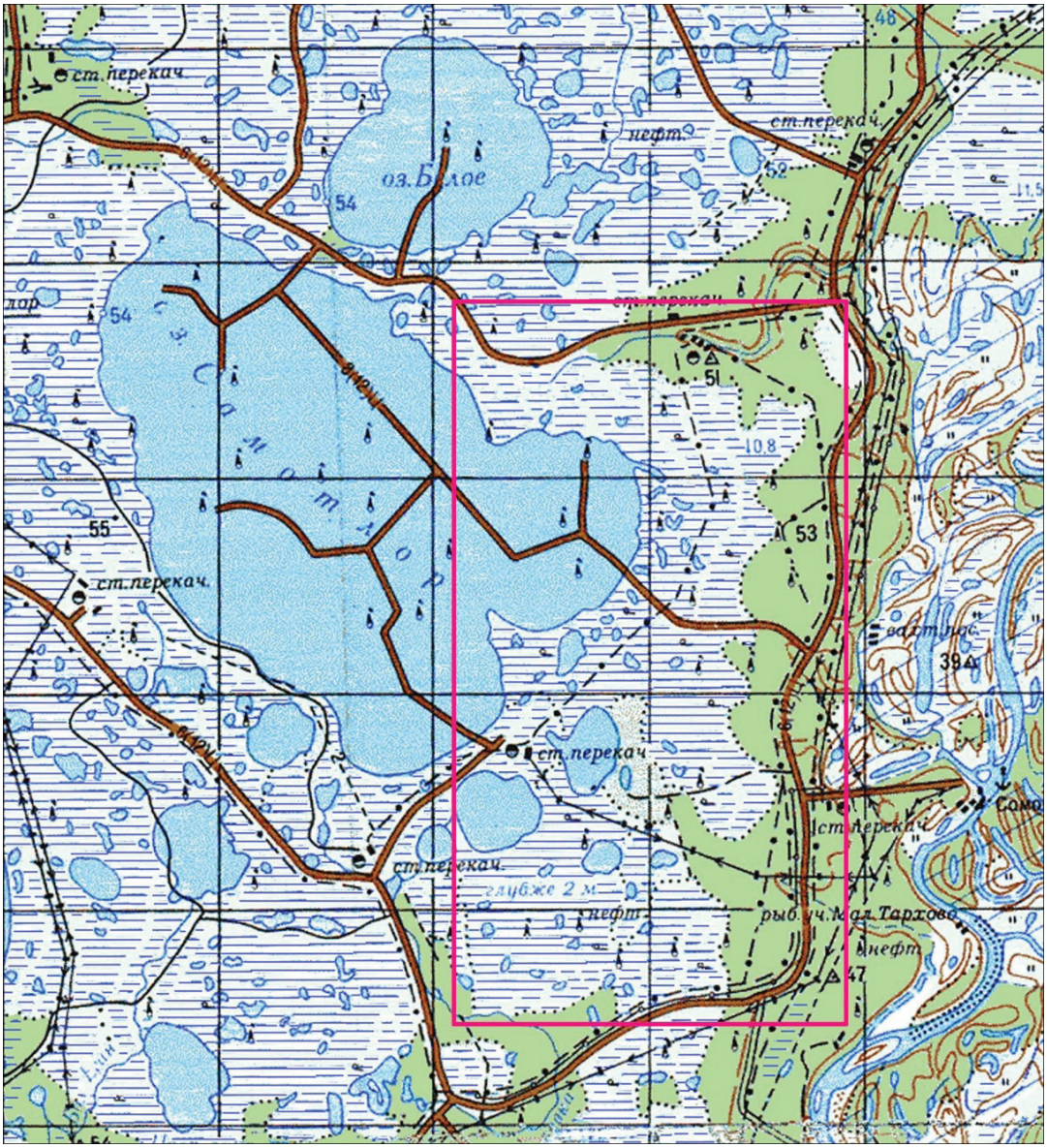


Рис. 2. Фрагмент обзорно-топографической карты м-ба 1: 200 000 1980 г. на район озера Самотлор. Выделены границы исследуемого района
Fig. 2. A fragment of an observe-topographic map of scale 1: 200 000, 1980 for the area of Lake Samotlor. The boundaries of the study area are highlighted

На всей территории развита густая сеть площадок кустовых нефтескважин, соединенных линиями дорог с тянущимися вдоль них трубопроводами, а также площадок предприятий по подготовке и первичной переработке нефти. Вдоль восточной границы участка проходит автотрасса Нижневартовск – Радужный, восточнее которой протягиваются магистральные нефтегазопроводы. Весь участок в разных направлениях пересекают коридоры трасс линий электропередач и систем трубопроводов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основных материалов, характеризующих современное состояние ландшафтов, использованы снимки с запущенного в 2013 г. спутника WorldView-3, ведущего высокодетальную и суперспектральную съемку: в панхроматическом канале с

разрешением 31 см, в 8 каналах видимого и ближнего инфракрасного диапазона с разрешением 1,24 м и 8 каналах среднего инфракрасного диапазона (в англоязычной литературе — коротковолнового SWIR-диапазона) с разрешением 3,7 м (табл. 1).

Табл. 1. Спектральные диапазоны съемки спутника WorldView-3
Table 1. Spectral imaging ranges of the WorldView-3 satellite

Название диапазона	**Длины волн, мкм**
Режим VNIR, панхроматический Разрешение 31 см	
PAN	0,50–0,90
Режим VNIR, многоспектральный Разрешение 1,24 м	
Coastal	0,40–0,45
Blue	0,45–0,51
Green	0,51–0,53
Yellow	0,575–0,625
Red	0,63–0,69
RedEdge	0,705–0,745
NIR-1	0,77–0,895
NIR-2	0,86–1,04
Режим SWIR Разрешение 3,7 м	
SWIR-1	1,195–1,225
SWIR-2	1,550–1,590
SWIR-3	1,640–1,680
SWIR-4	1,710–1,750
SWIR-5	2,145–2,185
SWIR-6	2,185–2.225
SWIR-7	2,235–2,285
SWIR-8	2,295–2,365

Эти снимки привлекают внимание исследователей нефтяного загрязнения в связи с тем, что углеводороды имеют спектральный отклик (полосы поглощения) в некоторых зонах SWIR-диапазона [*Cloutis*, 1989; *Horig* et al., 2001]. В настоящем исследовании они обеспечили оценку современного состояния ландшафтов, поверхностной структуры различных видов низинных и верховых болот, являющейся показателем степени их дренированности. Заметим, что задача изучения динамики антропогенной инфраструктуры месторождения в данном исследовании не ставилась, изучается лишь динамика природных ландшафтов.

В качестве основного материала, характеризующего природные ландшафты района в начальный период разработки месторождения по истечении первого десятилетия добычи нефти, использована обзорно-топографическая карта м-ба 1: 200 000 издания 1981 г., характеризующая состояние территории на 1980 г. (рис. 2). В ее основу положены материалы аэрофотосъемки, предназначенной для крупномасштабного топографического картографирования. Условными знаками предусмотрен показ границ лесных массивов (без указания породного состава). Для болот предусмотрены разные обозначения проходимых и непроходимых болот с указанием глубины последних, но без четкого разделения их контуров. Также без указания границ распространения дается по болотам знак редколесья. На карте показаны многочисленные элементы инфраструктуры, но в данном исследовании они использовались лишь для привязки природных объектов.

Как правило, при изучении изменений природных или антропогенных ландшафтов, исследователи стремятся использовать однотипные разновременные материалы — карты, созданные в разные годы, либо космические снимки разных лет при дополнительном учете сезона съемки.

В эволюции ландшафтов исследуемого района оказалось важным изменение соотношения площадей и распределения низинных и верховых болот. На современных космических снимках субметрового разрешения болота разных видов разделяются по структуре изображения. Грядово-мочажинные верховые болота надежно выделяются по своеобразной извилисто-полосчатой структуре, хорошо отличаясь от низинных болот с характерной для них аморфной структурой. Разделение этих видов болот по космическим снимкам прошлых лет, характеризующихся более низким разрешением в первые десятки метров, при прямом дешифрировании было бы невозможно, потребовало бы дополнительной обработки снимков — создания индексных изображений либо выполнения автоматизированной классификации на основе полевого эталонирования. В связи с этим в качестве источника сведений о состоянии территории в прошлом мы обратились к топографической карте, разделяющей болота по степени проходимости на проходимые и непроходимые, ассоциируемые с верховыми и низинными.

Для выявления по названным разновременным материалам — топографической карте 1980 г. и космическим снимкам 2019 г. — пространственных изменений ландшафтов составлены две карты (рис. 3).

Мы исходили из того, что показанные на топографической карте особым знаком непроходимые болота, для которых иногда указывается их глубина, несомненно относятся к низинным. Проходимые болота, к тому же сочетающиеся с редколесьем, отнесены к верховым. Границы между ними на топографической карте не показаны, но принятое условными знаками изменение рисунка изображения этих типов болот позволяет провести эти границы. Таким образом составлена первая карта, показывающая распределение в исследуемом районе лесов и болот — низинных и верховых — в 1980 г. (рис. 3а). Леса сосредоточены у восточной границы района, вдоль дренированной долины р. Вах. Но от этой восточной полосы отходят в сторону озера поперечные массивы лесов — один в северной части, охватывающий долину притока Ваха, и другой — в южной части, отходящий к одному из озер, расположенных южнее Самотлора.

В распределении болот, занимающих почти всю территорию участка, главная черта — приуроченность низинных болот к наиболее низкой части приозерной котловины оз. Самотлор; они окаймляют юго-восточный берег и распространяются на юго-восток от озера на 4–5 км, оставляя для верховых болот относительно узкую полосу шириной до 2 км между низинными болотами и лесами.

Вторая карта, характеризующая современное распределение лесных и болотных комплексов (рис. 3б), получена в результате дешифрирования снимка со спутника WorldView-3 2019 г. Использовался цветной снимок, синтезированный из зон видимого, ближнего инфракрасного и среднего инфракрасного диапазона SWIR1-NIR1-RedEdge. Участие среднего инфракрасного диапазона способствовало выявлению нефтезагрязненных территорий. Высокое разрешение снимков видимого и ближнего инфракрасного диапазона (1,24 м) обеспечивало достаточную детальность отображения структуры поверхности, разделение изображения травянистой, кустарничковой и кустарниковой, а также древесной растительности. При дешифрировании мы опирались на материалы полевых исследований других специалистов. Сотрудниками Госцентра «Природа» и Московского университета ранее были проведены экспедиционные работы по исследованию влияния инженерных сооружений, в частности дорог, на растительность болот [*Подкошникова*, *Сущеня*, 1981]. В их публикациях даны четкие описания

фитоценозов болот разных типов, особенностей их пространственной структуры, которые могут служить в качестве руководства по дешифрированию этих типов болот.

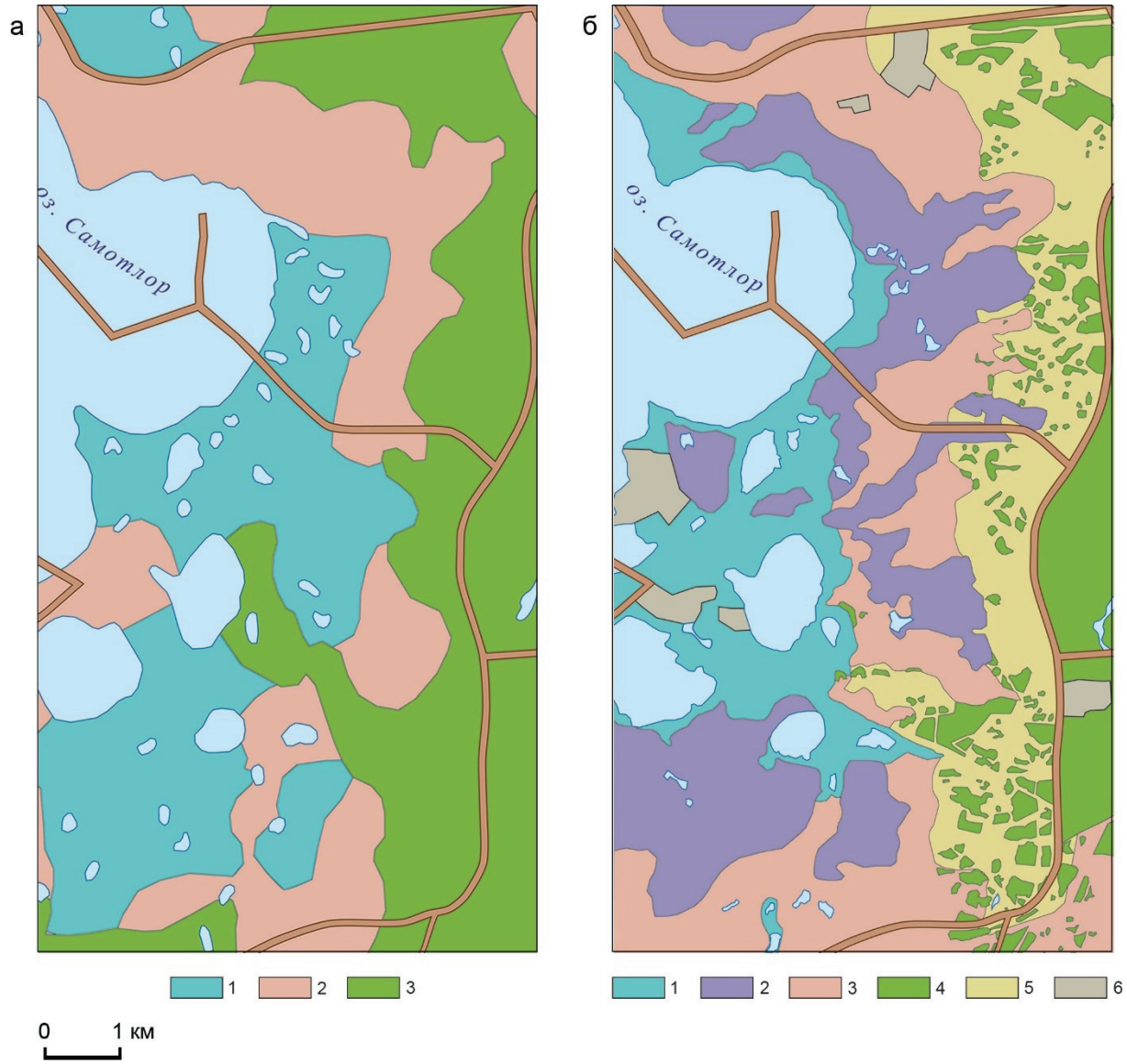


Рис. 3. Распространение лесов и болот в районе озера Самотлор: а — в 1980 г.: 1 — непроходимые (низинные) болота, 2 — проходимые (верховые) болота, 3 — леса; б — в 2019 г.: 1 — низинные болота, 2 — грядово-озерково-мочажинные верховые болота, 3 — грядово-мочажинные верховые болота, 4 — леса, 5 — травяно-кустарниковые пустоши с островками лесов, 6 — участки предприятий по первичной переработке нефти

Fig. 3. Distribution of forests and swamps in the area of Lake Samotlor: a — in 1980: 1 — impassable (lowland fen) swamps, 2 — passable (raised bog) swamps, 3 — forests; b — in 2019: 1 — lowland fens, 2 — ridge-lake-hollow raised bogs, 3 — ridge-hollow raised bogs, 4 — forests, 5 — short grass-shrub wastelands with insular forests, 6 — areas of primary oil refineries

В исследуемом районе распространены в настоящее время низинные избыточно обводненные мохово-травяные болота и верховые болота двух видов — грядово-озерково-мочажинные и грядово-мочажинные. Фрагменты снимка высокого разрешения с изображением этих видов болот приведены на рисунке 4.

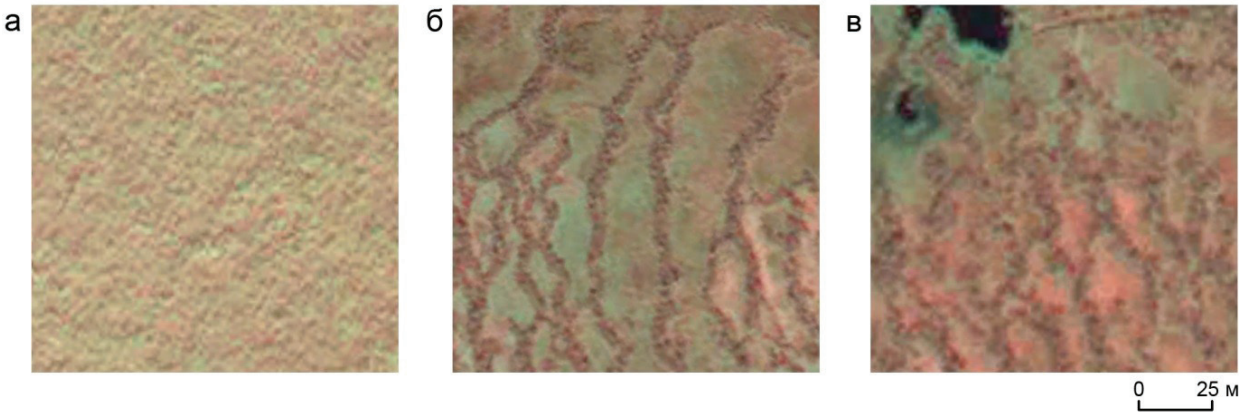


Рис. 4. Изображение болот разного вида на увеличенных фрагментах снимка WorldView-3: а — низинное; б — верховое грядово-мочажинное; в — верховое грядово-озерково-мочажинное

Fig 4. Image of swamps of various types on enlarged fragments of the WorldView-3 picture: a — lowland fen; b — ridge-hollow rised bog; c — ridge-lake-hollow rised bog

Низинные болота характеризуются аморфной структурой изображения на снимках (рис. 4а), тон изображения может изменяться в зависимости от степени обводнения. Из верховых болот наиболее четко выраженной структурой отличается грядово-мочажинный комплекс, охарактеризованный полевыми исследователями [*Подкошникова*, *Сущеня*, 1981]. Мочажины, в которых преобладает сфагнум и болотные травы, занимают 50–60 % площади, они замкнуты, вытянуты. Размер их обычно не превышает 30×50 м, чаще 10 × 5, 20 × 10 м. Разделяющие их гряды шириной 3–6 м и высотой 0,5–0,8 м имеют развитый кустарничковый ярус, на них растут единичные сосны высотой 2–3 м с диаметром ствола 3–5 см и сомкнутостью крон 0,1. Светлые, ровного тона мочажины и более темные «шероховатые» (с мелкозернистой структурой изображения) гряды образуют на снимке сложный полосчатый извилисто-пятнистый рисунок (рис. 4б), что позволяет выделить площади верховых грядово-мочажинных болот.

Другой вид верховых болот с грядово-озерково-мочажинным комплексом фитоценозов характерен для наиболее плоских участков болотных массивов. По полевым описаниям [*Подкошникова*, *Сущеня*, 1981] в центре мочажин, менее вытянутых и более округлых, размером 20 × 30 м, 30–50 м, переувлажненных и труднопроходимых, располагаются вторичные озерки. Гряды занимают 30–50 % площади, ширина их — 1–2 м, длина — 5–10 м, высота — 0,3–0,4 м, микрорельеф — кочковатый. Сложный, менее четкий, чем в предыдущем случае извилисто-пятнистый рисунок изображения (рис. 4в) при сочетании со значительным количеством небольших озер, позволяет выделить площади и этих болот.

Второй информативный компонент рассмотренных ландшафтов — леса на космических снимках высокого разрешения находят достаточно четкое отображение благодаря пятнистой структуре изображения крон деревьев. Снимки показывают также и нарушенность лесных массивов транспортными коридорами с линиями электропередач, трубопроводов и дорог. Но поскольку на 1980 г. информация о такой нарушенности имелась лишь в самой общей форме (на уровне отображения ее на обзорно-топографической карте), то изменения в состоянии и фрагментированности лесов за исследуемый период не учитывались, по снимкам фиксировались лишь границы лесных массивов, что показало существенное сокращение их площади (рис. 3).

Между лесными массивами в их современных границах и верховыми болотами, на месте исчезнувших лесов сформировался особый тип природных комплексов, где

небольшие еще сохранившиеся островки лесов сочетаются с обезлесенными участками, занятыми низкорослой травянистой и кустарничковой растительностью с пятнами кустарников. Они отнесены к пустошам, которые в пятиязычном географическом словаре определены как невозделанные пространства, образовавшиеся преимущественно на месте лесов, главным образом после вырубок и пожаров, характерные для районов с холодным и влажным климатом [*Котляков*, *Комарова*, 2013].

Близкие по характеру поверхности безлесные территории типа пустошей образовались и на ранее заболоченных участках наиболее интенсивной нефтедобывающей деятельности — в окрестностях станций перекачки нефти, в местах сгущения сети площадок кустового бурения, пересечения транспортных коридоров. В связи с достаточно мелким масштабом представленной карты на ней показаны лишь наиболее крупные участки застройки предприятий по первичной переработке нефти, вклинивающиеся островами среди болотных ландшафтов (рис. 3б).

Кроме отмеченных выше, на современных детальных снимках выявляются многочисленные участки травяно-кустарниковой растительности, появившиеся за эти годы на обваловке кустовых площадок, по откосам автодорог; четко выделяется также древесно-кустарниковая обсадка валов вдоль канала, идущего от Самотлора в сторону долины Ваха. На карте, созданной по результатам дешифрирования снимка, они не показаны в связи с ее мелким масштабом, но общее увеличение позеленения территории в условиях потепления климата может быть учтено, например, при расчетах по снимкам за разные годы вегетационного индекса и сравнении разновременных индексных изображений, как это сделано в ряде исследований для других территорий [*Елсаков*, 2013; *Железный* и др., 2022].

Сопоставление карт лесоболотных ландшафтов исследуемого района в 1980 г. и почти через 40 лет позволяет сделать некоторые выводы об их изменениях в процессе длительной нефтедобычи. Все отмеченные при сравнении карт изменения сопоставлены с материалами наземных исследований и наблюдений на пробных площадях, выполнявших-ся за эти годы западносибирскими специалистами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первое, что бросается в глаза при сравнении карт — значительное сокращение площади лесов. Компактные лесные массивы, занимавшие в пределах исследуемого района в 1980 г. площадь 63 км^2, распространены теперь лишь вдоль долины Ваха восточнее трассы Нижневартовск – Радужный, а также сохранились в виде островных участков западнее трассы и по долинам двух его притоков в северной и южной частях района, и теперь занимают 24 км^2, площадь их сократилась почти втрое. Эти лесные массивы сильно фрагментированы широкими (до 100 м) коридорами линий ЛЭП и систем трубопроводов, рассекающими их в разных направлениях, значительными (порядка 1 км^2) площадями нефтеперерабатывающих предприятий и многочисленными небольшими (1–2 га) площадками кустовых скважин, а также подходящими к ним дорогами с трубопроводами. И хотя изменения в фрагментированности лесов по указанным выше причинам не показаны, следует учитывать, что создание разветвленной сети различных коммуникаций приводит к массовому образованию новых опушек леса, недостаточно устойчивых к ветровому воздействию, способствует увеличению ветровальности [*Чижов*, 1998].

На остальной прежде залесенной территории сохранились лишь островные участки лесов площадью от 1–5 до 10 га, как правило на микроповышениях рельефа до 0,5 м, разделенные лишенными леса участками с травянисто-кустарничковой и кустарниковой растительностью. Сведение лесов на участках нефтедобычи обусловило формирование таких пустошей.

Одна из причин исчезновения лесов — увеличение площадей вырубок для нужд предприятий нефтедобычи, сопровождающее развитие промышленной инфраструктуры месторождения. К тому же благодаря возможности использования дорожной сети, проложенной для нужд месторождения, активизируется деятельность лесохозяйственных предприятий [*Скарятин*, *Тихомирова*, 2012]. Однако есть и другая причина. Анализируя картину гибели лесов региона, исследователи приходят к выводу, что по глубине экологических изменений сильнее механического разрушения растительного покрова оказывается техногенное затопление и подтопление лесопокрытых площадей в местах перекрытия поверхностного стока насыпями автодорог и буровых площадок [*Чижов*, 1998].

Континентальность климата и значительное распространение сосняков определяют высокую естественную пожароопасность лесов района. По мере освоения территории под нефтегазодобычу увеличивается вероятность возникновения лесных пожаров [*Скарятин*, *Тихомирова*, 2012], что является одним из косвенных последствий воздействия антропогенных факторов. Катастрофическая ситуация сложилась в 1987–1991 гг., в период максимальной рубки лесов и добычи нефти, когда количество возгораний по сравнению с 1970-ми гг. увеличилось в 3,5 р. и составляло 1–2,5 тыс. пожаров в год [*Чижов*, 1998].

Ко всем этим причинам сокращения площади лесов добавляется роль нефтяного загрязнения поверхности в связи с авариями и утечками на нефтепроводах. Древостой погибает полностью на участке разлива, если нефть сплошь покрывает почву и стоит большую часть года [*Московченко*, 1998]. Замазученность выше 40 % вызывает полную гибель хвойных пород, а свыше 45 % — и лиственных. Наибольшую устойчивость к нефтяному загрязнению проявляет береза высотой более 0,5 м. Устойчивость растений травяно-кустарничкового яруса ниже, чем древесного, из-за неглубокого проникновения корневой системы. Но по мере деградации нефти происходит восстановление растительности. На аварийных разливах деградационные изменения древостоя обычно заканчиваются в течение 2–3 лет [*Чижов*, 1998]. Аварии происходят в основном на внутрипромысловых нефтепроводах (плотность аварий на них в 150–200 р. выше, чем на магистральных), а на них преобладают небольшие разливы площадью менее 1 га. Поэтому, учитывая возможности самовосстановления и относительно малые площади повреждений, нефтяные разливы представляют собой лишь дополнительный фактор исчезновения лесов исследуемого района.

В какой мере сокращение площадей лесов сопровождалось изменением их породного состава? В северотаежных лесах района основу составляют 3 породы — сосна, кедр, береза [*Овечкина*, 2016). Вырубаются в первую очередь хвойные насаждения. Наибольшую устойчивость к нефтяному загрязнению, как и к другим видам воздействия, проявляет береза [*Чижов*, 1998]. По этим причинам в оставшихся островных участках лесов преобладает береза, а хвойные породы характерны для сохранившихся в восточной части района лесных массивов. На расчленяющих эти массивы трассах линейных сооружений в восстановлении растительного покрова в первые годы после его нарушений преобладают травы и мхи, позднее заметное участие в нем принимают кустарнички и кустарники, подрост деревьев. Однако прежняя роль лишайников в этих сообществах за исследованный томскими специалистами 33-летний период не восстановилась [*Москаленко*, 2006].

В занятых болотами средней и западной частях района произошли существенные изменения в распределении болот разных видов. Переувлажненные низинные болота не только окаймляли юго-восточный берег Самотлора, но распространялись далеко на восток и юго-восток, подходя достаточно близко к лесным массивам и оставляя для верховых болот относительно неширокую полосу перед лесами. В современном ландшафте низинные болота четко привязаны к берегам оз. Самотлор и близлежащих малых термокарстовых озер, образуя вокруг них кайму шириной порядка 1 км. Вся остальная территория, вплоть

до ранее залесенных районов, занята верховыми болотами разных видов. Более обводненные грядово-озерково-мочажинные болота образовались в основном на месте непроходимых болот 1980 г. (отнесенных на рис. 3а к низинным), а переходную полосу между ними и сведенными лесами занимают менее увлажненные грядово-мочажинные болота.

В результате работы сравнение карт показывает уменьшение обводненности территории, на месте избыточно обводненных образовались менее гидроморфные комплексы. Такое изменение связано с развитием инфраструктуры месторождения на заболоченных территориях. Создание площадок буровых установок и площадей для предприятий по первичной переработке нефти предусматривает их засыпание песком, повышение уровня, обвалование. К тому же ведет строительство дорог, трасс трубопроводов. Дороги без необходимых водопропускных сооружений увеличивают обводненность по одну сторону от дороги, но уменьшают — по другую, способствуя высыханию болот. Отмечаемый при сравнении карты 1980 г. и современных космических снимков переход от более гидроморфных к менее гидроморфным видам болот связан с формированием в пределах болот дренированных зон — кустовых и промышленных площадок, 20-метровых полос автодорог и 5–15-метровых трасс трубопроводов [*Соромотин*, 2010]. Все это говорит о том, что при разработке месторождения увеличивается степень дренированности территории — показатель, определяющий динамику лесоболотных ландшафтов [*Орлов*, 1968]. Таким образом, экологические последствия освоения территорий нефтяных месторождений не всегда могут быть оценены однозначно как отрицательные [*Соромотин*, 2010]. К положительным изменениям можно отнести также и увеличение озелененности территории в последние десятилетия, о чем было сказано выше — появление зеленых насаждений на откосах дорог, обваловке кустовых площадок, отмелях вдоль дамб, пересекающих оз. Самотлор.

ВЫВОДЫ

Сравнение карт распределения лесных и болотных комплексов лесоболотных ландшафтов, составленных по картографическим материалам прошлых лет и современным космическим снимкам, показало разнонаправленные тенденции изменения ландшафтов за длительный период эксплуатации месторождения. С одной стороны, это сокращение площади лесов и образование на месте сведенных лесов пустошей — травяно-кустарниковых комплексов, сочетающихся с сохранившимися островными участками лесов. С другой стороны — в болотных массивах произошло уменьшение их обводненности и увеличение дренированности: сократились площади избыточно обводненных низинных болот при их локализации по берегам озер; на месте низинных болот образовались менее обводненные грядово-озерково-мочажинные верховые болота; широко развиты еще менее обводненные грядово-мочажинные верховые болота. Эти изменения свидетельствуют об общем увеличении дренированности территории, что можно рассматривать как некоторое положительное влияние нефтеразработок на состояние ландшафтов, обычно оцениваемое экологами исключительно с позиций нефтяного загрязнения и деградации растительности.

Большое значение изменению дренированности придавал В.И. Орлов, положив степень дренированности территории в основу карты хода развития природы лесоболотной зоны Западной Сибири [*Орлов*, 1968]. Выявленное изменение степени дренированности в связи с нефтедобывающей деятельностью особенно существенно в условиях западносибирских территорий, учитывая необходимость в проведении одновременно с хозяйственным строительством повсеместной мелиорации болот.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по теме Госзадания «Развитие методов и технологий картографии, геоинформатики и аэрокосмического зондирования в исследованиях природы и общества». Авторы выражают благодарность Кембриджскому университету за содействие в оснащении космическими снимками.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was performed on the topic of the State Assignment “Development of methods and technologies of cartography, geoinformatics and remote sensing in the studies of nature and society”. The authors are grateful to the University of Cambridge for assistance in equipping with satellite images.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Астапов А.П., Брадучан Ю.В., Боровский В.В., Воронин А.С. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1: 1 000 000 (третье поколение). Серия: Западно-Сибирская. Лист P-43-Сургут. Объяснительная записка. СПб: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2012. 342 с.

Елсаков В.В. Материалы спутниковых съемок в анализе значений хлорофильного индекса тундровых фитоценозов. Исследование Земли из космоса, 2013. № 2. С. 1–11.

Железный О.М., Тутубалина О.В., Кравцова В.И. Оценка изменений растительности Норильского промышленного района по дистанционным данным на основе анализа трендов спектральных индексов. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2022. Т. 19. № 1. С. 170–178.

Исаченко А.Г. Ландшафты СССР. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1985. 320 с.

Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований. М.: Академия, 2011. 416 с.

Космические методы геоэкологии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 104 с.

Котляков В.М., Комарова А.И. Туризм: природа – культура – путешествия. Пятиязычный словарь. Русский (с краткими дефинициями), английский, французский, испанский, немецкий. М.: Кодекс, 2013. 672 с.

Котова О.И. Оценка антропогенного воздействия на природную среду с использованием космических снимков и ГИС: автореф… дис. кан. геогр. наук. М.: 1993. 25 с.

Москаленко Н.Г. Антропогенная динамика растительности тундр и таежных зон. Антропогенные изменения экосистем Западно-Сибирской газоносной провинции. Ин-т криосферы Земли, 2006. 357 с. С. 61–96.

Московченко Д.В. Нефтегазодобыча и окружающая среда. Эколого-геохимический анализ Тюменской области. Новосибирск: Наука Сибпредприятие РАН, 1998. 112 с.

Национальный атлас России. Т. 2. Природа. Экология. М., 2007. С. 331.

Овечкина Е.С. Краткий анализ распределения растительности Нижневартовского района. Актуальные вопросы науки и практики XXI в. Материалы 3-ей Международной научно-практической конф. Нижневартовск 27–30 ноября 2016 г. Нижневартовск: Наука и практика, 2016. С. 110–117.

Орлов В.И. Ход развития природы лесоболотной зоны Западной Сибири. Л.: Недра, 1968. 171 с.

Подкошникова С.В., Сущеня В.А. Изменение растительности болот Самотлора под влиянием инженерных сооружений. Известия АН СССР. Серия географическая, 1981. № 4. С. 47–56.

Рациональное природопользование и охрана природы в СССР. М.: Изд-во Московского ун-та, 1989. 208 с.

Скарятин В.Д., Тихомирова О.М. Использование и обработка данных дистанционного зондирования при изучении нефте- и газоносных районов Западной Сибири. Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса. М.: Научный мир, 2012. 558 с. С. 435–441.

Соромотин А.В. Воздействие добычи нефти на таежные экосистемы Западной Сибири. Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2010. 320 с.

Чижов Б.Е. Лес и нефть Ханты-Мансийского автономного округа. Тюмень: Изд-во Мандрики, 1998. 144 с.

Шуйцев Ю.К. Деградация и восстановление растительных сообществ тайги в сфере влияния нефтедобычи. Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. М.: Наука, 1982. С.70–81.

Cloutis E.A. Spectral reflectance properties of hydrocarbons: Remote-sensing implications. Science, 1989. V. 245. P. 165–168. DOI: 10.1126/science.245.4914.165.

Horig B., Kuhn F., Oschutz F., Lehmann F. HyMap hyperspectral remote sensing to detect hydrocarbons. International Journal of Remote Sensing, 2001. V. 22. P. 1413–1422. DOI: 10.1080/01431160120909.

REFERENCES

Astapov A.P., Braduchan Yu.V., Borovskiy V.V., Voronin A.S. et al. State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 1 000 000 (third generation). Series: West Siberian. Sheet P-43-Surgut. Explanatory letter. St. Petersburg: VSEGEI Mapping Factory, 2012. 342 p. (in Russian).

Chizhov B.E. Forest and oil of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug. Tyumen: Mandrika Publishing House, 1998. 144 p. (in Russian).

Cloutis E.A. Spectral reflectance properties of hydrocarbons: Remote-sensing implications. Science, 1989. V. 245. P. 165–168. DOI: 10.1126/science.245.4914.165.

Elsakov V.V. Satellite imagery materials in the analysis of the values of the chlorophyll index of tundra phytocenoses. Atmospheric and Oceanic Physics, 2013. No. 2. P. 1–11 (in Russian).

Horig B., Kuhn F., Oschutz F., Lehmann F. HyMap hyperspectral remote sensing to detect hydrocarbons. International Journal of Remote Sensing, 2001. V. 22. P. 1413–1422. DOI: 10.1080/01431160120909.

Isachenko A.G. Landscapes of the USSR. Leningrad: Publishing house of Leningrad University, 1985. 320 p. (in Russian).

Knizhnikov Yu.F., Kravtsova V.I., Tutubalina O.V. Aerospace methods of geographical research. Moscow: Academy, 2011. 416 p. (in Russian).

Kotlyakov V.M., Komarova A.I. Tourism: nature – culture – travel. A five-language dictionary. Russian (with short definitions), English, French, Spanish, German. Moscow: Codex, 2013. 672 p. (in Russian).

Kotova O.I. Assessment of anthropogenic impact to the natural environment using satellite images and GIS: Abstract… of PhD (Geogr.) Dissertation. Moscow, 1993. 25 p. (in Russian).

Moskalenko N.G. Anthropogenic dynamics of vegetation in the tundra and taiga zones. Anthropogenic changes in the ecosystems of the West Siberian gas-bearing province. Earth Cryosphere Institute, 2006. 357 p. P. 61–96 (in Russian).

Moskovchenko D.V. Oil and gas production and the environment. Ecological and geochemical analysis of the Tyumen region. Novosibirsk: Nauka Siberian Enterprise of the Russian Academy of Sciences, 1998. 112 p. (in Russian).

National Atlas of Russia. V. 2. Nature. Ecology. Moscow, 2007. P. 331 (in Russian).

Orlov V.I. The course of development of the nature of the forest-bog zone of Western Siberia. Leningrad: Nedra, 1968. 171 p. (in Russian).

Ovechkina E.S. A brief analysis of the distribution of vegetation in the Nizhnevartovsk region. Actual questions of science and practice of the XXI century. Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conf. Nizhnevartovsk November 27–30, 2016. Nizhnevartovsk: Science and Practice, 2016. P. 110–117 (in Russian).

Podkoshnikova S.V., Sushchenya V.A. Changes in the vegetation of Samotlor swamps under the influence of engineering structures. Izvestia AN SSSR. Seriya geograficheskaya (News of the Academy of Sciences of USSR. Geographical series), 1981. No. 4. P. 47–56 (in Russian).

Rational nature management and nature protection in the USSR. Moscow: Moscow University Press, 1989. 208 p. (in Russian).

Shuitsev Yu.K. Degradation and restoration of taiga plant communities in the sphere of influence of oil production. Mining and geochemistry of natural ecosystems. Moscow: Nauka, 1982. P. 70–81 (in Russian).

Skaryatin V.D., Tikhomirova O.M. Use and processing of remote sensing data in the study of oil and gas-bearing regions of Western Siberia. Aerospace monitoring of oil and gas facilities. Moscow: Scientific World, 2012. 558 p. P. 435–441 (in Russian).

Soromotin A.V. The impact of oil production on the taiga ecosystems of Western Siberia. Tyumen: Publishing House of the Tyumen State University, 2010. 320 p. (in Russian).

Space methods of geoecology. Moscow: Moscow University Press, 1998. 104 p. (in Russian).

Zheleznyy O.M., Tutubalina O.V., Kravtsova V.I. Estimation of changes in the vegetation of the Norilsk industrial region from remote data based on the analysis of trends in spectral indices. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2022. V. 19. No. 1. P. 170–178 (in Russian).

УДК: 528.88+574.42+004.93 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-393-405**

В.А. Мелкий[1], **А.А. Верхотуров**[2]

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ В ЗАКАЗНИКЕ «МАКАРОВСКИЙ» (САХАЛИН) ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты анализа изменения состояния лесных растительных сообществ в заказнике «Макаровский» в период с 1980 по 2020 гг. В процессе работы создана модель растительного покрова Макаровского заказника, которая позволила определять различные растительные сообщества и их состояние. Данными для построения картографической модели послужили формализованные спектральные характеристики о поверхности растительных сообществ, зафиксированные на снимках Landsat-1–7 и Sentinel-2. При проведении неконтролируемой классификации на территории ООПТ с помощью ArcGIS по спектральным характеристикам выделено 7 классов объектов. Разделение темнохвойных и лиственных лесов, выявление границ участков с различным породным составом древостоев, выделение мест вырубок производилось на основании нормализованного вегетационного индекса (NDVI). Точность определения состава древостоев по результатам дешифрирования проверялась на основе данных геоботанических исследований на территории заказника «Макаровский». В составе растительного покрова Макаровского заказника выделено 8 лесных растительных сообществ — елово-пихтовые, каменноберезовые леса, формация кедрового стланика, долинные лиственные, березовые, березово-еловые леса, редколесья, местами лиственничные леса, и 2 нелесных — формация курильского бамбука и луговая растительность. Лесные сообщества занимают 95 % территории заказника «Макаровский». Ландшафтно-климатические условия района оптимальны для произрастания елово-пихтовых лесов, которые покрывают 44 % от общей площади Макаровского заказника. На вырубках широко распространены березовые и каменноберезовые леса (39 %) заказника. Наблюдается широкое распространение вторичной сукцессии на территории Макаровского заказника. Состав древостоев в лесах заказника существенно изменился за исследуемый период в пользу молодых хвойных деревьев. Растительность в Макаровском заказнике сохранила свой естественный первозданный облик и отражает как высотную дифференциацию, так и ландшафтно-зональные особенности средней подзоны тайги Сахалина. Применение космических снимков среднего пространственного разрешения позволило достаточно точно проанализировать состояние лесов Макаровского заказника. Более детальные исследования требуют применения беспилотных летательных аппаратов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дистанционное зондирование, геоинформационное картографирование, растительные сообщества, лесные экосистемы, устойчивое развитие

[1] Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, лаборатория вулканологии и вулканоопасности, ул. Науки, 1Б, г. Южно-Сахалинск, Россия, 693022, *e-mail:* **vamelkiy@mail.ru**

[2] Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Центр коллективного пользования, ул. Науки, 1Б, г. Южно-Сахалинск, Россия, 693022, *e-mail:* **ussr-91@mail.ru**

Vyacheslav A. Melkiy[1], **Alexey A. Verkhoturov**[2]

ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF CONDITION FOREST PLANT COMMUNITIES IN THE "MAKAROVSKY" NATURE SANCTUARY (SAKHALIN ISLAND) BY REMOTE SENSING DATA

ABSTRACT

The results of the analysis of changes in the state of forest plant communities in the "Makarovsky" Nature Sanctuary in the period from 1980 to 2020 are presented in the article. In the process of our work there was created a model of the vegetation cover of the "Makarovsky" Sanctuary, which made it possible to determine the difference between plant communities and their condition. The data for the construction of the cartographic model were formalized spectral characteristics of the surface of plant communities recorded on Landsat-1–7 and Sentinel-2 images. In a specially protected natural area, 7 classes of objects have been identified when conducting uncontrolled classification using ArcGIS according by their spectral characteristics. The division of dark coniferous and deciduous forests, the identification of the boundaries of plots with different species composition of forest stands and the allocation of felling sites was performed on the basis of the normalized vegetation index (NDVI). The accuracy of determining the composition of forest stands based on the results of interpretation was checked by data of geobotanical research data on the territory of the "Makarovsky" Nature Sanctuary. As part of the vegetation cover of the "Makarovsky" Nature Sanctuary, 8 forest communities were identified — spruce-fir, stone-birch forests, cedar elfin formation, valley deciduous, birch, birch-spruce forests, woodlands, sometimes larch forests, and 2 non-forest communities — Kuril bamboo formation and meadow vegetation. Forest communities occupy 95 % of the territory of the "Makarovsky" Sanctuary. The landscape and climatic conditions of the area are optimal for the growth of spruce-fir forests, which cover 44 % of the total area of the "Makarovsky" Nature Sanctuary. Birch and stone-birch forests (39 %) are widespread on logged land in Sanctuary. There is a wide distribution of secondary succession in the territory of the "Makarovsky" Nature Sanctuary. The composition of forest stands in Sanctuary has changed significantly over the research period in favor of young coniferous trees. Vegetation in the "Makarovsky" Nature Sanctuary has preserved its natural pristine appearance and reflects both altitude differentiation and landscape-zonal features of the middle taiga subzone of Sakhalin. The use of satellite images of medium spatial resolution made it possible to accurately analyze the state of forests of the "Makarovsky" Sanctuary. More detailed researches require the use of unmanned aerial vehicles.

KEYWORDS: remote sensing, geoinformation mapping, plant communities, forest ecosystems, sustainable development

ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных современных экологических проблем на Земле считается обезлесение [*Imai*, 2012; *Myers*, 2019; *Кузьмичев* и др., 2018]. Наиболее значимые потери лесных насаждений наблюдались в последние десятилетия в России, Канаде, США, Бразилии и Индонезии [The State…, 2016]. Вырубка и сожжение лесов ведет к снижению переработки углекислого газа в кислород, деградации почв, опустыниванию и

[1] Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Volcanology and volcano hazard, 1B, Nauki str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, *e-mail:* **vamelkiy@mail.ru**

[2] Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of Russian Academy of Sciences, Center of collective use, 1B, Nauki str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, *e-mail:* **ussr-91@mail.ru**

уменьшению биоразнообразия. Для защиты лесных экосистем от уничтожения целесообразно создавать особо охраняемые природные территории (ООПТ) [*Атаев* и др., 2016; *Сабиров*, *Сабирова*, 2013].

С момента появления в России в начале 1917 г. Баргузинского заповедника сеть ООПТ страны развивалась и совершенствовалась [*Чибилев*, 2017]; иногда имело место сокращение числа заповедников (1951, 1961 гг.), были времена быстрого роста их численности (1990-е).

В Сахалинской области перспективы развития лесного и охотничьего хозяйства, а также ООПТ определяются долгосрочными программными документами в данной сфере, принятыми в Российской Федерации[1]. Областной государственной программой предусмотрены повышение эффективности лесопользования при сохранении экологической функции лесов и обеспечение надежной охраны и восстановления биоразнообразия в пределах ООПТ регионального значения[2].

Достижение поставленных задач требует проведения оценки лесных ресурсов и состояния земель лесного фонда с целью обоснованного планирования и проектирования лесовосстановительных работ. Оценку состояния растительных сообществ производят с помощью моделирования процессов, происходящих в лесных экосистемах [*Kolobov*, *Frisman*, 2016; *Marconi* et al., 2017] на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [*Gonsamo*, *Chen*, 2016].

В свободном доступе в большом количестве имеются материалы ДЗЗ среднего пространственного разрешения (10–100 м по ГОСТ Р 59478-2021[3]), которые пригодны для картографирования в м-бах 1: 2 000–1: 20 000. Разрешение этих изображений недостаточно для исследования породного состава древостоев, где растительный покров сильно неоднороден. В настоящее время все более востребованными при исследованиях природной среды становятся методы аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые позволяют получить координатно- и высотно-привязанную информацию о состоянии поверхности с пространственным разрешением 0,02–0,07 м [*Аврунев* и др., 2018; *Хлебникова*, *Опритова*, 2018].

В тематическом геоинформационном картографировании используется значительное количество ГИС [*Тикунов*, *Цапук*, 1999], позволяющих осуществлять мониторинг состояния окружающей среды; несмотря на это, оценить состояние растительного покрова удается не всегда. Требуется глубокое понимание как специфики извлечения данных о процессах отражения и прохождения электромагнитных волн в атмосфере, клетках растений и почвах, так и особенностей системных связей в лесных сообществах. Следует тщательно подбирать технологические схемы предварительной

---

1 Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 20.09.2018 г. № 1989-р (с изменениями на 28.02.2019 г.). Сайт АО «Кодекс». Электронный ресурс: http://docs.cntd.ru/document/553806752 (дата обращения 25.01.2023).

2 Государственная программа Сахалинской области «Развитие лесного комплекса, охотничьего хозяйства и особо охраняемых природных территорий Сахалинской области на 2014–2020 гг.». Утверждена Постановлением Правительства Сахалинской области от 18.07.2013 г. № 353. Официальный сайт Министерства экологии Сахалинской области. 2020. Электронный ресурс: https://ecology.sakhalin.gov.ru/dejat elnost/lesopromyshlennyi-kompleks/strategija-razvitija/ (дата обращения 25.01.2023).

3 ГОСТ Р 59478-2021. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Требования к данным дистанционного зондирования Земли из космоса. Перечень требований к данным дистанционного зондирования Земли из космоса, получаемым с космических аппаратов оптико-электронного наблюдения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. Сайт «ГОСТы и стандарты». Электронный ресурс: https://standartgost.ru/g/ГОСТ_Р_59478-2021 (дата обращения 25.05.2023).

обработки снимков. Мы уделили существенное внимание решению задач выявления типов растительных сообществ заказника «Макаровский».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Государственный биологический заказник «Макаровский» создан в 1992 г. Он располагается к востоку от водораздельной линии Камышового хребта и объединяет верхнюю часть бассейнов рр. Макарова, Лесной и Лазовой. Заказник «Макаровский» (рис. 1) представляет собой охраняемую природную территорию, площадью 346,85 км^2, предназначенную для охраны редких и исчезающих видов растений и животных и сохранения биотопов лесных горных массивов, характерных для южной части о. Сахалин [*Лобищева*, *Мелкий*, 2010].

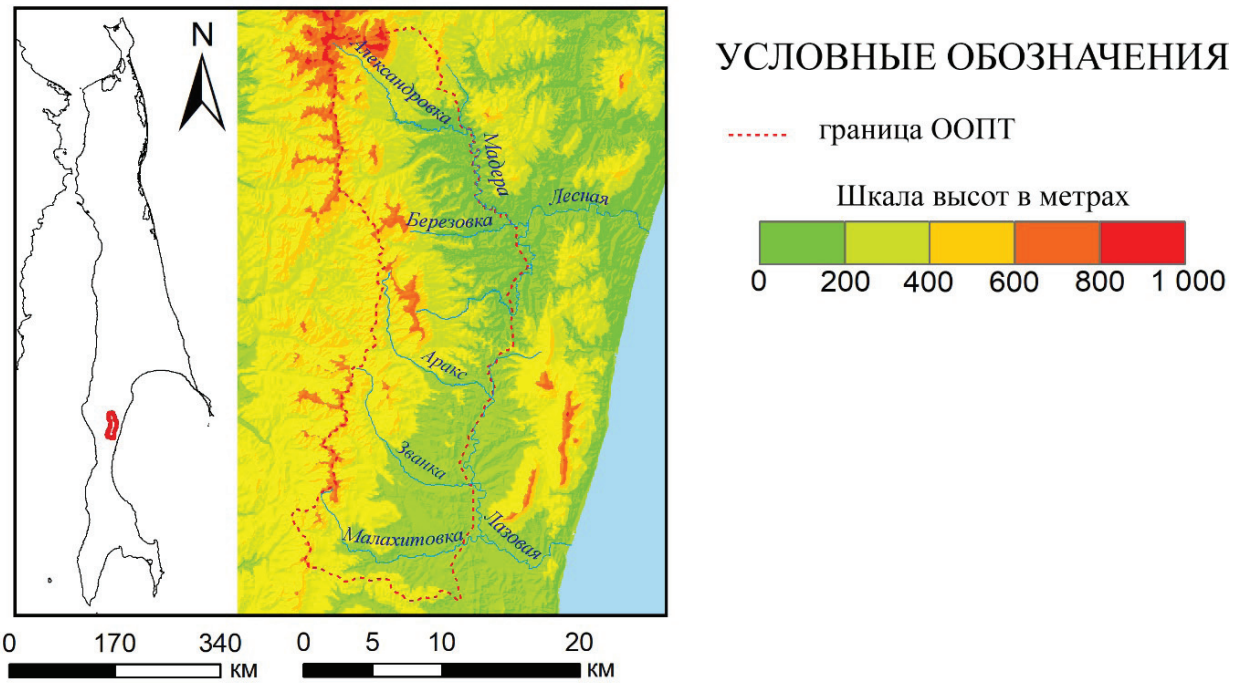


Рис. 1. Местоположение заказника «Макаровский» и схема рельефа на его территории
Fig. 1. Location of the Makarovsky Nature Sanctuary and the relief scheme on its territory

Материалами для проведения оценочных работ послужили доступные снимки с различных космических аппаратов, отличающиеся техническими характеристиками, в т. ч. различным набором каналов среднего пространственного разрешения систем Landsat[1] и Sentinel-2[2] в период с 1980 по 2020 гг., разномасштабные топографические карты, цифровая модель рельефа (ALOS) и данные многолетних геоботанических исследований. Для работы использовались снимки с пространственным разрешением 15–30 м, которые пригодны для создания моделей и картографических изображений м-бов 1: 3 000 – 1: 60 000.

В работе выполнена подготовка космических снимков к дальнейшим преобразованиям посредством применения функционала GIS: обработки растров, векторизации и подсчета пространственно-количественных показателей (рис. 2).

1 Landsat Missions. United States Geological Survey (USGS), 2020. Электронный ресурс: https://www.usgs.gov/media/images/9-millionth-scene-added-usgs-landsat-archive (дата обращения 25.01.2023).

2 Sentinel Online. European Space Agency (ESA), 2021. Электронный ресурс: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/ missions (дата обращения 25.01.2023).

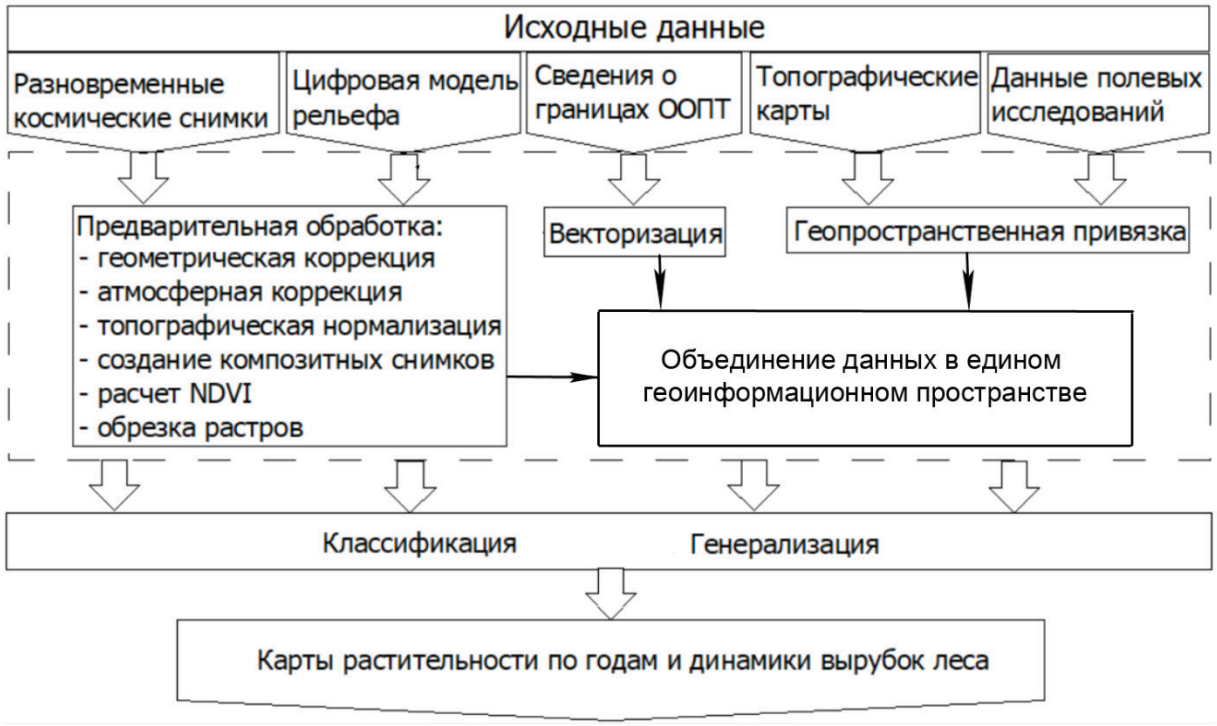


Рис. 2. Технологическая схема подготовки и обработки снимков [*Верхотуров,* 2020]
Fig. 2. Technological scheme for preparing and processing images [*Verkhoturov,* 2020]

Существует множество способов классификации растровых изображений [*Shahtahmassebi* et al., 2013; *Барталев* и др., 2015; *Корзников* и др., 2020; *Маркова*, *Тикунов*, 2022]. Процедура классификации в работе проведена с последовательным использованием методов классификации без обучения и с обучением. Обучающая выборка составлена из наборов пикселей, соответствующих местам выполнения геоботанических описаний. Группы пикселей, принадлежащие к различным растительным сообществам, объединены и переведены в векторный формат. Работа с векторными и растровыми данными проведена в программных продуктах QGIS 3.10, а также ArcGIS 10.4.1. Оценка состояния растительности определялась по нормализованному вегетационному индексу (NDVI), отражающему различия спектральной отражательной способности поверхности при отражении волн разной длины [*Черепанов*, *Дружинина*, 2009; *Черепанов*, 2011].

Расчет индекса NDVI основан на способности хлорофилла листьев высших сосудистых растений максимально поглощать излучение в красном (RED) диапазоне электромагнитного спектра и максимально отражать излучение клеточными структурами листа в ближнем инфракрасном (NIR) диапазоне электромагнитного спектра и определяется по следующей формуле:

$$NDVI = (NIR-RED) / (NIR+RED) \quad (1),$$

где NIR — отражение в ближней инфракрасной области спектра;
RED — отражение в красной области спектра [*Кравцова*, 1995].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Комбинация каналов ближнего инфракрасного, красного и зеленого позволила уверенно выделить при дешифрировании типы растительного покрова на разносезонных снимках. Так, на летних снимках разделяются участки, покрытые хвойными или

лиственными породами. Для отделения лиственничных лесов от елово-пихтовых сообществ хорошо подходят снимки, полученные поздней осенью (октябрь), когда хвоя лиственниц окрашивается в желтый цвет, а лиственные породы уже сбросили листву. На зимних снимках хорошо обособляются хвойный лес, а также древостои, в составе которых участвуют хвойные деревья. На летних снимках на этих же участках отмечаются лиственные деревья. Данный факт свидетельствует о наличии сукцессии в поздних стадиях развития, когда в составе древостоев наблюдается достаточно много хвойных деревьев, которые находятся во втором ярусе или в подросте.

При проведении неконтролируемой классификации на территории ООПТ по спектральным характеристикам выделено 7 классов объектов. Среди них хорошо обособляются хвойные и березовые леса, заросли кедрового стланика, травянистая растительность (бамбучники, альпийские и долинные луга) и редколесье. Три класса объектов (березовых и каменноберезовых лесов, класс, объединяющий часть стлаников и хвойных пород, а также затененные участки лесов преимущественно на северных склонах) получились проблемными с точки зрения идентификации. Требуется дополнительная обработка с учетом специфики распределения растительности в условиях высотной поясности, а также данных геоботанических исследований.

Для проведения контролируемой классификации были использованы эталонные области, которые принадлежат к определенному классу, выявленному по данным геоботанических исследований. Значения пикселов эталонных областей в различных диапазонах спектра используются в качестве обучающих выборок для настройки алгоритмов распознавания. В результате для каждого растительного сообщества определяется свой эталон, который объединяет спектральные признаки класса принадлежащих ему пикселов. После сравнения с этими эталонами пикселы изображения отнесены к тому или иному классу.

В составе растительного покрова Макаровского заказника выделено 10 физиономических типов растительных сообществ (рис. 3). На исследованной территории в той или иной степени представлены темнохвойные, каменноберезовые и другие лиственные леса, долинные лесные комплексы, заросли кедрового стланика и курильского бамбука, луговая растительность, а также фрагменты лиственничников.

Темнохвойные леса покрывают 44 % площади заказника «Макаровского» и являются характерной растительной средой в бассейнах рр. Лесной и Лазовой. Такой же лес формирует подзону в центральной части сахалинской тайги [*Крестов* и др., 2004]. Климатический фон территории является благоприятным для роста и развития темнохвойных лесов.

Основные площади коренных каменноберезовых лесов расположены в горах выше ельников, образуя отдельный высотный растительный пояс, а также в сообществе с курильским бамбуком встречаются на выположенных водоразделах. Каменноберезники тянутся в виде узких и неровных лент, которые поднимаются до высоты 650–750 м над уровнем моря, вклиниваясь языками в пояс кедрового стланика. В настоящее время каменноберезники, встречающиеся вне пояса своего распространения, представляют чаще всего производные сообщества и находятся на различной стадии восстановительных сукцессий.

Кедровостланиковые сообщества распространены на горных склонах и хребтах, образуя самостоятельный растительный пояс, расположенный выше каменноберезового. В верхней части Камышового хребта кедровый стланик сплошным ковром покрывает вершины и отроги.

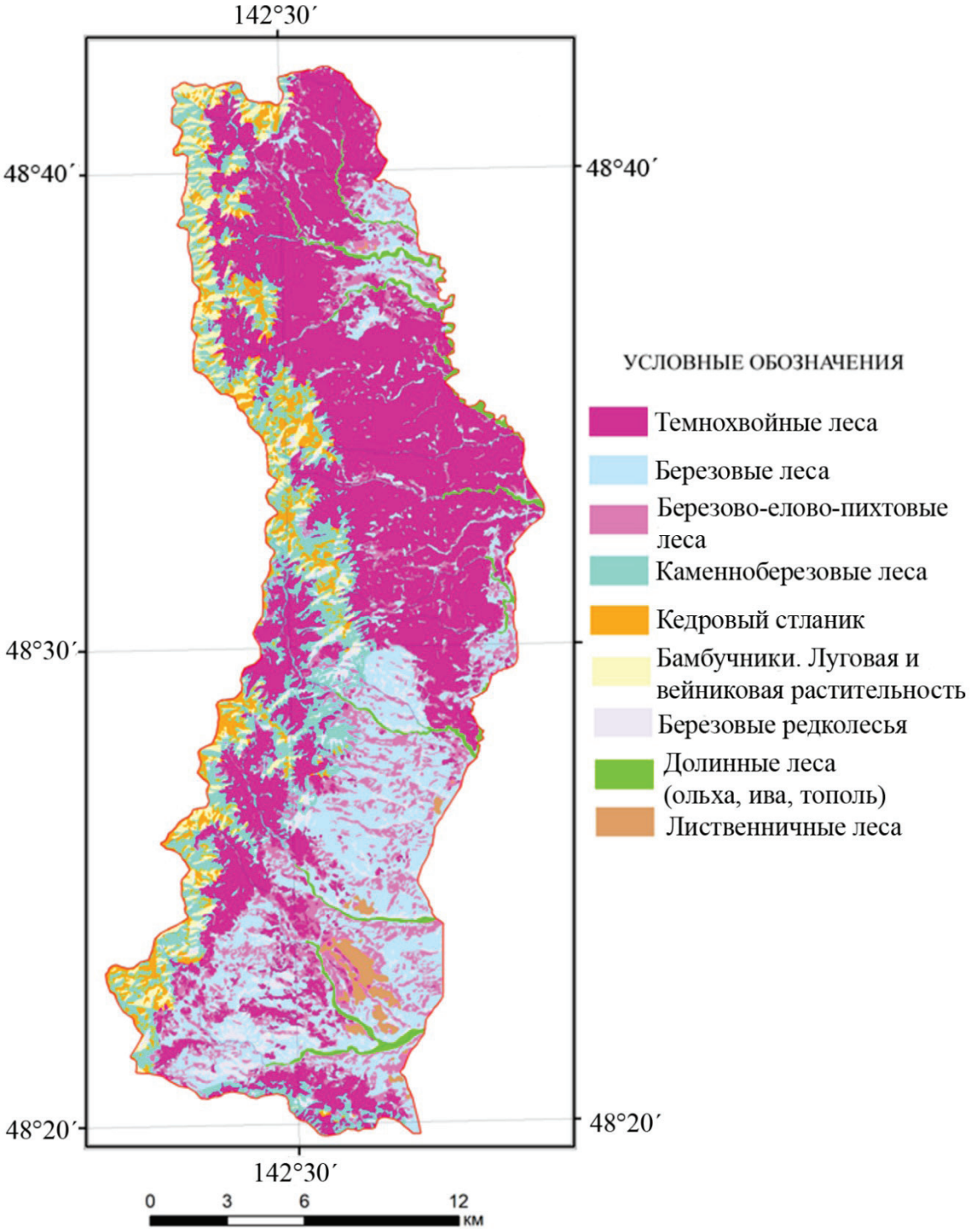


Рис. 3. Современные растительные сообщества заказника «Макаровский»
Fig. 3. Current state of plant associations of the "Makarovsky" Nature Sanctuary

Долинные леса распространены локально и небольшими участками, занимают чуть более 2 % площади исследованной территории. Они, как правило, располагаются по поймам и вдоль берегов рек и их притоков.

Формация курильского бамбука чаще всего формируется в высокогорных комплексах. Бамбук также участвует в составе темнохвойных лесов и горных каменноберезников.

Лиственничные леса в основном приурочены к заболоченным низинам. Однако в связи с гористым характером большей части территории этой подзоны, болотные комплексы развиты очень слабо.

Луговая растительность на территории Макаровского заказника, в связи с особыми природными условиями, не имеет столь масштабного распространения, как лесная. Как правило, эти луга имеют вторичное происхождение, возникают на месте сведенной лесной растительности, в основном после сплошных рубок.

Дешифрирование космических снимков территории заказника «Макаровский» позволило выявить значительную пестроту спектральных свойств поверхности, отражающих состояние растительности в его пределах [*Сабиров* и др., 2009]. По яркостным признакам в красном, ближнем инфракрасном диапазоне отчетливо разделились территории с различными растительными формациями. Съемочные системы используемых спутников получают изображения в диапазонах, позволяющих решать поставленные в работе задачи. Результаты дешифрирования не противоречат информации, полученной ранее при исследованиях растительности по космическим изображениям [*Лобищева*, *Мелкий*, 2010; *Верхотуров*, *Мелкий*, 2020].

Динамика сукцессии растительности после вырубок и пожаров определена и охарактеризована на больших площадях по данным дистанционного зондирования, что позволяет понять характер данного процесса. Анализ экологического состояния территории заказника «Макаровский» выполнен на основе исследования изменений показателя фотосинтетически активной биомассы (рис. 4). Вегетационный индекс (NDVI) характеризует параметры растительности, которые рассчитываются для каждого пикселя снимка в красной и ИК-зонах спектра (табл. 1).

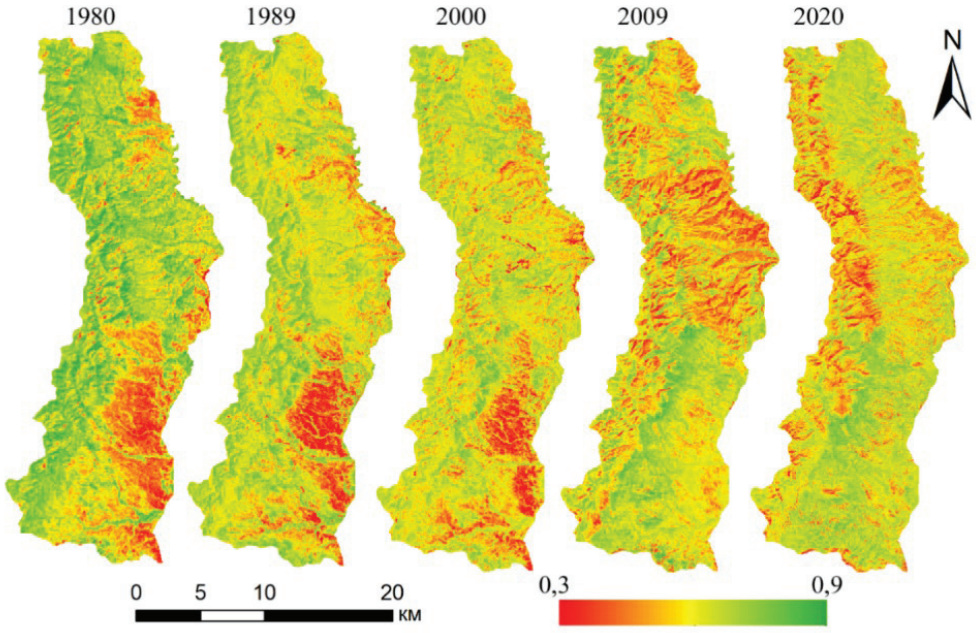


Рис. 4. Изменение фитомассы растительных сообществ в заказнике «Макаровский» по NDVI
Fig. 4. Changes in the phytomass of plant communities in Makarovsky nature sanctuary according to NDVI

На снимках, выполненных с интервалом в 10 лет, хорошо прослеживаются изменения в северо-восточной и юго-восточной частях заказника «Макаровский». За этот

период на этих территориях практически на всех безлесных участках сформировались березовые леса. На ¼ площади, занятой березниками, в настоящее время до 50 % древостоев составляют хвойные породы.

Табл. 1. Изменения площади, занятой растительными сообществами с различными значениями NDVI и свежих вырубок
Table 1. Changes in area occupied by plant communities with different NDVI values and fresh felling

	Площадь по годам (км^2)				
Значение NDVI	**1980**	**1989**	**2000**	**2009**	**2020**
0–0,2	0	0	0,0012	0,0014	0,0017
0,2–0,4	0,4370	0,1250	0,1440	1,4316	0,0864
0,4–0,6	143,9224	2,7041	6,3747	151,7517	0,8741
0,6–0,8	247,5456	231,1453	265,8041	238,7203	201,8312
0,8–1,0	0	157,9306	119,5810	0	189,1116
Площадь свежих вырубок	4,9841	0,6270	2,3625	5,2256	не отмечено

Интерпретация разновременных NDVI-сцен и синтезированных снимков позволили выявить места свежих вырубок темнохвойных лесов (рис. 5). В последние 40 лет на исследуемой территории наблюдались рубки в центральной, северо-западной и юго-западной частях.

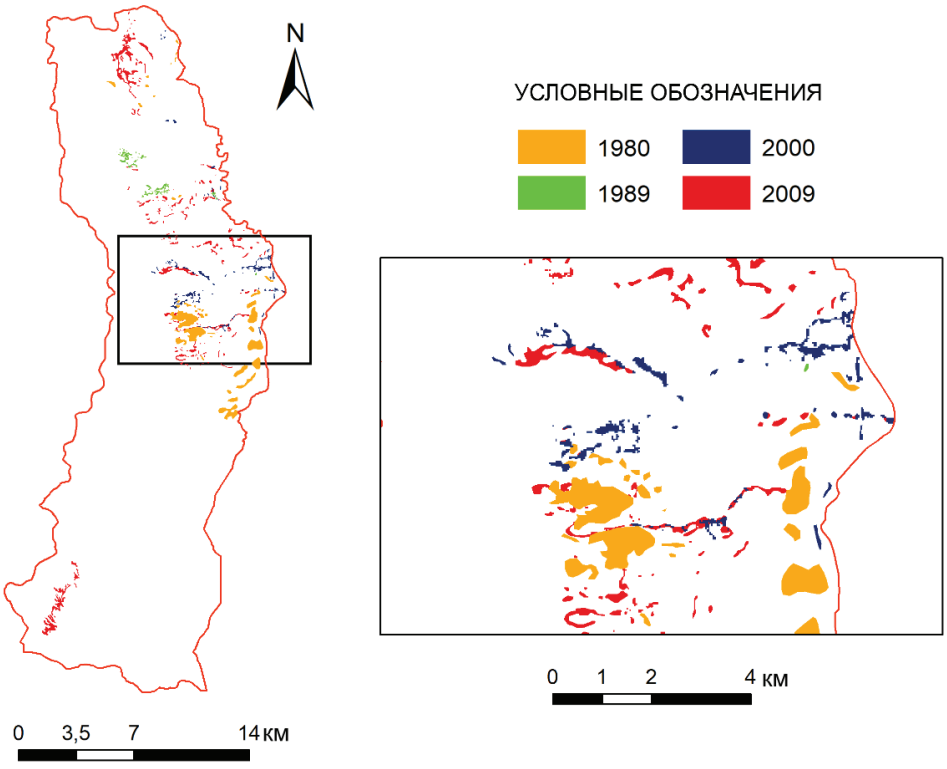


Рис. 5. Изменения площадей свежих вырубок
Fig. 5. Changing areas of fresh felling

ВЫВОДЫ

Применение космических снимков среднего пространственного разрешения позволило достаточно точно выделить ареалы растительных сообществ посредством классификации и проанализировать состояние лесов Макаровского заказника при помощи изображений, полученных с использованием NDVI. Более детальные исследования требуют применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые дают возможность получать изображения с очень высоким пространственным разрешением.

На месте сведенных хвойных лесов широко распространены березовые и каменноберезовые леса (39 %). На территории Макаровского заказника отмечается развитие вторичной сукцессии. За 30 лет существенно изменился состав растительных сообществ: количество хвойных деревьев на территориях, занятых вторичными лесами, заметно увеличилось, что хорошо просматривается на индексных изображениях масштабов крупнее 1: 300 000. Индексные изображения, характеризующие динамику состояния растительности в заказнике, приведены в статье в мелком масштабе, но даже они позволяют увидеть тенденции изменения растительного покрова в различных частях заказника.

Несмотря на высокую антропогенную нагрузку в лесах на территории до момента образования заказника «Макаровский», отмечается наличие хорошо сохранившихся, малонарушенных участков темнохвойной сахалинской тайги с большим биологическим и ценотическим разнообразием. Изменение флористического состава древостоев и процессы деградации отдельных видов деревьев, обусловленные факторами естественного отбора, не имеют в заказнике широкого распространения, что свидетельствует о хорошей геоэкологической обстановке в его лесах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аврунев Е.И., Ямбаев Х.К., Опритова О.А., Чернов А.В., Гоголев Д.В. Оценка точности 3D-моделей, построенных с использованием беспилотных авиационных систем. Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ), 2018. Т. 23. № 3. С. 211–228. Электронный ресурс: https://geocartography.ru/source/vestnik_ssugt/2018_3_211-228 (дата обращения 25.05.2023).

Атаев З.В., Братков В.В., Абдулаев К.А., Балгуев Т.Р., Гаджибеков М.И. Географические аспекты сохранения биологического и ландшафтного разнообразия в проектируемом Самурском национальном парке на Восточном Кавказе. Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки, 2016. Т. 10. № 3. С. 91–102. Электронный ресурс: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_27206594_96536233.pdf (дата обращения 25.05.2023).

Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А. Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015. № 12(5). С. 203–221.

Верхотуров А.А. Анализ изменений состояния экосистем на острове Атласова (Курильские острова). Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ), 2020. Т. 25. № 3. С. 139–150. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-139-150.

Верхотуров А.А., Мелкий В.А. Картографирование растительных сообществ подзоны темнохвойных лесов юга Сахалина на основе космических съемок. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2020. Т. 26. Ч. 4. С. 60–72. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-4-26-60-72.

Корзников К.А., Беляева Н.Г., Сандлерский Р.Б. Моделирование лесного покрова бассейна реки Венгери на острове Сахалин с применением данных дистанционного зондирования. Лесоведение, 2020. № 5. С. 399–411. DOI: 10.31857/S002411482005006X.

Кравцова В.И. Космические методы картографирования: учебное пособие для вузов. М.: Издательство Московского университета, 1995. 239 с.

Крестов П.В., Баркалов В.Ю., Таран А.А. Ботанико-географическое районирование острова Сахалин. Растительный и животный мир острова Сахалин: Материалы Международного сахалинского проекта. Владивосток: Дальнаука, 2004. Т. 1. С. 67–92. Электронный ресурс: https://www.researchgate.net/publication/267452843_Botaniko-geograficeskoe_rajonirovanie_ostrova_Sahalin (дата обращения 25.01.2023).

Кузьмичев Е.П., Трушина И.Г., Лопатин Е.В. Объемы незаконных рубок лесных насаждений в Российской Федерации. Лесохозяйственная информация: электронный сетевой журнал, 2018. № 1. С. 63–77. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2018.1.06.

Лобищева И.И., Мелкий В.А. Оценка экологической обстановки и проблемы сохранения биоразнообразия в заказнике «Макаровский» (остров Сахалин). Вестник Томского государственного университета, 2010. № 339. С. 201–204.

Маркова О.И., Тикунов В.С. Новые технологии для современной геоинформатики ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 5–34. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-5-34.

Сабиров Р.Н., Сабирова Н.Д. Лесные пожары в северных районах Сахалина. Вестник Сахалинского музея, 2013. № 1 (20). С. 235–244. Электронный ресурс: https://elibrary.ru/download/elibrary_36684746_36763741.pdf (дата обращения 25.01.2023).

Сабиров Р.Н., Сабирова Н.Д., Мелкий В.А., Белянина Я.П., Картушина Е.А. Растительный мир сахалинского природного заказника «Макаровский». Вестник Сахалинского музея, 2009. № 16. С. 302–318. Электронный ресурс: https://elibrary.ru/download/elibrary_36684097_72675301.pdf (дата обращения 25.01.2023).

Тикунов В.С., Цапук Д.А. Устойчивое развитие территорий: картографо-геоинформационное обеспечение. Москва – Смоленск: Издательство СГУ, 1999. 176 с.

Хлебникова Т.А., Опритова О.А. Экспериментальные исследования точности построения плотной цифровой модели по материалам беспилотной авиационной системы. Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ), 2018. Т. 23. № 2. С. 119–129. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-4-2-213-220.

Черепанов А.С. Вегетационные индексы. Геоматика, 2011. № 2. С. 98–102.

Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы. Геоматика, 2009. № 3. С. 28–32.

Чибилев А.А. История и современное состояние заповедного дела в России. Вестник Российской академии наук, 2017. Т. 87. № 3. С. 231–241. DOI: 10.7868/S0869587317030057.

Gonsamo A., Chen J.M. Circumpolar vegetation dynamics product for global change study. Remote Sensing of Environment, 2016. V. 182 (1). P. 13–26. DOI: 10.1016/j.rse.2016.04.022.

Imai N., Titin J., Kita S., Ong R.C., Kitayama K. Co-benefits of sustainable forest management for carbon sequestration. Co-benefits of Sustainable Forestry. Ecological Research Monographs. Springer – Tokyo, 2012. P. 129–148. DOI: 10.1007/978-4-431-54141-7_7.

Kolobov A.N., Frisman E.Ya. Individual-based model of spatio-temporal dynamics of mixed forest stands. Ecological Complexity, 2016. V. 27. P. 29–39. DOI: 10.1016/j.ecocom.2015.10.002.

Marconi S., Chiti T., Nolè A., Valentini R., Collalti A. The role of respiration in estimation of net carbon cycle: coupling soil carbon dynamics and canopy turnover in a novel version of 3D-CMCC forest ecosystem model. Forests, 2017. V. 8 (6). ID: 220. DOI: 10.3390/f8060220.

Myers S.L. China's voracious appetite for timber stokes fury in Russia and beyond. The New York Times, 2019. 10 April. Section A. P. 4. Web resource: https://www.nytimes.com/2019/04/09/world/asia/chinas-voracious-appetite-for-timber-stokes-fury-in-russia-and-beyond.html (accessed 25.01.2023).

Shahtahmassebi A., Yang N., Wang K., Moore N., Zhangquan Sh. Review of shadow detection and de-shadowing methods in remote sensing. Chinese Geographical Science, 2013. V. 23. No. 4. P. 403–420. DOI: 10.1007/s11769-013-0613-x.

REFERENCES

Ataev Z.V., Bratkov V.V., Abdulaev K.A., Balguev T.R., Gadzhibekov M.I. Geographical aspects of biological and landscape diversity in the designed Samur National Park in the Eastern Caucasus. Dagestan State Pedagogical University. Natural and Exact Sciences, 2016. V. 10. No. 3. P. 91–102 (in Russian). Web resource: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_27206594_96536233.pdf (accessed 25.05.2023).

Avrunev E.I., Yambaev Kh.K., Opritova O.A., Chernov A.V., Gogolev D.V. Accuracy evaluation of 3D models by using unmanned aerial system. Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT), 2018. V. 23. No. 3. P. 211–228 (in Russian). Web resource: https://geocartography.ru/source/vestnik_ssugt/2018_3_211-228 (accessed 25.05.2023).

Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A. Current state and development prospects of Satellite Mapping Methods of Russia's Vegetation Cover. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2015. V. 12. No. 5. P. 203–221 (in Russian).

Cherepanov A. Spectral characteristics of vegetation and vegetation indexes. Geomatica, 2011. No. 2. P. 98–102 (in Russian).

Cherepanov A., Druzhinina E. Spectral characteristics of vegetation and vegetation indexes. Geomatica, 2009. No. 3. P. 28–32 (in Russian).

Chibilev A.A. History and Current status of Reserve Management and Study in Russia. Herald of the Russian Academy of Sciences, 2017. V. 87. No. 3. P. 181–190 (in Russian). DOI: 10.1134/S1019331617020022.

Gonsamo A., Chen J.M. Circumpolar vegetation dynamics product for global change study. Remote Sensing of Environment, 2016. V. 182. No. 1. P. 13–26. DOI: 10.1016/j.rse.2016.04.022.

Imai N., Titin J., Kita S., Ong R.C., Kitayama K. Co-benefits of sustainable forest management for carbon sequestration. Co-benefits of Sustainable Forestry. Ecological Research Monographs. Springer – Tokyo, 2012. P. 129–148. DOI: 10.1007/978-4-431-54141-7_7.

Khlebnikova T.A., Opritova O.A. Experimental studies of the dense digital model accuracy by using unmanned aerial system. Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT), 2018. V. 23. No. 2. P. 119–129 (in Russian). DOI: 10.33764/2618-981X-2019-4-2-213-220.

Kolobov A.N., Frisman E.Ya. Individual-based model of spatio-temporal dynamics of mixed forest stands. Ecological Complexity, 2016. V. 27. P. 29–39. DOI: 10.1016/j.ecocom.2015.10.002.

Korznikov K.A., Belyaeva N.G., Sandlersky R.B. Modeling the forest cover of the Vengeri River Basin on the Sakhalin Island using the remote sensing data. Russian Journal of Forest Science, 2020. No. 5. P. 399–411 (in Russian). DOI: 10.31857/S002411482005006X.

Kravtsova V.I. Space mapping methods: a textbook for universities. Moscow: Moscow University Press, 1995. 239 p. (in Russian).

Krestov P.V., Barkalov V.Yu., Taran A.A. Botanical and geographical zoning of Sakhalin Island. Flora and fauna of Sakhalin Island: Proceedings of the International Sakhalin project. V. 1. Vladivostok: Dalnauka, 2004. P. 67–92 (in Russian). Web resource: https://www.researchgate.net/publication/267452843_Botaniko-geograficeskoe_rajonirovanie_ostrova_Sahalin (accessed 25.01.2023).

Kuzmichev E.P., Trushina I.G., Lopatin E.V. Volumes of illegal forest logging in Russian Federation. Forestry Information: Electronic Online Magazine, 2018. No. 1. P. 63–77 (in Russian). DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2018.1.06.

Lobishcheva I.I., Melkiy V.A. Assessment of environmental situation and problems of biodiversity conservation in the reserve Makarovsky (Sakhalin Island). Tomsk State University Journal, 2010. No. 339. P. 201–204 (in Russian).

Marconi S., Chiti T., Nolè A., Valentini R., Collalti A. The role of respiration in estimation of net carbon cycle: coupling soil carbon dynamics and canopy turnover in a novel version of 3D-CMCC forest ecosystem model. Forests, 2017. V. 8. No. 6. ID 220. DOI: 10.3390/f8060220.

Markova O.I., Tikunov V.S. New technologies for modern geoinformatics. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2022. V. 28. Part 1. P. 5–34 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-5-34.

Myers S.L. China's voracious appetite for timber stokes fury in Russia and beyond. The New York Times, 2019. 10 April. Section A. P. 4. Web resource: https://www.nytimes.com/2019/04/09/world/asia/chinas-voracious-appetite-for-timber-stokes-fury-in-russia-and-beyond.html (accessed 25.01.2023).

Sabirov R.N., Sabirova N.D. Forest fires in the Northern regions of Sakhalin. Journal of the Sakhalin Museum, 2013. V. 20. No. 1. P. 235–244 (in Russian). Web resource: https://elibrary.ru/download/elibrary_36684746_36763741.pdf (accessed 25.01.2023).

Sabirov R.N., Sabirova N.D., Melkiy V.A., Belyanina Ya.P., Kartushina E.A. Flora of the Sakhalin nature reserve "Makarovsky". Journal of the Sakhalin Museum, 2009. No. 16. P. 302–318 (in Russian). Web resource: https://elibrary.ru/download/elibrary_36684097_72675301.pdf (accessed 25.01.2023).

Shahtahmassebi A., Yang N., Wang K., Moore N., Shen Z. Review of shadow detection and de-shadowing methods in remote sensing. Chinese Geographical Science, 2013. V. 23. No. 4. P. 403–420. DOI: 10.1007/s11769-013-0613-x.

Tikunov V.S., Tsapuk D.A. Sustainable development of territories: cartographic and geoinformation support. Moscow – Smolensk: Publishing House of Smolensk State University, 1999. 176 p.

Verkhoturov A.A. Analysis of changes in the State of ecosystems on Atlasova Island (Kuril Islands). Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT), 2020. V. 25. No. 3. P. 139–150 (in Russian). DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-139-150.

Verkhoturov A.A., Melkiy V.A. Mapping of vegetation communities of the subzone of dark coniferous forests of the South Sakhalin based on space surveys. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2020. V. 26 No. 4. P. 60–72 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2020-4-26-60-72.

УДК: 911.2 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-406-422**

А.Д. Китов[1], **В.М. Плюснин**[2]

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ДИНАМИКА ОТДЕЛЬНЫХ ЛЕДНИКОВ МАССИВА МУНКУ-САРДЫК (ВОСТОЧНЫЙ САЯН) И ХРЕБТА ЦАСТ-УЛА (МОНГОЛЬСКИЙ АЛТАЙ)

АННОТАЦИЯ

Продолжая исследования современного оледенения на примере отдельных горных массивов внутриконтинентальной части Азии вдоль широтного трансекта от гор Кодара до Гималаев, в данной работе рассмотрен хребет Цаст-Ула в Монгольском Алтае. Эти ледники, как объекты трансекта, представляют его западную часть. Ледники северо-западной Монголии исследуются гляциологами, хотя и не столь подробно, как ледники центральной части Алтая и Тянь-Шаня. Интерес представляет рассмотрение их динамики в сравнении с другими ледниковыми массивами трансекта. В Восточном Саяне наиболее изучены (более 100 лет) нивально-гляциальные объекты хребта Мунку-Сардык. В данной работе рассмотрены изменения ледников при главных вершинах горного массива Мунку-Сардык и хребта Цаст-Ула. На всем протяжении трансекта наблюдается сокращение ледников и повышение интенсивности бронирования поверхностными моренами. Бронирование моренами нижней части маленьких ледников Цаст-Ула происходит аналогично ледникам Мунку-Сардык. По данным дистанционного зондирования Земли (Landsat) выполнено сравнение динамики как всего массива, так и отдельных ледников № 7, 8 Цаст-Ула и ледников № 31 (Перетолчина) и № 30 (Радде), которое показывает, что ледники сокращаются в разной степени. С середины 1970-х гг. ледник № 7 сократился по площади на 19 %, в длину примерно на 5 %, № 8 — соответственно на 58 % и 31 %. Уменьшение по площади всего массива Цамбагарав в среднем проходило со скоростью 0,31 км^2/г. Ледники Цаст-Ула сокращались неравномерно со средней скоростью 0,32 км^2/г., потеряв 22 % своей площади. Ледники массива Мунку-Сардык сокращаются примерно в 4 раза медленнее. Ледник Перетолчина за последние 20 лет сокращался по площади со скоростью 0,005 км^2/г., а за весь период наблюдения с 1900 г. — 0,004 км^2/г. По длине за этот же период ледник сокращался со скоростью 5 м/г. Открытая часть ледника Перетолчина от конечной морены стадии окончания малого ледникового периода уменьшилась как по площади, так и длине примерно в 2 раза. Выявлены аномальные изменения у рассматриваемых ледников в 2013–2015 гг., как для хребта Цаст-Ула, так и для Мунку-Сардыка. К 2013–2014 гг. наблюдалось увеличение площади открытой части ледников и площади многолетних снежников и резкое сокращение после 2015 г., в некоторых случаях в виде схода частей ледников.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Восточный Саян, Монгольский Алтай, ледник, дистанционные исследования, трансект

[1] Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, д. 1, Иркутск, Россия, 664033, *e-mail:* **kitov@irigs.irk.ru**

[2] Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, д. 1, Иркутск, Россия, 664033, *e-mail:* **plyusnin@irigs.irk.ru**

Aleksandr D. Kitov[1], **Viktor M. Plyusnin**[2]

COMPARATIVE DYNAMICS OF INDIVIDUAL GLACIERS OF THE MUNKU-SARDYK MASSIF (EASTERN SAYAN) AND THE TZAST-ULA RIDGE (MONGOLIAN ALTAI)

ABSTRACT

Continuing the study of modern glaciation on the example of individual mountain ranges of the inland part of Asia along the latitudinal transect from the Kodar Mountains to the Himalayas, this work considers the Tzast-Ula massif in the Mongolian Altai. These glaciers, as objects of the transect, represent its western part. The glaciers of northwestern Mongolia are studied by glaciologists, although not as detailed as the glaciers of the central part of Altai and the Tien Shan. It is interesting to consider their dynamics in comparison with other glacial massifs of the transect. In the Eastern Sayan, the most studied (more than 100 years) are the nival-glacial objects of the Munku-Sardyk range. In this paper, changes in glaciers at the main peaks of the Munku-Sardyk mountain range and the Tzast-Ula ridge are considered. Throughout the transect there is a reduction in glaciers and an increase in the intensity of armor by surface moraines. Moraine reservation of the lower part of the small glaciers of Tzast-Ula occurs, similar to the glaciers of Munku-Sardyk. According to the remote sensing data (Landsat), a comparison of the dynamics of both the entire massif and individual glaciers No. 7, 8 Tzast-Ula and glaciers No. 31 (Peretolchina) and No. 30 (Radde) was made, which shows that glaciers are shrinking to varying degrees. Since the mid-1970s, Glacier No. 7 has shrunk in area by 19 %, in length by about 5 %, No. 8 by 58 % and 31 %, respectively. The decrease in the area of the entire Tsambaragav massif on average took place at a speed of 0.31 km^2/year. The glaciers of Tzast-Ula were shrinking unevenly at an average speed of 0.32 km^2/year, losing 22 % of their area. The glaciers of the Munku-Sardyk massif are shrinking about 4 times slower. Over the past 20 years, the Peretolchina glacier has been shrinking in area at a rate of 0.005 km^2/year, and for the entire observation period since 1900 — 0.004 km^2/year. In length, during the same period, the glacier was shrinking at a rate of 5 m/year. The open part of the Peretolchina glacier from the final moraine of the end stage of the Little Ice Age decreased both in area and length by about half. Anomalous changes were detected in the glaciers under consideration in 2013–2015, both for the Tzast-Ula ridge and for Munku-Sardyk. By 2013–2014, there was an increase in the area of the open part of glaciers and the area of perennial snowfields and a sharp decrease after 2015, in some cases in the form of a descent of parts of glaciers.

KEYWORDS: East Sayan, Mongolian Altai, glacier, remote research, transect

ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата находит отражение в динамике ледников. Особенно чувствительны малые горные ледники [IPCC, 2007, 2021]. В результате потепления происходит сокращение ледников. Сокращаются как большие долинные ледники, так и малые каровые, однако малые ледники более чувствительны к изменению климата. Выявление закономерностей колебания малых ледников внутриконтинентальных горных систем с реакцией крупных ледников на изменение климата — фундаментальная задача географических исследований. Нами рассматривается динамика ледников в пределах

[1] V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 1, Ulan-Batorskaya str., Irkutsk, 664033, Russia, *e-mail:* **kitov@irigs.irk.ru**

[2] V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 1, Ulan-Batorskaya str., Irkutsk, 664033, Russia, *e-mail:* **plyusnin@irigs.irk.ru**

трансекта от горных массивов Прибайкалья до гор Тянь-Шаня и Гималаев [*Китов* и др., 2019]. По мере наращивания групп спутников дистанционного зондирования появляется возможность более детальной и регулярной инвентаризации ледников с применением программных комплексов ГИС (географическая информационная система) с последующим составлением и обновлением электронных каталогов ледников [*Gao, Liu,* 2001; *Owen* et al., 2009; RGI Consortium, 2017]. Некоторые спутниковые системы поставляют данные с 1970-х гг. прошлого века. Такими общедоступными данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются снимки космического аппарата Landsat. Площадь открытой части ледника представляется наиболее чувствительным показателем его изменения. Границы открытой части ледника обычно хорошо дешифрируются по данным Landsat. В данной работе рассматривается динамика ледников по названной характеристике с использованием данных ДЗЗ с периодичностью около 5 лет.

В качестве ключевого участка для сравнительной динамики с другими массивами современного оледенения выбраны ледники хр. Мунку-Сардык (Восточный Саян) [Каталог, 1973; *Осипов* и др., 2017; *Kitov* et al., 2009]. Сравниваемые ледники сосредоточены в его наиболее высокой юго-восточной части — это наиболее изученные (более 100 лет) ледники Перетолчина и Радде под наивысшей вершиной Мунку-Сардык (3491 м н. у. м.), которая находится на границе России и Монголии (рис. 1) [*Перетолчин,* 1908]. По результатам мониторинга составлены базы данных (БД) ледников Прибайкалья [*Китов* и др., 2017]. Ледники Мунку-Сардыка сравнивались с некоторыми ледниками Восточного Тянь-Шаня, Гималаев [*Китов* и др., 2019]. Были выявлены корреляции в динамике ледника Азаровой (Кодар) и ледника Кхумбу (Непал). Это требует дополнительных исследований в других горных массивах.

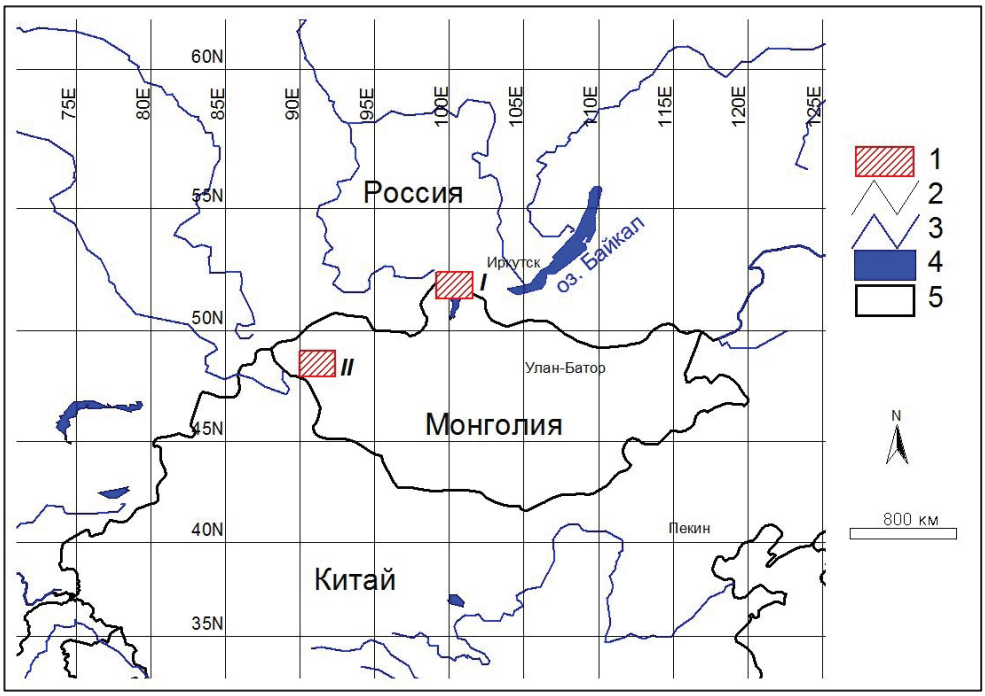


Рис. 1. Общий вид расположения участков трансекта: 1) ключевые участки (районы исследования): I — хребет Мунку-Сардык (Восточный Саян); II — массив Цамбагарав (Монгольский Алтай); 2) координатная сетка; 3) реки; 4) озера; 5) государственные границы
Fig. 1. General view of the transect areas: 1) area of study: I — Munku-Sardyk Ridge (Eastern Sayan); II — Tzambaragav massif (Mongolian Altai); 2) coordinate grid; 3) rivers; 4) lakes; 5) state borders

Д.А. Ганюшкиным с соавторами [2016], а также Д. Отгонбояр [2012] был изучен массив Цамбагарав на северо-западе Монголии, попадающий в западную окраину рассматриваемого трансекта.

Целью исследования является сравнение ледников Перетолчина и Радде северной экспозиции хр. Мунку-Сардык в Восточном Саяне (рис. 1, ключевой участок I; рис. 2а), ежегодный наземный мониторинг которых ведется с 2002 г., с ледниками хр. Цаст-Ула в Монгольском Алтае (рис. 1, ключевой участок II; рис. 2б) № 7 (один из наибольших) северной экспозиции, стекающий с главной вершины г. Цаст-Ула, 4208 м н. у. м., и № 8, сопоставимый по размеру с ледниками Мунку-Сардыка. Динамика ледников по площади их открытой части сравнивалась с учетом небольшой облачности, сезонной представительности ледников (на момент конца абляции) и с периодичностью около 5 лет.

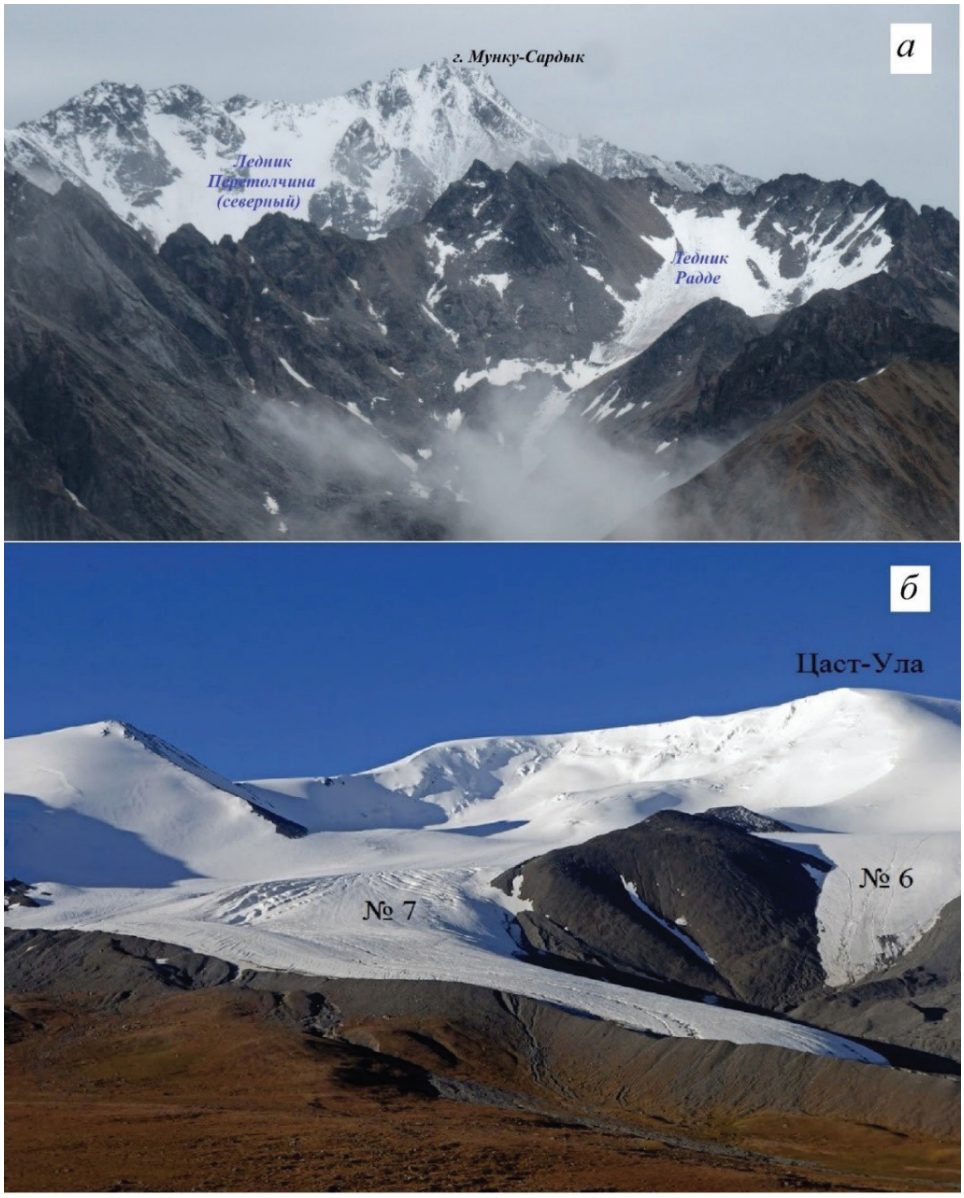


Рис. 2. Вид на ледники хр. Мунку-Сардык (а), фото автора, авг. 2022 г., и хр. Цаст-Ула (б), фото Roger Nix, авг. 2014 г.
Fig. 2. View of the glaciers of the Munku-Sardyk Range (a), photo by the author, Aug. 2022, and of the Tsast-Ula Range (b), photo by Roger Nix, Aug. 2014

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Инвентаризация состояния ледников Мунку-Сардыка в разные годы выполнялась с использованием схемы С.П. Перетолчина [1908], данных каталога ледников СССР [1973], топографических карт, разномасштабных данных ДЗЗ, полученных со спутников Quick Bird, Pleiades, Landsat 4, 5, 7, 8. Картографирование и отслеживание динамики ледников Цаст-Ула выполнялись по данные Landsat 2, 5, 7, 8, 9 с сайта Геологической службы США с 1977 по 2022 гг. (табл. 1). Использовались международные базы данных GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space), RGI (Randolph Glacier Inventory) и GAMDAM (Glacier Area Mapping for Discharge from the Asian Mountains) для сравнения с результатами других исследований.

Табл. 1. Список кадров Landsat на территорию хребта Цаст-Ула
Table 1. Landsat frame list on the territory of the Tzast-Ula Range

Дата съемки	Кадр Landsat	Пространственное разрешение, м	Облачность (%) и качество
13.08.1977	LM02_L1TP_153026	60	1 %, хороший
30.08.1987	LT05_L1TP_142026	30	40 %, удовлетворительный
31.07.1988	LT05_L1TP_142026	30	49 %, удовлетворительный
03.08.1989	LT05_L1TP_142026	30	9 %, хороший
22.08.1990	LT05_L1TP_142026	30	3 %, хороший
17.08.1994	LT05_L1TP_142026	30	14 %, хороший
04.08.1995	LT05_L1TP_142026	30	7 %, хороший
04.08.2001	LT05_L1TP_142026	30	17 %, хороший
07.08.2002	LT05_L1TP_142026	30	10 %, хороший
15.08.2005	LT05_L1TP_142026	30	1 %, хороший
16.08.2005	LE07_L1TP_141026	15	0 %, полосы
10.08.2009	LT05_L1TP_142026	15	49 %, хороший
02.08.2009	LE07_L1TP_142026	15	15 %, полосы
14.08.2010	LE07_L1TP_141026	15	1 %, полосы
16.08.2011	LT05_L1TP_142026	15	3 %, хороший
06.08.2013	LE07_L1TP_141026	15	28 %, удовлетворительный
21.08.2013	LC08_L1TP_142026	15	2 %, хороший
22.08.2013	LE07_L1TP_141026	15	1 %, полосы
30.08.2013	LC08_L1TP_141026	15	10 %, хороший
16.08.2014	LE07_L1TP_142026	15	19 %, полосы
24.08.2014	LC08_L1TP_142026	15	8 %, удовлетворительный
04.08.2015	LC08_L1TP_141026	15	3 %, хороший
12.08.2015	LE07_L1TP_142026	15	8 %, полосы
27.08.2015	LC08_L1TP_142026	15	21 %, хороший
30.07.2019	LC08_L1TP_141026	15	11 %, хороший
01.08.2020	LC08_L1TP_141026	15	10 %, удовлетворительный
15.08.2022	LC09_L1TP_141026	15	1 %, хороший

Границы и площадь наиболее раннего состояния массива определялись по безоблачному снимку 1977 г. Оптимальное временное окно, когда можно определить состояние ледника в году, всего около 20–25 дней — примерно с 1-х до 20-х чисел августа. Периодичность съемки спутника Landsat — полмесяца. В отдельные годы в близкие даты съемка выполнялась разными спутниками — например, Landsat 5 и 7 или Landsat 7 и 8; поэтому (с учетом облачности) приходилось иногда выделять границу ледника по

комбинации кадров разных близких дат съемки данного года или соседних лет. Для улучшения видимости при дешифрировании использовались преобразования исходного растра типа Histogram equalize, Standard deviations, Gaussian и др.

Космические снимки были приведены к единой проекции WGS-84, UTM-зона 47 (Мунку-Сардык) и 46 (Цаст-Ула). Дешифрирование и векторизация границ объектов проводились в ручном режиме RGB-синтезированных снимков каналы 4-5-7 для Landsat 2, каналы 2-4-7 для Landsat 5 и 7 и 3-5-7 для Landsat 8 и 9 с улучшением до 15 м по каналу 8 (для Landsat 7, 8, 9). Это преобразование выполнялось в программе ENVI (Layer stacking, Gram-Schmidt Pan Sharpening). В некоторых случаях для уточнения границ ледника использовались и другие спектральные каналы данных Landsat. Все измерения выполнялись в ГИС-программе ArcViewGIS-3.2a. При выделении границ ледника учитывались рекомендации Международного проекта GLIMS [*Rau* et al., 2005; *Hartman,* 2006; *Raup, Khalsa,* 2010; *Paul* et al., 2013; 2017; RGI Consortium, 2017]. Погрешность определялась как произведение протяженности границы ледника (периметра) на разрешающую способность снимка. Ошибка *dS* в процентах определялась по формуле: $dS = Sp / S * 100$, где S — площадь ледника; Sp — площадь границы ледника с учетом размера пикселя. Учитывая пространственное разрешение снимка Landsat 7, 8, 9 в 15 м/пикс погрешность определения площади ледника оценивается в 0,12 км^2 или 5−8 % от измеряемой величины. Для снимков Landsat 2, 5 с разрешением 60 и 30 м/пиксель точность определения площади порядка 10–20 %.

Нами была выбрана более детальная схема и нумерация ледников, предложенная Д.А. Ганюшкиным с соавторами [2016] (рис. 3а), что позволяет сопоставлять данные всех 21 ледников. Нумерация начинается с западного края хребта. Схема хр. Цаст-Ула с другой нумерацией (с восточного края) только 15-ти ледников предложена Д. Отгонбаяр [2012] (рис. 3б); она отражает состояние ледников на 2008 г. Ледники хр. Цаст-Ула в международном формате WGI (World Glacier Inventory) вошли в БД GLIMS и RGI, где границы ледников хранятся в формате shp-файлов (совместим с форматом данных нашего ГИС-проекта). Выделение границ ледников для указанных БД выполнялось автоматически по данным ДЗЗ ASTER[1].

Границы ледников в этих БД более генерализованные. Эти ледники мы пронумеровали аналогично схеме Д. Отгонбаяр (рис. 3в). Контуры сравниваемых ледников Мунку-Сардык по данным БД GLIMS и выделенных нами по данным Landsat примерно на это же время представлены на рис. 3г. Разработчики проекта GAMDAM утверждают, что инвентаризация ледников по их методу точнее [*Nuimura* et al., 2015; *Sakai*, 2019]. Схема ледников по этой инвентаризации на 2002 г. схожа со схемой RGI и Д. Отгонбаяр (рис. 3б, 3в).

Сравнение разных методов выделения границ ледников (автоматических и визуальных) по безоблачным снимкам, не имеющих крутых затененных склонов, показывает достаточно близкие результаты с ошибкой 2–5 % [*Gao*, *Liu*, 2001; *Paul* et al., 2013; 2017]. Автоматический метод эффективен для большого количества ледников и требует последующего ручного редактирования. Нами был выбран ручной метод дешифрирования с ориентацией на границы, выделенные Д.А. Ганюшкиным по данным Landsat 2015 г. как реперные. Дешифрирование производилось с наиболее раннего снимка 1977 г. Результаты дешифрирования в ГИС-проекте копировались как полигональная тема для следующего года (в нашем случае для 1989 г.) и редактировалась по соответствующей подложке — снимку 1989 г.; затем процедура повторялась для 1995 г. и т. д. Такой подход позволяет сосредоточится на изменениях края ледника. В сомнительных случаях результаты векторизации обсуждались с соавтором (моделировалось двойное дешифрирование).

[1] Glims Glacier Database. Электронный ресурс: http://glims.colorado.edu/glacierdata/ (дата обращения 15.02.2023).

Аналогично дешифрировались ледники хр. Муку-Сардык. Дополнительно использовались характеристики ледников из БД Института географии РАН[1] [*Хромова* и др., 2021] и электронных международных БД, в т. ч. GLIMS, RGI и GAMDAM. Идентификаторы WGI SU5B16201031 и SU5B16201030 ледников Перетолчина и Радде аналогичны кодам в каталоге ледников СССР [Каталог, 1973] (рис. 3г).

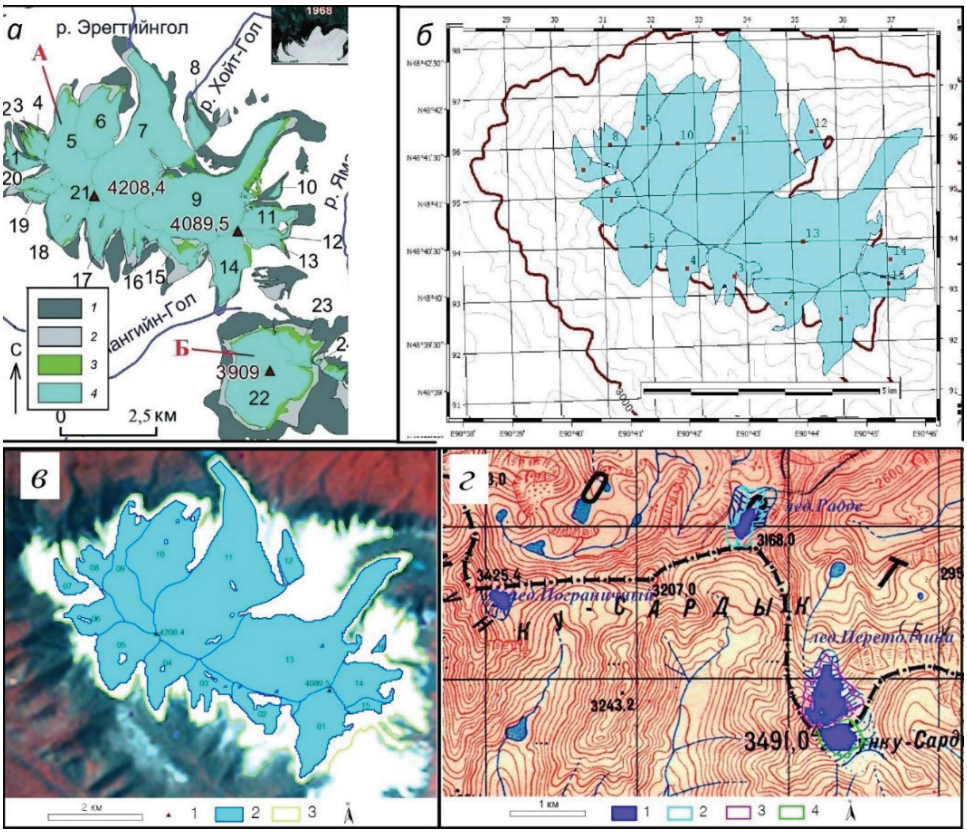


Рис. 3. Массив Цамбагарав, хребет Цаст-Ула: а) основная схема ледников Цаст-Ула (2015 г.), 1–21 номера ледников [*Ганюшкин* и др., 2016]; *б) генерализованная схема Цаст-Ула (2008 г.), 1–15 номера ледников* [*Отгонбаяр*, 2012]; *в) границы ледников Цаст-Ула из БД GLIMS (2013 г.): 1 — вершины, 2 — ледники, 3 — граница массива по данным Landsat, фон — данные Landsat 13.08.1977 г.; г) ледники Мунку-Сардык: 1 — БД GLIMS (по данным ASTER 20.08.2002 г., ледники: Пограничный, Радде, Перетолчина — северный и южный), 2–4 — границы ледников Радде, Перетолчина (северный), Перетолчина (южный) соответственно по данным Landsat 7 13.08.2000 г.; фон — фрагмент топографической карты 1960-х гг.*

Fig. 3. Massif Tzambagarav, the Tzast-Ula Range: a) the main scheme of the Tzast-Ula glaciers (2015), 1–21 numbers of glaciers [Ganyushkin et al., 2016]; b) the generalized scheme of Tzast-Ula (2008), 1–15 numbers of glaciers [Otgonbayar, 2012]; c) boundaries of Tzast-Ula glaciers from the GLIMS database (2013): 1 — peaks, 2 — glaciers, 3 — boundary of the array according to Landsat data, background — Landsat data on 13.08.1977; d) glaciers Munku-Sardyk: 1 — DB GLIMS (submitted by ASTER on 20.08.2002, glaciers: Pogranichnyi, Radde, Peretolchina — northern and southern), 2–4 — boundaries of glaciers Radde, Peretolchina (northern), Peretolchina (southern), respectively, according to Landsat 7 on 13.08.2000; background is a fragment of the topographic map 1960

[1] Каталог Ледников России, Отдел гляциологии Института географии РАН. Электронные ресурсы: https://www.glacru.ru, http://glac.igras.ru/ (дата обращения 01.02.2023).

Схема С.П. Перетолчина [1908] недостаточно точна, поэтому нами была выполнена реконструкция ледников хребта Мунку-Сардык по конечным моренам, хорошо дешифрируемым по данным высокого разрешения (0,6 м/пикс) Quick Bird. В ГИС-проекте эта схема была привязана (функция rectification) к космоснимку по характерным выступам скал у низа и верха ледника Перетолчина. Использовались также GPS-треки гребней боковых и конечных морен и отмеченные еще С.П. Перетолчиным большие камни для наземной съемки. После этого выполнена векторизация границ ледника. Дополнительно для уточнения границ сопоставлялись наземные фотоснимки, сделанные С.П. Перетолчиным и авторские фотоснимки современного состояния.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате ГИС-анализа оценивалась площадь открытой части всего массива ледников (табл. 2), где Year — год получения данных; *S* — площадь ледника в км^2; *dS* — точность определения площади ледника с учетом пространственного разрешения исходных данных в процентах; VSY — скорость изменения площади ледника км^2/г.; Data — вид исходных данных (Landsat-N соответствующие данные со спутника Landsat).

Табл. 2. Изменение площади открытой части ледников хребта Цаст-Ула
Table 2. Change in the area of the open part of the glaciers of the Tzast-Ula Range

Year	*S*, km^2	*dS*, %	VSY	Data
1977	32,65	9,69		Landsat-2
1989	23,42	7,02	-0,77	Landsat-5
1995	23,19	6,91	-0,04	Landsat-5
2001	21,62	7,07	-0,26	Landsat-5
2005	21,81	7,62	0,05	Landsat-5
2011	19,86	4,45	-0,33	Landsat-7
2013	21,26	3,54	0,63	Landsat-7
2014	20,07	4,09	-1,05	Landsat-8
2015	19,23	4,50	-0,84	Landsat-8
2020	19,51	4,10	0,06	Landsat-8
2022	18,16	4,93	-0,67	Landsat-9

Между 1970-ми и 2000-ми гг. в Центральной Азии наблюдался повышенный отрицательный баланс массы ледников [WGMS, 2021], при этом отмечается общее отступание ледников за XX столетие с отдельными наступаниями около 1970-х гг. [*Котляков* и др., 2017; *Su*, *Shi*, 2002].

Как видно из табл. 2, скорость сокращения площади открытой части ледников неравномерна, наблюдается периодичность (7–11 лет) замедления скорости сокращения. Так, скорость уменьшилась к 1995 г., площадь незначительно увеличилась к 2005, 2013 и 2020 гг. относительно предыдущих лет. Заметна аномалия, наблюдаемая нами в 2013–2015 гг., к 2013 г. площадь открытой части увеличилась, а к 2015 г. резко сократилась (рис. 4).

По сравнению с ледниками хр. Мунку-Сардык, сократившимися по площади и длине открытой части (от конечной морены, до которой в 1900 г. доходил низ ледника [*Перетолчин*, 1908]) в 2 р., ледники Цаст-Ула сократились меньше. За последние 30 лет общая площадь ледников уменьшилась с 23,4 до 18,2 км^2 — на 22 %. За это же время ледники № 7 и 8 сократились в длину соответственно на 141 и 251 м (3 и 18 %), а по площади — на 13 и 36 %. Как видно — большой ледник более устойчив, чем маленький.

Изменения ледников № 7 и 8 Цаст-Ула представлены на рисунке 5 и в таблице 3, где Year — год получения данных; *S* — площадь ледника в км^2; VSY — скорость изменения площади ледника в км^2/г.; *L* — длина ледника в м; VLY — скорость изменения длины, м/г., G2013 — характеристики ледников из БД GLIMS по автоматическому дешифрированию данным ASTER 06.09.2013; D2002 — из БД GAMDAM по данным Landsat 14.07.2002 г.

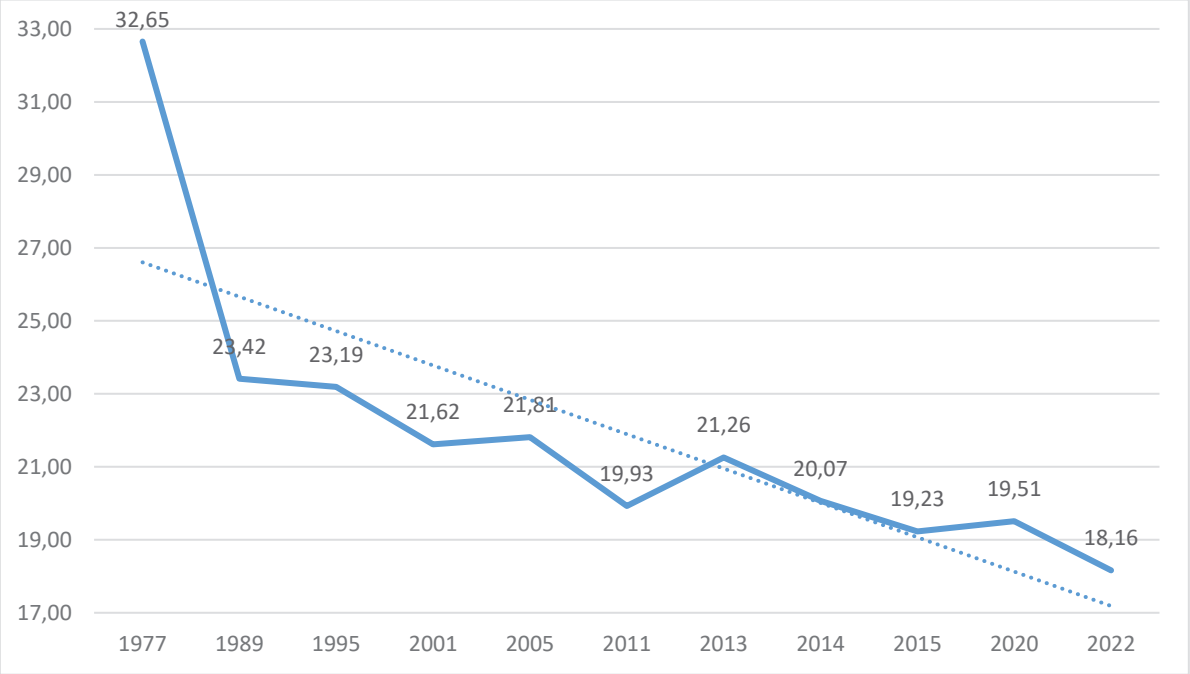


Рис. 4. Изменение площади (км^2) открытой части ледников Цаст-Ула по результатам дешифрирования данных Landsat с 1977 по 2022 гг. Пунктирная линия — тренд изменения площади

Fig. 4. Change in the area (km^2) of the open part of the Tzast-Ula glaciers based on the results of interpretation of Landsat data from 1977 to 2022. The dotted line is the trend of changes in the area

Табл. 3. Изменение площади и длины ледников Цаст-Ула № 7 и 8
Table 3. Change of area and length of Tsast-Ula glaciers No. 7 and 8

Year	*S*, km^2	VSY	*L*, m	VLY
Ледник № 7				
1977	5,71		4603	
1989	5,30	-0,034	4512	-7,62
2001	5,01	-0,024	4487	-2,12
2013	5,01	0,000	4464	-1,85
2015	4,72	-0,145	4423	-20,84
2022	4,61	-0,016	4377	-6,45
G2013	4,99		4653	
D2002	5,13			

Year	*S*, km^2	VSY	*L*, m	VLY
Ледник № 8				
1977	0,80		1654	
1989	0,52	-0,024	1394	-21,64
2001	0,44	-0,007	1307	-7,29
2013	0,43	0,000	1242	-5,40
2015	0,38	-0,025	1217	-12,75
2022	0,33	-0,007	1143	-10,49
G2013	0,35		1217	
D2002	0,4			

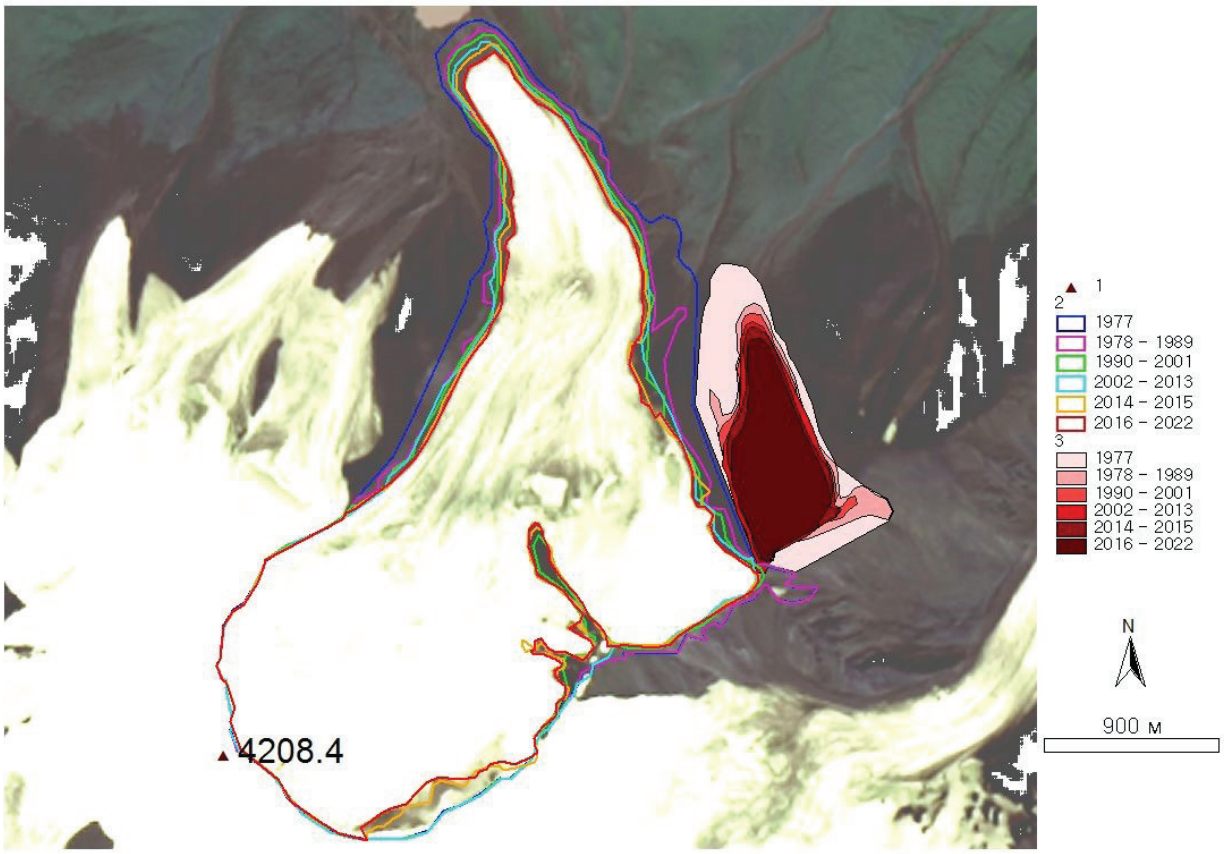


Рис. 5. Изменения ледников Цаст-Ула в 1977–2022 гг.: 1 — вершина; 2 — динамика ледника № 7; 3 — динамика ледника № 8. Фон — космоснимок Landsat-9 15.08.2022 г., синтез каналов 3, 5, 7

Fig. 5. Changes in the glaciers of Tzast-Ula in 1977–2022: 1 — the top; 2 — dynamics of glacier No. 7; 3 — dynamics of glacier No. 8. Background — Landsat-9 satellite image 15.08.2022, synthesis of channels 3, 5, 7

В хребте Мунку-Сардык — 4 ледника: Перетолчина северный и южный, Радде и Пограничный. Ледники Перетолчина северный и Радде расположены на Российской территории в каре северной экспозиции, ледники Пограничный и Перетолчина южный — на Монгольской, в каре юго-юго-восточной экспозиции [*Перетолчин*, 1908; *Kitov* et al., 2009]. По данным Landsat изменение ледников хр. Мунку-Сардык (табл. 4) имеет схожий характер с ледниками хр. Цаст-Ула.

В таблице в дополнение к нашим данным добавлены результаты инвентаризации GLIMS (по 2002 г. — G2002), GAMDAM (по 2007 г. — D2007) и ИГ РАН (по 2019 г. — I2019). Данные БД ИГ РАН близки к нашим результатам, но данные GLIMS и GAMDAM занижены, т. к. выделение границ осуществлялось автоматическим методом. Подобный эффект отмечается в специальных исследованиях [*Paul* et al., 2013; 2017]. Различия в определении площади автоматическим и ручным методом для больших ледников менее выражены (табл. 3) [*Takenaka* et al., 2015].

Характеристики на 1900 г. даны по результатам реконструкции (описано выше). По фотоснимкам С.П. Перетолчина видно, что вся площадь ледника — это и открытая его часть. Площадь открытой части ледника Перетолчина (северный) составила 0,83 км^2, а длина — 1,47 км. С.П. Перетолчин определил площадь северного ледника — 0,68 км^2. По топографическим картам 1960-х гг. площадь ледника составляла 0,49 км^2. В настоящее

время площадь открытой части — 0,27 км^2. Скорость сокращения ледника за все 120 лет наблюдения составляет по площади — 0,004 км^2/г., а ледник Радде — 0,003 км^2/г. Весь массив ледников Мунку-Сардыка сокращался со скоростью 0,05 км^2/г. Ледник № 7 Цаст-Ула за последние 45 лет сокращался со скоростью 0,02 км^2/г. Ледник Перетолчина сокращается в 4 р. медленнее ледников Цаст-Ула. В первые 50 лет прошлого столетия сокращение ледника Перетолчина было еще медленнее — 0,002 км^2/г. За последние 60 лет весь массив ледников по площади сократился на 50 %, а за 120 лет — на 72 %. У ледников Мунку-Сардыка происходит интенсивное бронирование поверхностными моренами, особенно у ледника Радде. На больших ледниках Цаст-Ула такое явление практически не наблюдается. Бронирование можно заметить по данным ДЗЗ на небольшом леднике № 8, который и сократился существеннее ледника № 7. Динамика ледников Мунку-Сардыка в 2013–2015 гг. аналогична динамике в горах Цаст-Ула. Отмечается повышение суммы осадков в Восточном Саяне с 2010 г. [*Осипов* и др., 2017; *Khromova* et al., 2019], а в аномальные годы наблюдаются изменения в метеорологических показателях (рис. 6).

Табл. 4. Изменение площади ледников хребта Мунку-Сардык по данным Landsat, км^2
Table 4. Change in the area of glaciers of the Munku-Sardyk range according to Landsat, km^2

Год	Пограничный	Радде	Перетолчина северный	Перетолчина южный	Все ледники	VSY
1900	0,4	0,48	0,83	0,63	2,34	
1960	0,15	0,3	0,49	0,35	1,29	-0,0175
2000	0,12	0,19	0,42	0,20	0,93	-0,009
2006	0,09	0,19	0,37	0,16	0,81	-0,02
2014	0,14	0,20	0,39	0,18	0,91	0,0125
2015	0,07	0,10	0,30	0,11	0,58	-0,33
2018	0,06	0,10	0,26	0,09	0,51	-0,0233
2022	0,11	0,14	0,27	0,13	0,65	0,035
G2002	0,037	0,045	0,21	0,11	0,402	—
D2007	0,075	0,114	0,283	0,123	0,595	—
I2019		0,08	0,24			—

Основные характеристики ледников, такие как масс-баланс водного эквивалента, представляются в бюллетенях WGMS [1991; 2013; 2015; 2017; 2020; 2021]. Обновляются электронные БД ледников, на которые есть ссылки из Бюллетеня. В новых версиях уточняются параметры и границы ледников, но по данным первоначально сделанной спутниковой съемки. Для Цаст-Ула это съемка ASTER 2013 г., а для массива Мунку-Сардык — 2002 г. По этим данным ледник Пограничный имел площадь 0,037 км^2, Радде — 0,045 км^2, Перетолчина северный — 0,21 км^2, Перетолчина южный — 0,11 км^2. Институт географии РАН обновил электронный вариант БД по данным спутника Sentinel-2 (съемка 27.08.2019 г.). Соответственно площадь ледника Перетолчина северного (Ru10-18.0037) — 0,24 км^2, а Радде (Ru10-18.0038) — 0,08 км^2 (табл. 4). К сожалению, в БД приведены только данные российских ледников, а ледник Пограничный (рис. 3г) перемещен с монгольской стороны на российскую (Ru10-18.0039), его площадь — 0,15 км^2. По советской классификации (SU5B16201029) в каталоге этот ледник значился как погребенный № 29 [Каталог, 1973]. С 2020 г. в БД GLIMS включены данные БД ИГ РАН. Поскольку исходные

данные ДЗЗ для дешифрирования ледников в предыдущей версии БД GLIMS, БД ИГ РАН и БД GAMDAM взяты за разные годы, это уже позволяет отслеживать динамику некоторых ледников по международной БД.

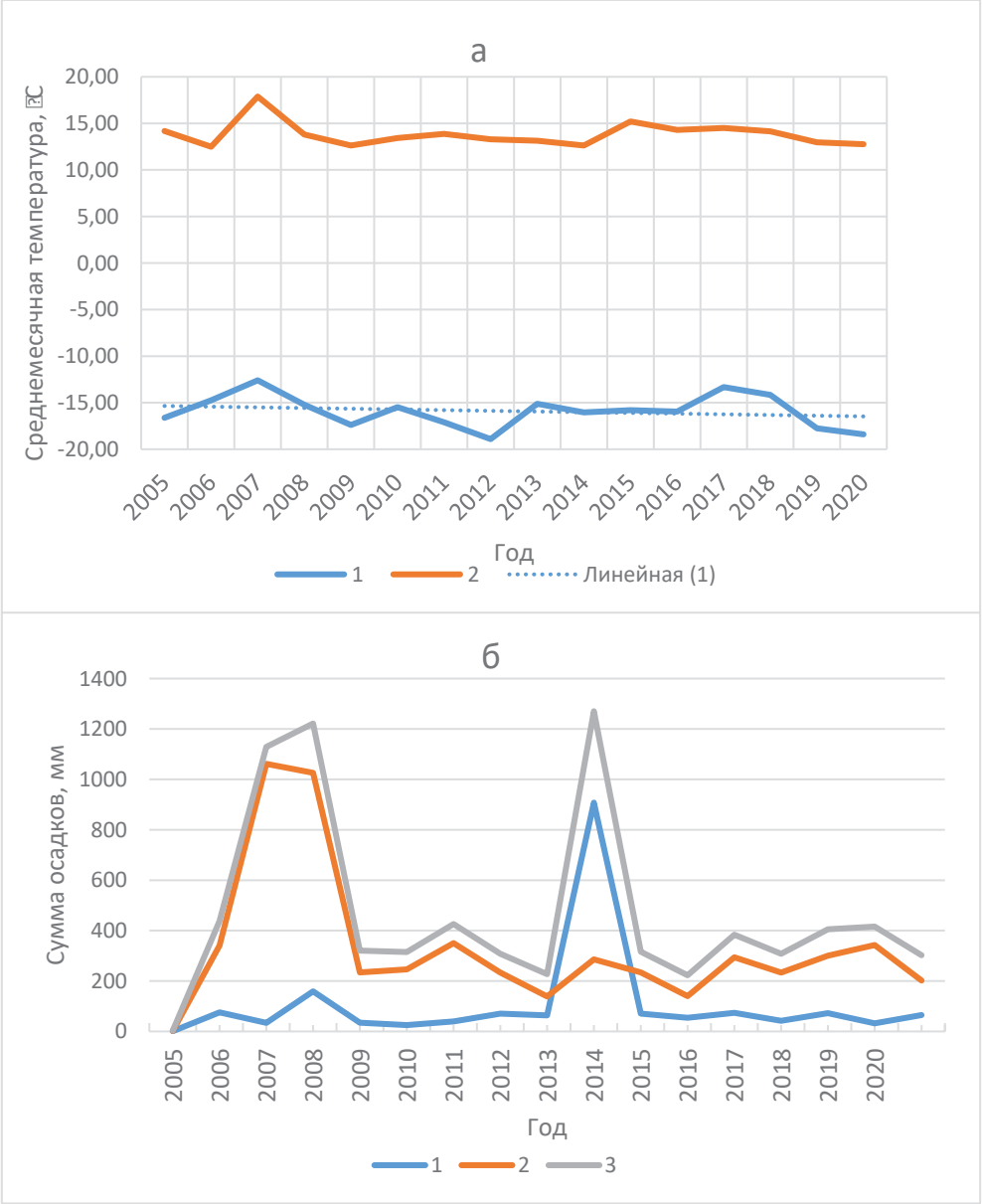


Рис. 6. Климатические характеристики в районе хребта Мунку-Сардык по ближайшей метеостанции Монды, 2005–2020 гг.: а) зимние (1) и летние (2) среднемесячные температуры (соответственно за ноябрь, декабрь, январь, февраль и за июнь, июль, август; пунктирная линия — тренд зимних температур); б) сумма осадков (1 — холодных месяцев: сентябрь − декабрь, январь − март; 2 — теплых: май – август; 3 — за весь год)

Fig. 6. Climatic characteristics in the area of the Munku-Sardyk Range according to nearest the Mondy weather station, 2005–2020: a) winter (1) and summer (2) average monthly temperatures (respectively for November, December, January, February and June, July, August; dotted line — trend of winter temperatures); b) the amount of precipitation (1 — cold months: September – December, January − March; 2 — warm: May – August; 3 — for the whole year)

ВЫВОДЫ

В результате ГИС-анализа данных ДЗЗ выявлены общие тенденции изменения открытой части ледников в горных хребтах Мунку-Сардык в Восточном Саяне и Цаст-Ула в Монгольском Алтае. Выявлены аномальные изменения в период 2013–2015 гг. К 2014 г. во многих горных системах происходило накопление снега в период абляции по сравнению с другими годами в эти же даты. Это выявлено в Гималаях и Тянь-Шане (ледники Лангтанг, Кхумбу, Карлыктаг) [*Китов* и др., 2019]; в Восточном Саяне изменение площади ледников показаны в табл. 4. Подобное явление наблюдалось и в массиве Цамбагарав, хр. Цаст-Ула на примере ледника № 7 и 8 (табл. 3). В 2015 г. скорость сокращения ледников увеличилась, как бы компенсируя предыдущее замедление. По площади ледники постоянно сокращались, к 2011 г. весь массив уменьшился почти до 20 км^2, к 2013 г. увеличился более чем на 1 км^2 (табл. 2). Однако ледник № 7 с 2001 г. сохранил свою площадь, а № 8 немного уменьшился с 0,44 до 0,43 км^2, однако к 2015 г. все ледники сократились до 19,23 км^2, а ледники № 7 и 8 соответственно до 4,72 и 0,38 км^2 (табл. 2, 3). Скорость сокращения в длину у этих ледников увеличилась, причем у большего ледника № 8 в 2 раза сильнее, чем у № 7. В настоящее время (к 2022 г.) ледники Цаст-Ула продолжают сокращаться, но медленнее, а ледники Мунку-Сардыка даже увеличили свою площадь (табл. 4).

Рассматриваемые ледники в хребтах Мунку-Сардык и Цаст-Ула сокращаются, но с различной скоростью. Несомненно, абсолютные величины изменения ледника Цаст-Ула превышают аналогичные величины изменения ледников Мунку-Сардыка, но относительные величины разные. Ледники Перетолчина и Радде сокращаются значительно медленнее, чем Цаст-Ула. Ледники всего массива Цамбагарав сокращаются по 0,31 км^2/г. [*Ганюшкин* и др., 2016]. Вероятно, маленькие каровые ледники, покрываясь интенсивнее поверхностными моренами и оставаясь на крутом склоне верха кара как бы переходят в стадию самосохранения, меньше подвергаются тепловому воздействию. Тем не менее, наблюдаются некоторые схожие процессы динамики ледников в горах Восточного Саяна и Монгольского Алтая.

В докладе по климату [IPCC, 2021; 2022] сообщается, что с 1850 г. по настоящее время средняя континентальная температура выросла на 1,5 °С. Ледники больше всего потеряли в массе с 2010 по 2019 гг. по сравнению с предыдущими десятилетиями наблюдений. С 1900 по 1990 гг. аномалии температуры были с небольшим перевесом положительных температур. Однако в 2009–2011 гг. и в 2013–2014 гг. отмечены существенные отрицательные аномалии, что, вероятно, отразилось на многих ледниках Азии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет средств государственного задания (№ госрегистрации темы: АААА-А21-121012190017-5); при поддержке РФФИ, гранта № 20-05-00253А «Трансформация геосистем Байкальской природной территории».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was performed at the expense of the state task (subject No. AAAA-A21-121012190017-5); supported by the Russian Foundation of Basic Research, grant No20-05-00253A “Transformation of geosystems of the Baikal natural area”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ганюшкин Д.А., Отгонбаяр Д., Чистяков К.В., Кунаева Е.П., Волков И.В. Современное оледенение хребта Цамбагарав (северо-западная Монголия) и его изменение с максимума малого ледникового периода. Лед и снег, 2016. Т. 56. № 4. С. 437–452. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-4-437-452.

Каталог ледников СССР. Т. 16. Вып. 1. Ч. 3–5. Вып. 2. Ч. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 80 с. 64 с.

Китов А.Д., Плюснин В.М., Биличенко И.Н. Изменение ледников в Гималаях и Южной Сибири по данным Landsat. ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2019. Т. 25. Ч. 2. С. 146–160. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-146-160.

Китов А.Д., Плюснин В.М., Иванов Е.Н., Батуев Д.А., Коваленко С.Н. Интернет-представление баз данных ледников юга Восточной Сибири. ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2017. Т. 2(23). С. 228–242. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-2-23-228-242.

Котляков В.М., Чернова Л.П., Муравьев А.Я., Хромова Т.Е., Зверкова Н.М. Изменение горных ледников в Северном и Южном полушариях за последние 160 лет. Лед и Снег, 2017. Т. 57. № 4. С. 453–467. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-453-467.

Осипов Э.Ю., Осипова О.П., Клевцов Е.В. Инвентаризация ледников Восточного Саяна по материалам космических съемок. Лед и Снег, 2017. Т. 57. № 4. С. 483–497. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-483-497.

Отгонбояр Д. Водно-ледниковые ресурсы бессточных районов Западной Монголии: современная оценка и тенденции изменения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. Барнаул: Институт водных и экологических проблем СО РАН, 2012. 24 с.

Перетолчин С.П. Ледники хребта Мунку-Сардык. Известия Томского технического ин-та. Т. 9. Томск: Типолитография Сибирского товарищества печатного дела, 1908. 60 с.

Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф., Муравьев А.Я., Никитин С.А., Лаврентьев И.И. Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.). Лед и Снег, 2021. Т. 61. № 3. С. 341–358. DOI: 10.31857/S2076673421030093.

Gao J., Liu Y. Applications of remote sensing, GIS and GPS in glaciology: A review. Progress in Physical Geography, 2001. V. 25. No. 4. P. 520–540.

Hartman G.M.D. Ice-drainage basin delineation and glacier classification for the arctic ice caps using GIS and GLIMSView software. GLIMS, 2006. 36 p.

IPCC. Climate change 2007. The physical science basis. Contribution of working group 1 to the 4 assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva: IPCC, 2007. 996 p.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis, the Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report on 6 August 2021 during the 14th Session of Working Group I and 54th Session of the IPCC. Geneva: IPCC, 2021. 2337 p.

IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844.

Khromova T., Nosenko G., Nikitin S., Muraviev A., Popova V., Chernova L., Kidyaeva V. Changes in the mountain glaciers of continental Russia during the twentieth to twenty-first centuries. Regional Environmental Change, 2019. V. 19. P. 1229–1247. DOI: 10.1007/s10113-018-1446-z.

Kitov A.D., Kovalenko S.N., Plyusnin V.M. The results of 100-year-long observations of the glacial geosystem dynamics in the Munku-Sardyk massif. Geography and Natural Resources, 2009. V. 30. No. 3. P. 272–278. DOI: 10.1016/j.gnr.2009.09.012.

Nuimura T., Sakai A., Taniguchi K., Nagai H., Lamsal D., Tsutaki S., Kozawa A., Hoshina Y., Takenaka S., Omiya S., Tsunematsu K., Tshering P., Fujita K. The GAMDAM glacier inventory: a quality-controlled inventory of Asian glaciers. The Cryosphere, 2015. V. 9. P. 849–864. DOI: 10.5194/tc-9-849-2015.

Owen L.A., Thackray G., Anderson R.S., Briner J., Kaufman D., Roe G., Pfeffer W., Yi C. Integrated research on mountain glaciers: Current status, priorities and future prospects. Geomorphology, 2009. V. 103. No. 2. P. 158–171. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.04.019.

Paul F., Barrand N.E., Baumann S., Berthier E., Bolch T., Casey K., Frey H., Joshi S.P., Konovalov V., Bris R.Le., Molg N., Nosenko G., Nuth C., Pope A., Racoviteanu A., Rastner P., Raup B., Scharrer K., Steffen S., Winsvold S. On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. Annals of Glaciology, 2013. V. 54. P. 171–182. DOI: 10.3189/2013AoG63A296.

Paul F., Bolch T., Briggs K., Kääb A., McMillan M., McNabb R., Nagler T., Nuth C., Rastner P., Strozzi T., Wuite J. Error sources and guidelines for quality assessment of glacier area, elevation change, and velocity products derived from satellite data in the Glaciers_cci project. Remote Sensing of Environment, 2017. V. 203. No. 15. P. 256–275. DOI: doi.org/10.1016/j.rse. 2017.08.038.

Rau F., Mauz F., Vogt S., Khalsa S.J.S., Raup B. Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual. Glacier Classification Guidance for the GLIMS Glacier Inventory. GLIMS Regional Center Antarctic Peninsula, 2005. 36 p.

Raup B., Khalsa S.J.S. GLIMS data analysis tutorial, 2010. 15 p. Web resource: http://www.glims.org/MapsAndDocs assets/GLIMS_Analysis_Tutorial_a4.pdf (accessed 05.02.2023).

RGI Consortium. Randolph Glacier Inventory — A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space. Colorado, USA: Digital Media, 2017. DOI: 10.7265/N5-RGI-60.

Sakai A. Updated GAMDAM glacier inventory over high-mountain Asia. The Cryosphere, 2019. V. 13. P. 2043–2049. DOI: doi.org/10.5194/tc-13-2043-2019.

Su Z., Shi Y. Response of monsoonal temperature glaciers to global warming since the Little Ice Age. Quaternary International, 2002. V. 97 (98). P. 123–131.

WGMS 1991. Glacier Mass Balance Bulletin No. 1 (1988–1989). IAHS (ICSI)-UNEP-UNESCO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 1991. 70 p.

WGMS 2013. Glacier Mass Balance Bulletin No. 12 (2010–2011). ICSU (WDS)-IUGG (IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2013. 106 p.

WGMS 2015. Global Glacier Change Bulletin No. 1 (2012–2013). ICSU(WDS)-IUGG(IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2015. 230 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2015-11.

WGMS 2017. Global Glacier Change Bulletin No. 2 (2014–2015). ICSU(WDS)-IUGG(IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2017. 244 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2017-10.

WGMS 2020. Global Glacier Change Bulletin No. 3 (2016–2017). ISC(WDS)-IUGG(IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2020. 274 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2019-12.

WGMS 2021. Global Glacier Change Bulletin No. 4 (2018–2019). ISC(WDS)-IUGG(IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2021. 278 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2021-05.

REFERENCES

Catalogue of glaciers of the USSR. V. 16. Iss. 1. Part 3–5. Iss. 2. Part 1. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973. 80 p. 64 p. (in Russian).

Ganyushkin D.A., Otgonbayar D., Chistyakov K.V., Kunaeva E.P., Volkov I.V. Recent glacierization of the Tzambagarav ridge (North-Western Mongolia) and its changes since the Little Ice Age maximum. Ice and Snow, 2017. V. 56. No. 4. P. 437–452 (in Russian). DOI: 10.15356/2076-6734-2016-4-437-452.

Gao J., Liu Y. Applications of remote sensing, GIS and GPS in glaciology: A review. Progress in Physical Geography, 2001. V. 25. No. 4. P. 520–540.

Hartman G.M.D. Ice-drainage basin delineation and glacier classification for the arctic ice caps using GIS and GLIMSView software. GLIMS, 2006. 36 p.

IPCC. Climate change 2007. The physical science basis. Contribution of working group 1 to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva: IPCC, 2007. 996 p.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis, the Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report on 6 August 2021 during the 14th Session of Working Group I and 54th Session of the IPCC. Geneva: IPCC, 2021. 2337 p.

IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844.

Khromova T., Nosenko G., Nikitin S., Muraviev A., Popova V., Chernova L., Kidyaeva V. Changes in the mountain glaciers of continental Russia during the twentieth to twenty-first centuries. Regional Environmental Change, 2019. V. 19. P. 1229–1247. DOI: 10.1007/s10113-018-1446-z.

Khromova T.Y., Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Muraviev A.Ya., Nikitin S.A., Lavrentiev I.I. New Inventory of the Russian glaciers based on satellite data (2016–2019). Ice and Snow, 2021. V. 61. No. 3. P. 341–358 (in Russian). DOI: 10.31857/S2076673421030093.

Kitov A.D., Kovalenko S.N., Plyusnin V.M. The results of 100-year-long observations of the glacial geosystem dynamics in the Munku-Sardyk massif. Geography and Natural Resources, 2009. V. 30. No. 3. P. 272–278. DOI: 10.1016/j.gnr.2009.09.012.

Kitov A.D., Pluysnin V.M., Bilichenko I.N. Change of glaciers in the Himalayas and Southern Siberia according to Landsat. InterCarto. InterGIS, 2019. V. 25. Part 2. P. 146–160 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-146-160.

Kitov A.D., Plyusnin V.M., Ivanov E.N., Batuev D.A., Kovalenko S.N. The internet presentation of databases of glaciers of the south of eastern Siberia. InterCarto. InterGIS, 2017. V. 23. Part 2. P. 228–242 (in Russian). DOI:10.24057/2414-9179-2017-2-23-228-242.

Kotlyakov V.M., Chernova L.P., Muraviev A.Ya., Khromova T.E., Zverkova N.M. Change of mountain glaciers in the Northern and Southern hemispheres over the past 160 years. Ice and Snow, 2017. V. 57. No. 4. P. 453–467 (in Russian). DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-453-467.

Nuimura T., Sakai A., Taniguchi K., Nagai H., Lamsal D., Tsutaki S., Kozawa A., Hoshina Y., Takenaka S., Omiya S., Tsunematsu K., Tshering P., Fujita K. The GAMDAM glacier inventory: a quality-controlled inventory of Asian glaciers. The Cryosphere, 2015. V. 9. P. 849–864. DOI: 10.5194/tc-9-849-2015.

Osipov E.Y., Osipova O.P., Klevtsov E.V. Inventory of glaciers in the Eastern Sayan on the basis of space surveys. Ice and Snow, 2017. V. 57. No. 4. P. 483–497 (in Russian). DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-483-497.

Otgonboyar D. Water-glacial resources of endorheic regions of Western Mongolia: Modern assessment and tendencies of change. Author's abstract of the dissertation for the degree of PhD of geographical sciences. Barnaul: Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 2012. 24 p. (in Russian).

Owen L.A., Thackray G., Anderson R.S., Briner J., Kaufman D., Roe G., Pfeffer W., Yi C. Integrated research on mountain glaciers: Current status, priorities and future prospects. Geomorphology, 2009. V. 103. No. 2. P. 158–171. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.04.019.

Paul F., Barrand N.E., Baumann S., Berthier E., Bolch T., Casey K., Frey H., Joshi S.P., Konovalov V., Bris R. Le., Molg N., Nosenko G., Nuth C., Pope A., Racoviteanu A., Rastner P., Raup B., Scharrer K., Steffen S., Winsvold S. On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. Annals of Glaciology, 2013. V. 54. P. 171–182. DOI: 10.3189/2013AoG63A296.

Paul F., Bolch T., Briggs K., Kääb A., McMillan M., McNabb R., Nagler T., Nuth C., Rastner P., Strozzi T., Wuite J. Error sources and guidelines for quality assessment of glacier area, elevation change, and velocity products derived from satellite data in the Glaciers_cci project. Remote Sensing of Environment, 2017. V. 203. No. 15. P. 256–275. DOI: doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.038.

Peretolchin S.P. Glaciers of the Munku-Sardyk Range. News of the Tomsk Technical Institute. V. 9. Tomsk: Typolitography of the Siberian Printing Association, 1908. 60 p. (in Russian).

Rau F., Mauz F., Vogt S., Khalsa S.J.S., Raup B. Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual. Glacier Classification Guidance for the GLIMS Glacier Inventory. GLIMS Regional Center Antarctic Peninsula, 2005. 36 p.

Raup B., Khalsa S.J.S. GLIMS data analysis tutorial, 2010. 15 p. Web resource: http://www.glims.org/MapsAndDocs assets/GLIMS_Analysis_Tutorial_a4.pdf (accessed 05.02.2023).

RGI Consortium. Randolph Glacier Inventory — A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space. Colorado, USA: Digital Media, 2017. DOI: 10.7265/N5-RGI-60.

Sakai A. Updated GAMDAM glacier inventory over high-mountain Asia. The Cryosphere, 2019. V. 13. P. 2043–2049. DOI: doi.org/10.5194/tc-13-2043-2019.

Su Z., Shi Y. Response of monsoonal temperature glaciers to global warming since the Little Ice Age. Quaternary International, 2002. V. 97 (98). P. 123–131.

WGMS 1991. Glacier Mass Balance Bulletin No. 1 (1988–1989). IAHS (ICSI)-UNEP-UNESCO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 1991. 70 p.

WGMS 2013. Glacier Mass Balance Bulletin No. 12 (2010–2011). ICSU (WDS)-IUGG (IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2013. 106 p.

WGMS 2015. Global Glacier Change Bulletin No. 1 (2012–2013). ICSU(WDS)-IUGG(IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2015. 230 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2015-11.

WGMS 2017. Global Glacier Change Bulletin No. 2 (2014–2015). ICSU(WDS)-IUGG(IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2017. 244 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2017-10.

WGMS 2020. Global Glacier Change Bulletin No. 3 (2016–2017). ISC(WDS)-IUGG(IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2020. 274 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2019-12.

WGMS 2021. Global Glacier Change Bulletin No. 4 (2018–2019). ISC(WDS)-IUGG(IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2021. 278 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2021-05.

УДК: 502.57(252.51):614.84 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-423-436**

В.М. Павлейчик[1], **Ж.Т. Сивохип**[2], **Ю.А. Падалко**[3]

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПИРОЛОГИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК В СТЕПЯХ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ FIRMS

АННОТАЦИЯ

Травяные пожары характерны для обширного региона Северной Евразии, охватывающего ландшафты степей и прилегающих природных зон. Изучение пространственно-временной неоднородности пожаров дает возможность выявить и оценить ведущие факторы возникновения и распространения пожаров. Особую актуальность пирологические исследования приобретают в связи с негативным влиянием на различные группы степной биоты и качество окружающей среды, отсутствием объективного представления о причинах высокой вариативности показателей развития пожаров. Основной задачей исследования стало выявление региональных особенностей формирования пирологических обстановок в многолетнем и внутригодовом аспектах. В качестве основного источника данных о пожарах и собственно анализируемого параметра был принят глобальный архив тепловых аномалий MCD14ML (FIRMS). Выявлено, что специфической особенностью архива данных FIRMS является возможность фиксации активных возгораний на пахотных угодьях, что практически невозможно осуществить непосредственно по спутниковым снимкам. В связи с этим наибольшая плотность тепловых аномалий отмечается в земледельчески освоенных провинциях (западные секторы степей и сопредельные территории), для которых практика сельскохозяйственных палов остается традиционным способом земледелия. Сопоставление многолетней динамики возгораний на пашнях и на пастбищно-сенокосных угодьях показывает тесную взаимосвязь. Сходные результаты получены в ходе анализа внутригодового (посуточного) распределения тепловых аномалий, максимумы которых приходится на начало проведения и период завершения сельскохозяйственных работ. Это служит косвенным свидетельством того, что причиной значительной части степных пожаров являются бесконтрольные сельскохозяйственные палы. Региональные пирологические обстановки в степях Северной Евразии и на сопредельных территориях имеют сходные черты в многолетней динамике и отражают сложный характер взаимодействия между природными и антропогенными факторами. Понимание современных тенденций в развитии пожаров может способствовать решению проблем управления пожароопасными обстановками.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пожары, степные регионы, пирологическая обстановка, тепловые аномалии

[1] Институт степи Уральского отделения РАН, ул. Пионерская, д. 11, Оренбург, Россия, 460000, *e-mail:* **vmpavleychik@gmail.com**

[2] Институт степи Уральского отделения РАН, ул. Пионерская, д. 11, Оренбург, Россия, 460000, *e-mail:* **sivohip@mail.ru**

[3] Институт степи Уральского отделения РАН, ул. Пионерская, д. 11, Оренбург, Россия, 460000, *e-mail:* **yapadalko@gmail.com**

Vladimir M. Pavleichik[1], **Zhanna T. Sivohip**[2], **Yuriy A. Padalko**[3]

REGIONAL FEATURES OF THE FORMATION OF PYROLOGICAL ENVIRONMENTS IN THE STEPPES OF NORTHERN EURASIA BASED ON FIRMS DATA

ABSTRACT

Grass fires are characteristic of the vast region of Northern Eurasia, covering the landscapes of the steppes and adjacent natural areas. The study of the spatio-temporal heterogeneity of fires makes it possible to identify and evaluate the leading factors of the occurrence and spread of fires. Pyrological research is of particular relevance due to the negative impact on various groups of steppe biota and the quality of the environment, the lack of an objective understanding of the causes of the high variability of fire development indicators. The main objective of the study was to identify regional features of the formation of pyrologic environments in the long-term and intra-annual aspects. The global archive of thermal anomalies MCD14ML (FIRMS) was adopted as the main source of fire data and the analyzed parameter itself. It is revealed that a specific feature of the FIRMS data archive is the possibility of fixing active fires on arable land, which is almost impossible to carry out directly from satellite images. In this regard, the greatest density of thermal anomalies is observed in the agriculturally developed provinces (western sectors of the steppes and adjacent territories), for which the practice of agricultural bollards remains a traditional way of farming. A comparison of the long-term dynamics of fires in arable land and pasture-hayfields shows a close relationship. Similar results were obtained during the analysis of the intra-annual (daily) distribution of thermal anomalies, the peaks of which occur at the beginning and the period of completion of agricultural work. This serves as indirect evidence that uncontrolled agricultural fires are the cause of a significant part of steppe fires. Regional pyrological conditions in the steppes of Northern Eurasia and adjacent territories have similar features in long-term dynamics and reflect the complex nature of the interaction between natural and anthropogenic factors. Understanding current trends in the development of fires can contribute to solving the problems of managing fire-hazardous situations.

KEYWORDS: fires, steppe regions, pyrological situation, thermal anomalies

ВВЕДЕНИЕ

Предписанные (контролируемые) выжигания растительности являются достаточно повсеместно развитой практикой природопользования для предотвращения ущерба от пожаров, управления природными территориями и сельскохозяйственными угодьями. Опыту использования предписанных выжиганий в различных географических регионах Земли посвящено множество отечественных и зарубежных работ. Остается констатировать, что мнения сторонников и противников о допустимости применения огня в хозяйственных целях и о роли природных пожаров в целом обычно крайне противоположны, таким образом данный вопрос продолжает быть дискуссионным. Но гораздо более значимый ущерб наносят стихийные возгорания, возникающие по многочисленным причинам (неосторожное обращение с огнем, несоблюдение норм пожарной безопасности,

[1] Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 11, Pionerskaya str., Orenburg, 460000, Russia, *e-mail:* **vmpavleychik@gmail.com**

[2] Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 11, Pionerskaya str., Orenburg, 460000, Russia, *e-mail:* **sivohip@mail.ru**

[3] Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 11, Pionerskaya str., Orenburg, 460000, Russia, *e-mail:* **yapadalko@gmail.com**

воздействие разрядов молний и др.), включая и ситуации, когда хозяйственные палы не сопровождаются достаточным контролем.

Природные пожары, отмечающиеся в большинстве регионов Земли, представляют собой угрозу непосредственной безопасности населения и целостности хозяйственных объектов. Пожары являются одним из наиболее значимых факторов формирования экосистем, нарушающих внутри- и межсистемные взаимосвязи, а также определяющих состояние и динамику биотических компонентов. Все эти виды негативных воздействий и угроз наиболее характерны для регионов с травянистыми биомами, в частности — для степных, лесостепных и пустынных регионов Евразии. При этом травяные пожары, несмотря на невысокую продуктивность растительности, вносят вклад в изменение глобального климата и ухудшение качества окружающей среды, изменяют баланс между депонированием и миграцией углерода [*Witham*, *Manning*, 2007; *Lin* et al., 2012; *McCarty* et al., 2012]. Применительно к степным регионам Евразии пожароопасная обстановка формируется на фоне столь же неоднозначного отношения к пожарам. С одной стороны, пожары и сельскохозяйственные палы — это фактор, приводящий к уничтожению биоты и продолжительному постпирогенному восстановлению степных экосистем, ухудшающий качество окружающей среды, представляющий угрозу населению и объектам хозяйственной инфраструктуры. С другой стороны, применение огня рассматривается как традиционный элемент природопользования, позволяющий обеспечивать более высокое кормовое качество пастбищ и сенокосов. Сельскохозяйственные палы позволяют облегчить некоторые этапы обработки пахотных земель и уничтожать излишки заготовленной фитомассы.

Во многом исходя из сложного взаимодействия природных и антропогенных факторов, в определенных географических регионах складываются специфические пирологические обстановки («пиромы» по [*Archibald* et al., 2003]). Но, как было показано ранее [*Pavleichik*, *Chibilev*, 2018; *Pavleichik* et al., 2022], степень подверженности пожарам в регионах различных уровней может варьироваться в существенных пределах ввиду изменяющихся условий. В связи с вышеизложенным, целью исследования стало выявление региональных особенностей в формировании пирологических обстановок в степях Северной Евразии, в т. ч. и на основе сопоставления результатов с сопредельными территориями. В числе задач оценка масштабов природных возгораний, анализ многолетней и сезонной динамики пожаров, на основе которых в дальнейшем формируется представление о ведущих факторах возникновения и распространения пожаров. Естественно, что пирологические исследования в достаточной степени достоверности возможны лишь на основе применения данных дистанционного зондирования Земли.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассматриваемая территория представляет собой обширную полосу, ограниченную меридианами 22° и 87° в. д. и параллелями 57° и 42° с. ш., площадью 7 855 тыс. км². Большая часть территории (порядка 80 %) занята зональными равнинными ландшафтами, ограниченными по периферии (с запада, юга и востока) горными областями и морскими побережьями. Наиболее полный и протяженный (> 3 тыс. км) ряд зональных ландшафтов с преобладанием травянистых экотопов (от лесостепи до южной пустыни) прослеживается в центральном секторе Северной Евразии. Пожары и сельскохозяйственные палы также характерны для азональных (предгорья горных областей) и интразональных (долины и дельты рек, мелководья и острова) ландшафтов.

Пирологическая ситуация в рассматриваемом регионе во многом определяется зональной структурой равнинных ландшафтов, главным образом посредством особенностей климата, растительного покрова и специализации сельскохозяйственного производства. Представленная ниже схема (рис. 1) является результатом обобщения

картографических материалов, так или иначе отражающих широтно-зональную и секторальную дифференциацию степей Северной Евразии и сопредельных территорий [Зоны и типы…, 1999; *Волкова* и др., 2010].

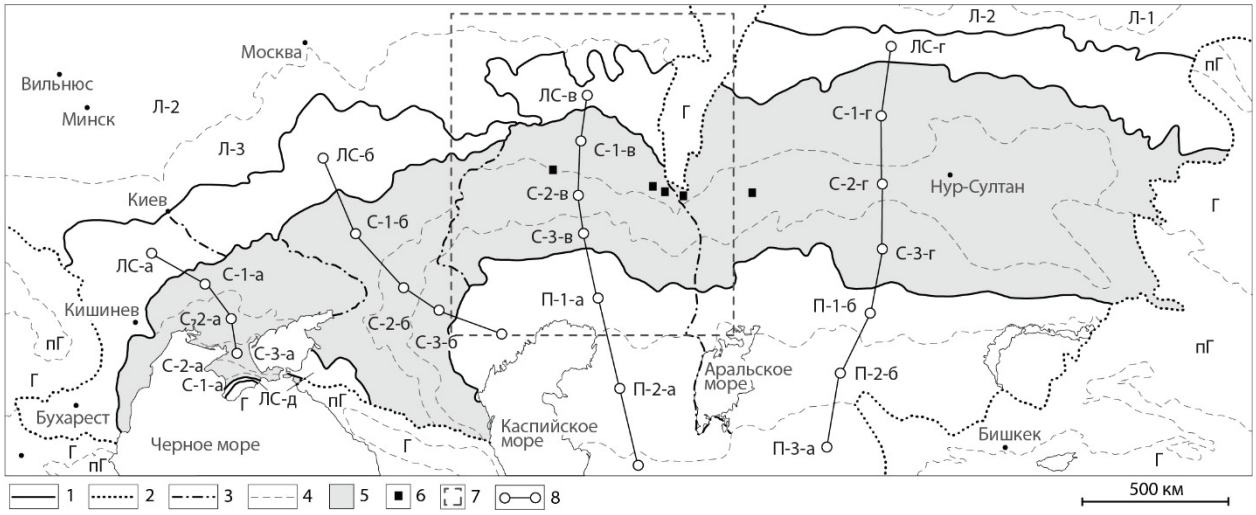


Рис. 1. Схема пространственной дифференциации растительного покрова степей Северной Евразии [Pavleichik et al., 2022]. Границы: 1 — зон; 2 — горных областей; 3 — географических секторов; 4 — подзон и горных подобластей); 5 — степная зона; 6 — ключевые территории, по которым производилось дешифрирование гарей по снимкам Landsat за 1984–2021 гг.; 7 — границы ключевой территории, по которой производилось дешифрирование крупных гарей по снимкам MODIS за 2001–2021 гг.; 8 — линии профилей (к рис. 2). ***Зоны и подзоны. Зона тайги*** *(Л) — южная тайга (Л-1); подтайга (Л-2).* ***Зона широколиственных лесов*** *(ЛШ).* ***Лесостепная зона*** *(ЛС).* ***Степная зона*** *(С) — северные степи (С-1); средние (сухие) степи (С-2); южные (опустыненные) степи (С-3).* ***Пустынная зона*** *(П) — северные пустыни (П-1); средние пустыни (П-2); южные пустыни (П-3).* ***Горные области****, включая предгорные (пГ) и горные (Г) подобласти*

Fig. 1. Scheme of spatial differentiation of the vegetation cover of the steppes of Northern Eurasia [Pavleichik et al., 2022]. Boundaries: 1 — zones; 2 — mountainous regions; 3 — geographical sectors; 4 — subzones and mountainous subregions; 5 — steppe zone; 6 — key areas, which were used to decipher the fires using the Landsat images in 1984–2021; 7 — boundaries of the key territory, along which large burnt areas were deciphered using the MODIS images in 2001–2021; 8 — lines of profiles (for fig. 2). ***Zones and subzones****.* ***Taiga zone*** *(Л): southern taiga (Л-1); subtaiga (Л-2).* ***Deciduous forest zone*** *(ЛШ).* ***Forest-steppe zone*** *(ЛС).* ***Steppe zone*** *(С): northern steppes (С-1); mid-latitude (dry) steppes (С-2); southern (deserted) steppes (С-3).* ***Desert zone*** *(П): northern deserts (П-1); mid-latitude deserts (П-2); southern deserts (П-3).* ***Mountain areas****, including foothill (пГ) and mountain (Г) subregions*

Данная схема была уже использована нами ранее [*Pavleichik* et al., 2022] в качестве основы для выявления региональных особенностей развития травяных пожаров, в данной статье ее приводим для сопоставления приводимых ниже графических материалов. Анализ частично приводится сопоставлением двух западных и двух восточных секторов, в числе которых Западно-Причерноморский (ЛС-а → С-1-а → С-2-а → С-3-а), Волго-Донский (ЛС-б → С-1-б → С-2-б → С-3-б → П-1-а), Волго-Уральский (ЛС-в → С-1-в → С-2-в → С-3-в → П-1-а* → П-2-а → П-3-а) и Урало-Алтайский (ЛС-г → С-1-г → С-2-г → С-3-г → П-1-б → П-2-б → П-3-а).

В современных пирологических исследованиях используется несколько способов получения результатов, отражающих пространственно-временные закономерности развития пожаров, основанных на использовании различных источников данных и их интерпретации. Первое — это статистические данные (к примеру[1]), предоставляемые ведомствами и содержащие информацию о количестве пожаров, площадях, расходах на охрану, ущербе и др. В числе объективных недостатков — исключительно числовые данные; они предоставляются по субъектам РФ и часто подвергаются критике общественными природоохранными организациями из-за несоответствия фактическим показателям. С развитием космической отрасли, технологий хранения, обработки и интерпретации спутниковых материалов в последнее десятилетие широкое распространение в исследованиях получило использование данных дистанционного зондирования.

Исходя из обширности рассматриваемого региона, в качестве исходных данных по природным возгораниям принят архив данных MCD14ML по тепловым аномалиям (ТА) FIRMS (The Fire Information for Resource Management System) — геоинформационный продукт MCD14ML, созданный Университетом штата Мэриленд и NASA, находящийся в открытом доступе и содержащий информацию с 2000 г. по настоящее время. Данные по ТА используются во многих системах оперативного пожарного мониторинга; в качестве основных исходных данных используются изображения спектрорадиометра MODIS, установленного на космические спутники Terra и Aqua. Нами была осуществлена выборка данных по выделенным природным ареалам (провинциям) в разрезе суточных значений за многолетний период. В ходе предварительных работ исключены из расчета скопления ТА, возникающих от стационарных техногенных источников.

Специфика использования этого массива данных состоит в том, что алгоритмом обработки снимков фиксируются активные на момент съемки очаги и фронты пожаров. В связи с этим возможны пропуски данных, обусловленные: а) моментальностью съемки, связанной с периодичностью (3–4 р./сут) облета спутников; б) кратковременностью и быстротечностью самих травяных пожаров; в) неблагоприятными метеоусловиями (облачность) на момент съемки. Вместе с тем, несмотря на очевидно возникающие несоответствия между фактически выгоревшими территориями (площади гарей, идентифицированные по спутниковым изображениям) и количественными данными по распределению ТА, была выявлена довольно высокая степень сходства этих сравниваемых (фактических и косвенных) параметров за общий период 2001–2021 гг. в разрезе годовых значений. Так, применительно к гарям на ключевых участках [*Pavleichik*, *Chibilev*, 2018] и ТА по соответствующим им провинциям значение коэффициента корреляции рядов многолетних данных составило около 0,7. Сходное мнение о возможности использования высказано продукта MCD14ML высказано при сравнении различных источников данных о пожарах применительно к пойменным ландшафтам Нижней Волги [*Берденгалиева*, 2022]. Это означает, что при всех объективных недостатках массива данных FIRMS, этот источник информации о развитии травяных пожаров является достаточно достоверным и возможным для применения, особенно с учетом практически глобального охвата данными. Немаловажной является возможность получения объективного представления о внутригодовом распределении пожаров, получаемого на основе усреднения многолетних показателей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По выделенным ландшафтно-ботаническим провинциям сформирована выборка посуточных данных. На первом этапе данные были обобщены в разрезе отдельных лет означенного периода, что позволило в общих чертах оценить многолетнюю динамику

[1] Единая межведомственная информационно-статистическая система. Федеральная служба государственной статистики РФ. Электронный ресурс: https://www.fedstat.ru/ (дата обращения 15.02.2023).

возгораний, степень сходства и различий для различных географических регионов. Результаты анализа многолетней выборки (в пересчете на среднюю плотность ТА) представлены в виде серии диаграмм (рис. 2).

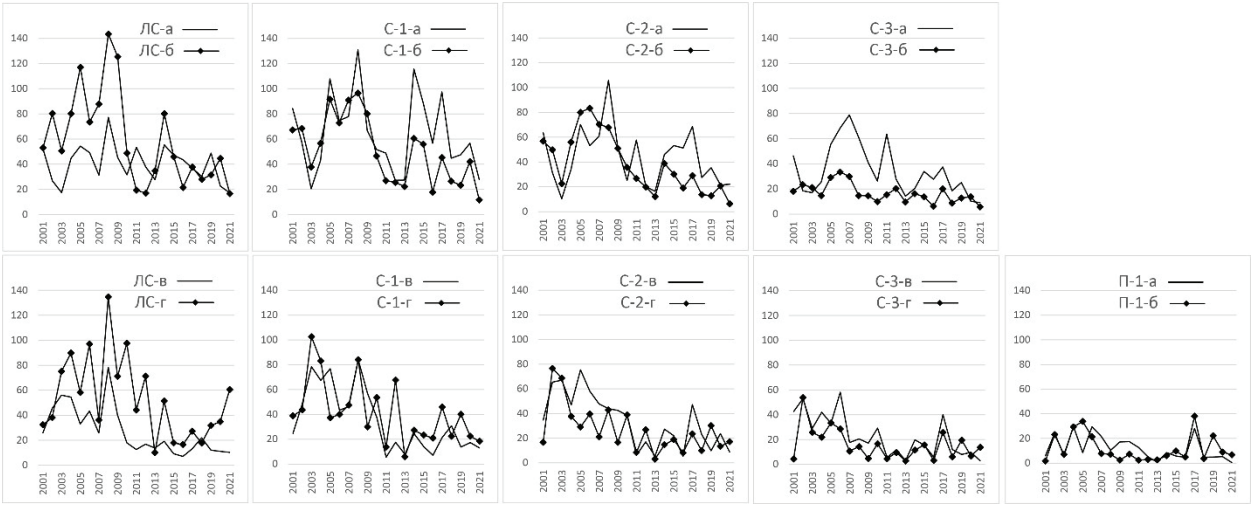


Рис. 2. Многолетняя динамика плотности тепловых аномалий (ось Y, ед./тыс. км²) в ландшафтных секторах и подзонах Северной Евразии. Индексы провинций соответствуют рис. 1

Fig. 2. Long-term dynamics of the density of thermal anomalies (Y axis, units/thous.km²) in landscape sectors and subzones of Northern Eurasia The provincial indexes equals to fig. 1

Данные на диаграммах обобщены исходя из различий, связанных с уровнем сельскохозяйственной освоенности. Верхний ряд образуют староосвоенные земледельческие регионы (Западно-Причерноморский и Волго-Донский секторы, за исключением пустынь Северного Прикаспия), в которых степные участки в целом малочисленны и занимают островное положение в обширных массивах пахотных земель. Следовательно, возникновение возгораний в подавляющем большинстве случаев связано с проведением сельскохозяйственных палов на пахотных угодьях.

Нижний ряд диаграмм относится к двум обширным восточным секторам (Волго-Уральский и Урало-Алтайский), для которых подчиненность земледельческого освоения широтно-зональной структуре ландшафтов более отчетливо выражена, чем в западных секторах. Пастбищно-сенокосные угодья с условно естественным растительным покровом в лесостепях и в северных степях также занимают островное положение, но их количество и площадные характеристики гораздо более значимы ввиду большей расчлененности рельефа (холмисто-увалистые равнины Общего Сырта и Предуралья, Казахский мелкосопочник), ландшафтно-литогенных особенностей Зауральского пенеплена и аккумулятивных равнин Западной Сибири и Тургая. Южные пределы устойчивого земледелия здесь в целом совпадают с границей между северными и южными степями, хотя в благоприятных условиях пахотнопригодности массивы пахотных земель отмечаются и в средних степях. Таким образом, восточные секторы отличаются сложно-дифференцированными условиями формирования пожароопасных обстановок на фоне широтно-зональной смены ландшафтов и систем природопользования.

Изначально предполагалось, что в условиях значительной протяженности рассматриваемого региона (около 5 тыс. км) в интенсивности и многолетней динамике развития пожаров будут отмечаться региональные особенности, обусловленные сменой погодно-климатических условий по мере нарастания степени континентальности и

изменения характера землепользования. Вместе с тем полученные результаты не показывают принципиальных различий, по крайней мере в многолетнем ряду данных. В целом отмечается серия лет с повышенными показателями возгорания (с 2002–2005 по 2008–2009 гг.), сменяющаяся периодом пониженных значений, до окончания рассматриваемого временного отрезка (2021). Уровень развития пожарных явлений, как правило, отличается синхронным характером для природных зон в годовом и в среднемноголетнем исчислениях, при этом выделяется две фазы: повышенных и пониженных значений (рис. 3).

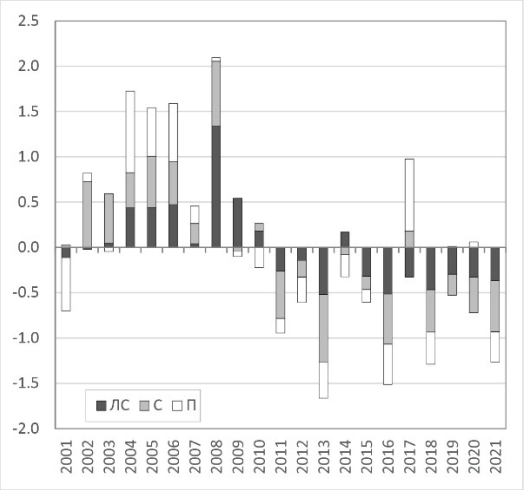


Рис. 3. Распределение модульных значений плотности тепловых аномалий за многолетний период по природным зонам
Fig. 3. Distribution of modal values of the density of thermal anomalies over a multi-year period by natural zones

Следует учитывать, что ход обобщенных (от лесостепи до пустынь) данных по секторам определяется значениями по степной зоне, доля которых в среднемноголетнем разрезе варьирует в пределах 60–80 %. Явная схожесть многолетнего ряда для разных секторов косвенно свидетельствует об определенной общности в тенденциях формирования пирогенных обстановок — природных (погодно-климатических) и антропогенных. Вместе с тем для отдельных ландшафтных провинций подобный многолетний ход возгораний не столь очевиден. В лесостепных и пустынных ландшафтах ход значений в целом аналогичен данным по степным регионам, но с менее выраженными межгодовыми амплитудами.

Уменьшение доли площадей, используемых в сельскохозяйственном производстве, и закономерный рост количества возгораний в восточном направлении наиболее отчетливо проявлены лишь при сравнительном анализе северных степей Предуралья и Зауралья. По ТА для природных зон Северной Евразии в целом наблюдается обратная картина с распределением ТА — максимумы значений наблюдаются в крайнем западном секторе во всех подзонах степей, практически полностью занятых пахотными агроландшафтами. Абсолютный максимум по плотности ТА приходится на повсеместно освоенные причерноморские средние степи и сопредельные районы. Таким образом, для степной зоны данные по ТА отразили прямую взаимосвязь между общей освоенностью земельных ресурсов и практикой сжигания пожнивных остатков.

Наличие малоиспользуемых земель слабо влияет на общую статистику в разрезе секторов природных зон и проявляется лишь при сравнении принципиально отличающихся

по использованию территорий. Но и здесь мы находим существенные несоответствия. Так, по результатам дешифрирования гарей по космоснимкам по Заволжско-Уральскому региону было выявлено, что максимально охвачены степными пожарами подзоны средних и опустыненных степей, северных пустынь [*Pavleichik* et al., 2022]. В северном и южном направлении от этой полосы их количество и площадь резко сокращается; в первом случае — из-за обилия пахотных угодий, во втором — в результате сокращения количества надземной фитомассы и плотности травостоя, а также в целом меньшей освоенности территории. В данных по ТА максимумы сосредоточены в наиболее освоенных природных зонах — лесостепи и северной степи (для трех восточных секторов) и в средней степи для Западно-Причерноморского (крайнего западного) сектора.

Таким образом, определилась важная особенность в использовании и интерпретации данных архива ТА. На определенных стадиях обработки пахотных угодий производителями практикуется выжигание стерневых остатков, практически сразу за которыми следует последующая обработка земли. Вследствие этого факт использования огня и масштабы его распространения возможно зафиксировать в самых общих чертах, наиболее объективно — лишь по активным возгораниям из базы данных ТА FIRMS. Другие источники информации о пожарах, как правило, основаны на принципе идентификации уже сгоревших территорий, в связи с чем не способны фиксировать полевые сельхозпалы. Сопоставление рядов посуточных данных по ТА (MCD14ML) и площадям гарей (MCD64A1) как раз свидетельствует об этих принципиальных различиях. Невысокая периодичность и пространственное разрешение снимков Landsat также не позволяют оценивать такого рода возгорания при экспертном дешифрировании. Данная проблема достоверного учета сельхозпалов на пахотных и залежных угодьях подтверждается современными геоинформационными исследованиями [*Hall* et al., 2016].

Исходя из полученных результатов следует, что использование архива данных по ТА в целях исследования факторов и динамики пирологической обстановки имеет ограниченное количество решаемых задач либо требует проведения дополнительных геоинформационных исследований. Для разнородных регионов необходимо разграничение данных по условно-естественным степным территориям и пахотным угодьям. Количество ТА, фиксирующих систематическое выжигание растительных остатков на полях (стерня, неиспользованные стога соломы и др.), в совокупности «перевешивает» ТА, образовавшиеся в результате степных пожаров.

Для понимания взаимосвязей между возгораниями на пашнях и на пастбищно-сенокосных угодьях нами было рассчитано распределение плотности ТА по этим типам угодий (рис. 4). В качестве исходного геоинформационного слоя была использована схема пахотных угодий России [*Bartalev* et al., 2016].

Полученные данные подтверждают, что частота возгораний на пашнях, как правило, существенно выше, чем на пастбищно-сенокосных угодьях. При этом многолетний ход показателя на этих типах сельскохозяйственных угодий практически идентичен. Коэффициент корреляции многолетних рядов данных варьирует от 0,77 до 0,91 для природных зон, которым характерно развитие земледелие, включая предгорные области. Косвенно это свидетельствует о том, что причиной значительной части степных пожаров являются бесконтрольные сельскохозяйственные палы на пашнях. Результаты также свидетельствуют о неравномерности пожарных явлений во времени, обусловленных как природно-климатическими условиями, так и социально-экономическими факторами.

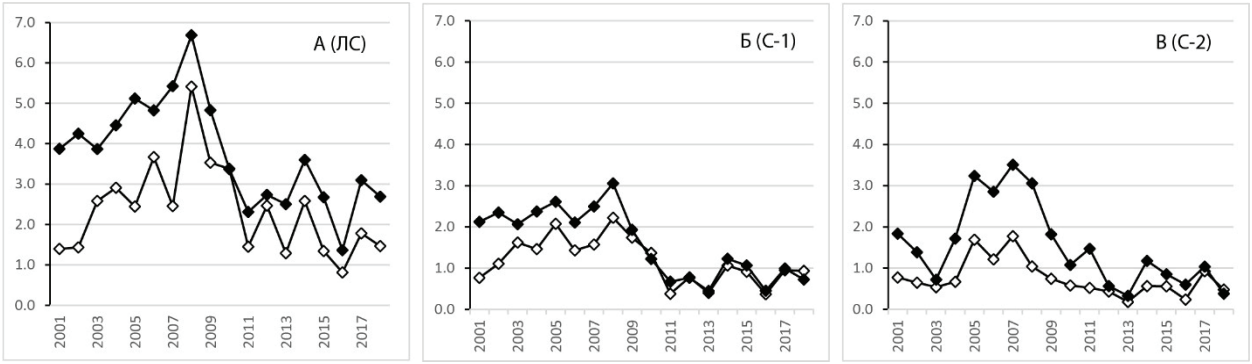


Рис. 4. Многолетнее распределение плотности тепловых аномалий (ось Y, ед./100 км²) на пахотных и пастбищно-сенокосных угодьях в пределах лесостепей (А), северных (Б) и средних (В) степей Северной Евразии (в пределах РФ)
Fig. 4. Long-term distribution of the density of thermal anomalies (Y axis, units /100 km²) on arable and pasture-hay lands within the forest-steppes (А), northern (Б) and middle (В) steppes of Northern Eurasia (within the Russian Federation)

Учитывая возможность использования многолетних данных по фактическим гарям 5 ключевых участков Заволжско-Уральского региона (отмечены на рис. 1) [*Pavleichik*, *Chibilev*, 2018], проведена их корреляция с рядами данных по ТА. Расположение участков на южной окраине северных степей, преимущественно (4 из 5) в Заволжско-Уральском секторе, приводит к тому, что теснота корреляционных связей практически достигает высокой степени (0,67 с сектором С-1 и 0,69 с С-2). Следовательно, данными по ТА подтверждается, что южная окраина северных степей по характеру пирологической обстановки ближе к прилегающей с юга подзоне средних степей ввиду временного сокращения аграрной освоенности этой части подзоны. Об этом же свидетельствует анализ общности многолетних данных по подзонам и секторам, при этом однотипность сравниваемых данных (ТА) повышает силу связей. Значения коэффициентов корреляции снижаются до слабой степени тесноты лишь при сравнении наиболее удаленных в широтном плане подзон — северных и южных степей. Несколько более слабой является сила связей многолетних рядов данных по Урало-Алтайскому сектору, но все же она остается в пределах среднего диапазона. Таким образом, данные по ТА в первую очередь следует использовать для сравнительного анализа однородных (по степени и характеру освоенности) географических регионов и для выявления многолетней динамики природных зон и подзон.

В аспекте обозначенных выше методологических сложностей в идентификации сельскохозяйственных палов массив данных по ТА предоставляет возможность анализа показателей посуточного распределения возгораний. С учетом выявленной тесноты связей между травяными пожарами и сельхозпалами считаем, что представленные ниже графики (рис. 5) достаточно полноценно отображают региональные особенности формирования внутригодовых пожароопасных ситуаций. Помимо этого, они косвенно свидетельствуют о сельскохозяйственной природе степных пожаров, т. к. по времени соотносятся с периодами проведения сезонных работ. Особенно это относится к весеннему пику, наиболее отчетливо выраженному в земледельчески освоенных провинциях северной степи и западных секторов. Вместе с тем следует учитывать, что ТА MODIS имеют размерность 250–1000 м; по этой причине данные MCD14ML могут завышать площади пожаров при преобладании локальных возгораний [*Берденгалиева*, 2022]. Такое завышение показателей особенно может проявляться при единовременной многочисленности возгораний, что как раз и

происходит в период между сходом снежного покрова и началом основных сельскохозяйственных работ.

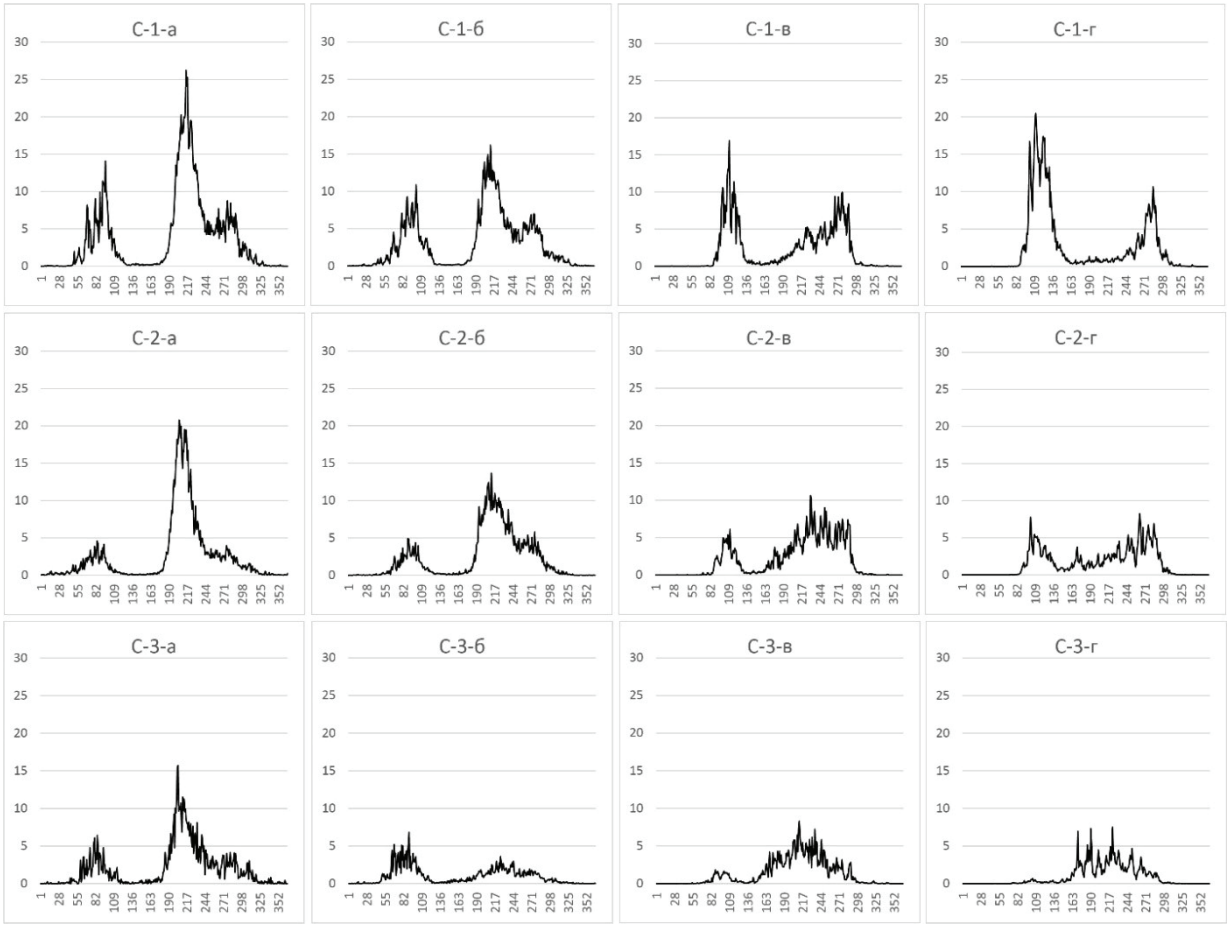


Рис. 5. Посуточный ход плотности тепловых аномалий за 2001–2021 гг. в степных провинциях Северной Евразии. Индексы провинций соответствуют рис. 1. Ось Y — средняя плотность тепловых аномалий (ед./тыс. км²); ось X — последовательность дней в календарном году (от 1 до 365)

Fig. 5. The daily course of the density of thermal anomalies for 2001–2021 in the steppe provinces of Northern Eurasia. The provincial indexes correspond to fig. 1. Y axis is the average density of thermal anomalies (units/thous.km²); X axis is the sequence of days in a calendar year (from 1 to 365)

Вышесказанное относилось к крупным географическим регионам, достаточно однородным в плане структуры ландшафтов и соответствующего им типа природопользования (гл. обр. сельскохозяйственного). Вместе с тем, определенный интерес вызывают особенности формирования пирологической обстановки в азональных и интразональных ландшафтах, имеющих признаки фоновых. В аспекте проблематики нашего исследования были в общих чертах рассмотрены особенности развития тростниковых пожаров в пойменно-дельтовых ландшафтах, а также в травянистых предгорных областях. Относительно пожаров в дельте Волги (в первую очередь) и других рек, впадающих в Каспийское море (Урал, Эмба) заметно явное несоответствие как между собой, так и относительно зональных (фоновых) показателей развития пожаров в соответствующей провинции пустынной зоны. Это несоответствие проявляется как в многолетнем аспекте, так и в сезонном распределении и пространственном развитии, что

свидетельствует о совершенно других причинах возникновения возгораний на фоне последствий регулирования стока водохранилищами [*Шинкаренко* и др., 2021; 2022]. Предгорные территории в пирологическом отношении интересны с позиций ландшафтной адаптации систем природопользования и сохранения традиционного использования растительных ресурсов в условиях сложно дифференцированного рельефа. На данном этапе исследования прослежена степень согласованности в показателях развития пожаров в многолетнем разрезе между фоновыми и азональными ландшафтами.

При оценке территорий по степени подверженности степным пожарам и другим возгораниям следует исходить не только из средних величин, максимальных и минимальных значений, но и пределов возможных колебаний в последующих многолетних периодах. Масштабы развития пожаров во многом остаются слабо предсказуемыми ввиду многофакторности этого явления, поэтому расчеты числовых показателей могут быть представлены в виде количественной оценки, отвечающей той или иной заданной обеспеченности или повторяемости без указания срока наступления расчетной величины. Для установления статистической закономерности колебания количества возгораний (ТА) был выполнен расчет их повторяемости в разрезе природных зон и построены кривые обеспеченности. Обращает на себя внимание высокая степень корреляции значений относительно линейного тренда для всех рассмотренных рядов. При этом разброс показателей снижается в южном направлении, что свидетельствует о меньшей зависимости от внешних (предположительно погодно-климатических) факторов развития пожаров в южных степях.

ВЫВОДЫ

Массив данных по тепловым аномалиям FIRMS является одним из наиболее распространенных источников информации о природных возгораниях и обширно используется исследователями при изучении отдельных аспектов развития пожаров. Выявленные специфические особенности этого источника информации следует учитывать в методологии подобных исследований. Данные архивы — продукт, подготовленный и используемый системами пожарного мониторинга, в первую очередь для получения оперативной информации о возникновении и распространении пожаров. По объективным причинам эти автоматизированные системы не могут в достаточной степени полно отобразить площади, пройденные пожарами. Вместе с тем интерпретация этих данных позволяет составить представление о региональных особенностях формирования пирологических обстановок для любых географических регионов. Использование этих данных применительно к обширным территориям и для длительных промежутков времени повышает достоверность результатов. Наличие атрибутивной информации по дате и времени каждой ТА делает этот источник данных незаменимым при сопоставлении с другими данными в суточном выражении (в частности, для изучения роли погодных условий). Актуальной остается задача разграничения данных по возгораниям исходя из типов угодий, что позволит получить достоверное представление о предпосылках и закономерностях формирования пирологических обстановок, оценить экологическую значимость пирогенного фактора.

Многолетняя и внутригодовая динамика природных пожаров в различных регионах Земли имеет различную направленность [*Archibald* et al., 2003; *Artes* et al., 2019]. Степи Северной Евразии и прилегающие к ней природные зоны отличаются высокой степенью подверженности травяным пожарам. В этом плане особенно выделялся период активизации пожаров, связанный с сокращением сельскохозяйственного производства в странах бывшего СССР и формированием обширных массивов малоиспользуемых земель при сохранении традиционного использования огня для сельскохозяйственных целей [*Dubinin*

et al., 2011; *Pavleichik*, *Chibilev*, 2018; *Dara* et al., 2020; *Freitag* et al., 2020]. Все это привело к формированию сложной пирологической обстановки, имеющей негативные экологические последствия. Результаты проведенного исследования показывают, что пирологическая обстановка в рассмотренных природных зонах и секторах отличается региональной спецификой, обусловленной сложной взаимосвязью между природными и антропогенными факторами. Понимание причин активизации пожаров дает возможность поиска и апробации решений для управления пожароопасными обстановками.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 23–27–00134 «Природные пожары в степных регионах Евразии как индикатор природных и социально-экономических изменений».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the grant of the Russian National Science Foundation No. 23–27–00134 “Wildfires in the steppe regions of Eurasia as an indicator of natural and socio-economic changes”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Берденгалиева А.Н. Анализ горимости пойменных ландшафтов Нижней Волги по данным информационных продуктов спутникового детектирования активного горения и выгоревших площадей. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 346–358. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-346-358.

Волкова Е.А., Рачковская Е.И., Садвокасов Р.А., Сафронова И.Н., Храмцов Е.Н. Ботанико-географическое районирование. Национальный атлас Республики Казахстан. Природные условия и ресурсы. Алматы, 2010. Т. 1. С. 110.

Зоны и типы растительности России и сопредельных территорий. Карта м-ба 1: 8 000 000. М.: Интеграция, 1999. 64 с.

Шинкаренко С.С., Дорошенко В.В., Берденгалиева А.Н. Динамика площади гарей в зональных ландшафтах юго-востока европейской части России. Известия РАН. Серия географическая, 2022. Т. 86. № 1. С. 122–133. DOI: 10.31857/S2587556622010113.

Шинкаренко С.С., Дорошенко В.В., Берденгалиева А.Н., Комарова И.А. Динамика горимости аридных ландшафтов России и сопредельных территорий по данным детектирования активного горения. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2021. Т. 18. № 1. С. 149–164. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-149-164.

Archibald S., Lehmann C., Gómez-Dansd J., Bradstocke R. Defining pyromes and global syndromes of fire regimes. PNAS, 2003. V. 110. No. 16. P. 6442–6447. DOI: 10.1073/pnas.1211466110.

Artes T., Oom D., De Rigo D., Durrant T.H., Maianti P., Liberta G., San-Miguel-Ayanz J. A global wildfire dataset for the analysis of fire regimes and fire behavior. Scientific Data, 2019. V. 296. No. 6. DOI: 10.1038/s41597-019-0312-2.

Bartalev S.A., Plotnikov D.E., Loupian E.A. Mapping of arable land in Russia using multi-year time series of MODIS data and the LAGMA classification technique. Remote Sensing Letters, 2016. V. 7. P. 269–278.

Dara A., Baumann M., Hölzel N., Hostert P. Post-Soviet land-use change affected fire regimes on the Eurasian steppes. Ecosystems, 2020. No. 23. P. 943–956. DOI: 10.1007/s10021-019-00447-w.

Dubinin M., Lushchekina A., Radeloff V. Climate, livestock, and vegetation: What drives fire increase in the arid ecosystems of Southern Russia? Ecosystems, 2011. V. 14. P. 547–562. DOI: 10.1007/s10021-011-9427-9.

Freitag M., Kamp J., Dara A., Kuemmerle T., Sidorova T.V., Stirnemann I.A., Velbert F., Hölzel N. Post-Soviet shifts in grazing and fire regimes changed the functional plant community composition on the Eurasian steppe. Global Change Biology, 2020. P. 1–14. DOI: 10.1111/GCB.15411.

Hall J.V., Loboda T.A., Giglio L., McCarty G.W. A MODIS-based burned area assessment for Russian croplands: Mapping requirements and challenges. Remote Sensing of Environment, 2016. V. 184. P. 506–521.

Lin H.W., Jin Y.F., Giglio L., Foley J.A., Randerson J.T. Evaluating greenhouse gas emissions inventories for agricultural burning using satellite observations of active fires. Ecological Applications, 2012. V. 22. P. 1345–1364.

McCarty J.L., Ellicott E.A., Romanenkov V., Rukhovitch D., Koroleva P. Multi-year black carbon emissions from cropland burning in the Russian Federation. Atmospheric Environment, 2012. V. 63. P. 223–238.

Pavleichik V.M., Chibilev A.A. Steppe fires in conditions the regime of reserve and under changing anthropogenic impacts. Geography and Natural Recourses, 2018. V. 39. No. 3. P. 212–221. DOI: 10.1134/S1875372818030046.

Pavleychik V.M., Chibilev A.A., Padalko Yu.A. Pyrological situation in the steppes of Northern Eurasia. Doklady Earth Sciences, 2022. V. 505. Part 2. P. 591–597. DOI: 10.1134/S1028334X22080141.

Witham C., Manning A. Impacts of Russian biomass burning on UK air quality. Atmospheric Environment, 2007. V. 41. P. 8075–8090.

REFERENCES

Archibald S., Lehmann C., Gómez-Dansd J., Bradstocke R. Defining pyromes and global syndromes of fire regimes. PNAS, 2003. V. 110. No. 16. P. 6442–6447. DOI: 10.1073/pnas.1211466110.

Artes T., Oom D., De Rigo D., Durrant T.H., Maianti P., Liberta G., San-Miguel-Ayanz J. A global wildfire dataset for the analysis of fire regimes and fire behavior. Scientific Data, 2019. V. 296. No. 6. DOI: 10.1038/s41597-019-0312-2.

Bartalev S.A., Plotnikov D.E., Loupian E.A. Mapping of arable land in Russia using multi-year time series of MODIS data and the LAGMA classification technique. Remote Sensing Letters, 2016. V. 7. P. 269–278.

Berdengalieva A.N. Analysis of the Lower Volga floodplain landscapes burning according to active fire and burnt areas satellite data. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2022. V. 28. Part 1. P. 346–358 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-346-358.

Dara A., Baumann M., Hölzel N., Hostert P. Post-Soviet land-use change affected fire regimes on the Eurasian steppes. Ecosystems, 2020. No. 23. P. 943–956. DOI: 10.1007/s10021-019-00447-w.

Dubinin M., Lushchekina A., Radeloff V. Climate, livestock, and vegetation: What drives fire increase in the arid ecosystems of Southern Russia? Ecosystems, 2011. V. 14. P. 547–562. DOI: 10.1007/s10021-011-9427-9.

Freitag M., Kamp J., Dara A. Kuemmerle T., Sidorova T.V., Stirnemann I.A., Velbert F., Hölzel N. Post-Soviet shifts in grazing and fire regimes changed the functional plant community composition on the Eurasian steppe. Global Change Biology, 2020. P. 1–14. DOI: 10.1111/GCB.15411.

Hall J.V., Loboda T.A., Giglio L., McCarty G.W. A MODIS-based burned area assessment for Russian croplands: Mapping requirements and challenges. Remote Sensing of Environment, 2016. V. 184. P. 506–521.

Lin H.W., Jin Y.F., Giglio L., Foley J.A., Randerson J.T. Evaluating greenhouse gas emissions inventories for agricultural burning using satellite observations of active fires. Ecological Applications, 2012. V. 22. P. 1345–1364.

McCarty J.L., Ellicott E.A., Romanenkov V., Rukhovitch D., Koroleva P. Multi-year black carbon emissions from cropland burning in the Russian Federation. Atmospheric Environment, 2012. V. 63. P. 223–238.

Pavleichik V.M., Chibilev A.A. Steppe fires in conditions the regime of reserve and under changing anthropogenic impacts. Geography and Natural Recourses, 2018. V. 39. No. 3. P. 212–221. DOI: 10.1134/S1875372818030046.

Pavleychik V.M., Chibilev A.A., Padalko Yu.A. Pyrological situation in the steppes of Northern Eurasia. Doklady Earth Sciences, 2022. V. 505. Part 2. P. 591–597. DOI: 10.1134/S1028334X22080141.

Shinkarenko S.S., Doroshenko V.V., Berdengalieva A.N. Burned areas dynamics in zonal landscapes of the south-east of the European part of Russia. Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya (News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series), 2022. V. 86. No. 1. P. 122–133 (in Russian). DOI: 10.31857/S2587556622010113.

Shinkarenko S.S., Doroshenko V.V., Berdengalieva A.N., Komarova I.A. Dynamics of arid landscapes burning of Russia and adjacent territories according to active fire data. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2021. V. 18. No. 1. P. 149–164 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-149-164.

Volkova E.A., Rachkovskaya E.I., Sadvokasov R.A., Safronova I.N., Khramtsov E.N. Botanical and geographical zoning. National atlas of the Republic of Kazakhstan. Natural conditions and resources. Almaty, 2010. V. 1. P. 110 (in Russian).

Witham C., Manning A. Impacts of Russian biomass burning on UK air quality. Atmospheric Environment, 2007. V. 41. P. 8075–8090.

Zones and types of vegetation in Russia and adjacent territories. Map scale 1: 8 000 000. Moscow: Integration, 1999. 64 p. (in Russian).

УДК: 528.94+911.52 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-437-451**

М.Ю. Грищенко[1,2,3], **А.С. Мурман**[4], **Д.А. Терехова**[5], **В.В. Шелухо**[6], **И.Е. Тамаровский**[7]

КРУПНОМАСШТАБНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ГЕОСИСТЕМ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ о. КУНАШИР (КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА)

АННОТАЦИЯ

В основе настоящей работы лежат материалы комплексной экспедиции в северную часть о. Кунашир (Большая Курильская гряда), состоявшейся в 2021 г. Ключевой участок находится у подножья юго-западного склона высочайшего кунаширского вулкана Тятя (1819 м) на берегу Тихого океана, и представляет собой плоскую, слегка всхолмленную, сложенную вулканическими отложениями залесенную равнину. Участок характеризуется равнинным рельефом, который в целом нехарактерен для Кунашира; кроме того, он сложен довольно молодыми вулканическими отложениями. Ключевой участок ограничен с запада и востока руслами сравнительно крупных рек Саратовской и Тятиной соответственно; по его территории с севера на юг протекают немноговодные водотоки Банный и Кол. Участок находится на территории Государственного природного заповедника Курильский и его охранной зоны. В ходе проведенных исследований собраны и систематизированы данные описаний почвенных разрезов, растительности и ландшафтов. Всего выполнено 22 комплексных ландшафтных описания и 54 описания растительных сообществ. В процессе составления предварительной схемы дешифрирования и камеральной обработки собранных материалов использовались снимки сверхвысокого пространственного разрешения со спутника Pleiades-1B, дата съемки: 27 сентября 2019 г. Составлены почвенная, геоботаническая и ландшафтная карты на территорию площадью 15 км^2. Масштаб созданных картографических материалов составляет 1: 20 000. Проведенное исследование позволило получить новые данные для крупномасштабного тематического картографирования и повысить степень изученности северной части Кунашира. В частности, обнаружены и исследованы многочисленные гидроморфные комплексы, нетипичные для остальной части острова. Установлено, что переувлажнение значительно влияет на условия и характер формирования почвенно-растительных комплексов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тематические карты, крупномасштабное картографирование, Кунашир, Южные Курилы

1 Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские Горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail:* **m.gri@geogr.msu.ru**

2 Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», ФГиГТ, Покровский б-р, д. 11, Москва, Россия, 109028, *e-mail:* **m.gri@geogr.msu.ru**

3 Государственный природный заповедник «Курильский», 5, ул. Заречная, пос. Южно-Курильск, Сахалинская обл., Россия, 694500, *e-mail:* **m.gri@geogr.msu.ru**

4 Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские Горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail:* **annamurman.geo@mail.ru**

5 Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские Горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail:* **terexova.da@gmail.com**

6 Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские Горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail:* **shelukho.vera@mail.ru**

7 Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские Горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail:* **tamarow-ig@yandex.ru**

Mikhail Yu. Grishchenko[1,2,3], **Anna S. Murman**[4], **Darya A. Terekhova**[5], **Veronica V. Shelukho**[6], **Igor Ye. Tamarovsky**[7]

LARGE-SCALE RESEARCH AND MAPPING OF GEOSYSTEMS OF THE NORTHERN PART OF KUNASHIR ISLAND (KURIL ISLANDS)

ABSTRACT

This work is based on the materials of a comprehensive expedition to the northern part of Kunashir Island (Great Kuril Ridge), which took place in 2021. The key site is located at the foot of the southwestern slope of the highest Kunashir volcano Tyatya (1819 m) on the Pacific coast, and is a flat, slightly hilly forested plain composed of volcanic deposits. The site is characterized by a flat relief, which, in general, is not typical for Kunashir; in addition, it is composed of fairly young volcanic deposits. The key area is bounded on the west and east by the channels of the relatively large rivers Saratovskaya and Tyatina; on its territory from north to south, the shallow watercourses Banny and Kol flow. The site is located on the territory of the Kuril'sky State Nature Reserve and its protected zone. In the course of the research, data on descriptions of soil profiles, vegetation, and landscapes were collected and systematized. A total of 22 complex landscape descriptions and 54 descriptions of plant communities were made. In the process of compiling a preliminary scheme for the interpretation and office processing of the collected materials, ultra-high spatial resolution images from the Pleiades-1B satellite were used, the date of acquisition was September 27, 2019. Soil, geobotanical and landscape maps were compiled for an area of 15 km^2. The scale of the created cartographic materials is 1: 20 000. The study made it possible to obtain new data for large-scale thematic mapping and increase the degree of knowledge of the northern part of Kunashir. In particular, numerous hydromorphic complexes, which are not typical for the rest of the island, have been discovered and studied. It has been established that waterlogging significantly affects the conditions and nature of the formation of soil-vegetable complexes.

KEYWORDS: thematic maps, large-scale mapping, Kunashir, South Kuriles

ВВЕДЕНИЕ

Курильские острова имеют важное стратегическое значение и обладают большим природным потенциалом. Однако их удаленность от материка и отсутствие постоянного или временного населения препятствовала их всестороннему комплексному изучению. Среди всех островов Курильской гряды Кунашир наиболее заселен, обладает довольно развитой инфраструктурой и транспортным сообщением с соседними островами. Это позволило исследователям изучить его геологическое и геоморфологическое строение,

1 Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **m.gri@geogr.msu.ru**
2 HSE University, Faculty of Geography and Geoinformatics, 11, Pokrovsky blvd., Moscow, 109028, Russia, *e-mail:* **m.gri@geogr.msu.ru**
3 State nature reserve "Kuril'sky", 5, Zarechnaya str., Yuzhno-Kuril'sk, Sakhalin oblast, 694500, Russia, *e-mail:* **m.gri@geogr.msu.ru**
4 Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **annamurman.geo@mail.ru**
5 Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **terexova.da@gmail.com**
6 Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **shelukho.vera@mail.ru**
7 Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **tamarow-ig@yandex.ru**

установить палеогеографические обстановки прошлого [*Мархинин*, 1959; *Горшков*, 1967; *Мелекесцев*, 1974; *Короткий* и др., 1999; *Разжигаева* и др., 2000]. Растительность острова изучена довольно хорошо, однако в основном данные имеются по определенным ключевым участкам. Среди обобщающих работ можно выделить труды Д.П. Воробьева [1963], Л.М. Алексеевой [1983] и В.Ю. Баркалова [2009]. Почвенный покров изучен менее детально, и работ по нему значительно меньше. Общие сведения относительно разнообразия и свойств почв о. Кунашир можно получить из трудов Лашкова [1948], Ивлева и др. [1982], Фураева [2013]. Говоря о работах, посвященных ландшафтным особенностям острова, нельзя не упомянуть материалы К.С. Ганзея и соавторов [2010; 2012]. Тем не менее, информация в них имеет высокую степень обобщения и позволяет лишь в целом судить о существующем ландшафтном разнообразии.

Большинство доступных карт по Курильским островам и Кунаширу в частности собрано в Атласе Курильских островов [2009]. Там представлен наиболее полный обзор картографических материалов и сопроводительной информации. Однако их масштаб преимущественно мелкий и средний, в связи с чем нет возможности изучить по ним местность на детальном уровне. Тематические детальные карты существуют на отдельные участки [*Грищенко* и др., 2018; 2019; 2020; 2021]. Материалы для их составления получены в результате многолетних экспедиций сотрудников заповедника и географического факультета МГУ при участии студентов.

В работе рассмотрен ключевой участок (рис. 1), расположенный у юго-западных подножий высочайшего кунаширского вулкана Тятя (1819 м) на берегу Тихого океана, и представляющий собой плоскую, слегка всхолмленную, сложенную вулканическими отложениями залесенную равнину. Ключевой участок ограничен с запада и востока руслами сравнительно крупных рек Саратовской и Тятиной соответственно; по территории участка с севера на юг протекают немноговодные водотоки Банный и Кол. Участок находится на территории Государственного природного заповедника Курильский и его охранной зоны. Близ устья р. Саратовская расположен кордон Саратовский, использующийся как перевалочная база при движении на влк. Тятя. По берегу Южно-Курильского прол. Тихого океана проходит вездеходная труднопроходимая дорога с ответвлением на кордон Саратовский. Территория характеризуется слабой изученностью ввиду ее труднодоступности и удаленности.

В основе настоящей работы лежат материалы комплексной экспедиции в северную часть Кунашира, состоявшейся в 2021 г. В ходе проведенных исследований собраны и систематизированы данные описаний почвенных разрезов, растительности и ландшафтов. Всего было выполнено 22 комплексных ландшафтных описания и 54 описания растительных сообществ. В процессе составления предварительной схемы дешифрирования и камеральной обработки собранных материалов использовались снимки сверхвысокого пространственного разрешения со спутника Pleiades-1B, дата съемки 27 сентября 2019 г. Масштаб созданных картографических материалов составляет 1: 20 000.

Географическая характеристика территории

Остров Кунашир принадлежит островам Бол. Курильской гряды, расположенной в акватории Охотского моря. Это самый южный остров, имеющий протяженность 123 км и площадь около 1500 км^2. С востока его омывают воды Тихого океана, на юге от Хоккайдо отделяют Кунаширский прол. и прол. Измены, а на севере от Итурупа — прол. Екатерины. В рельефе выделяются аккумулятивные и ступенчато-аккумулятивные, аккумулятивно-денудационные равнины и плато, вулканические конусы и хребты, а также часть мелкогорий и низкогорий хребта Докучаева. На острове расположено 4 действующих

вулкана. Геологическое строение представлено вулканическим комплексом, в основном четвертичного периода: андезитами, дацитами, а также нерасчлененными образованиями.

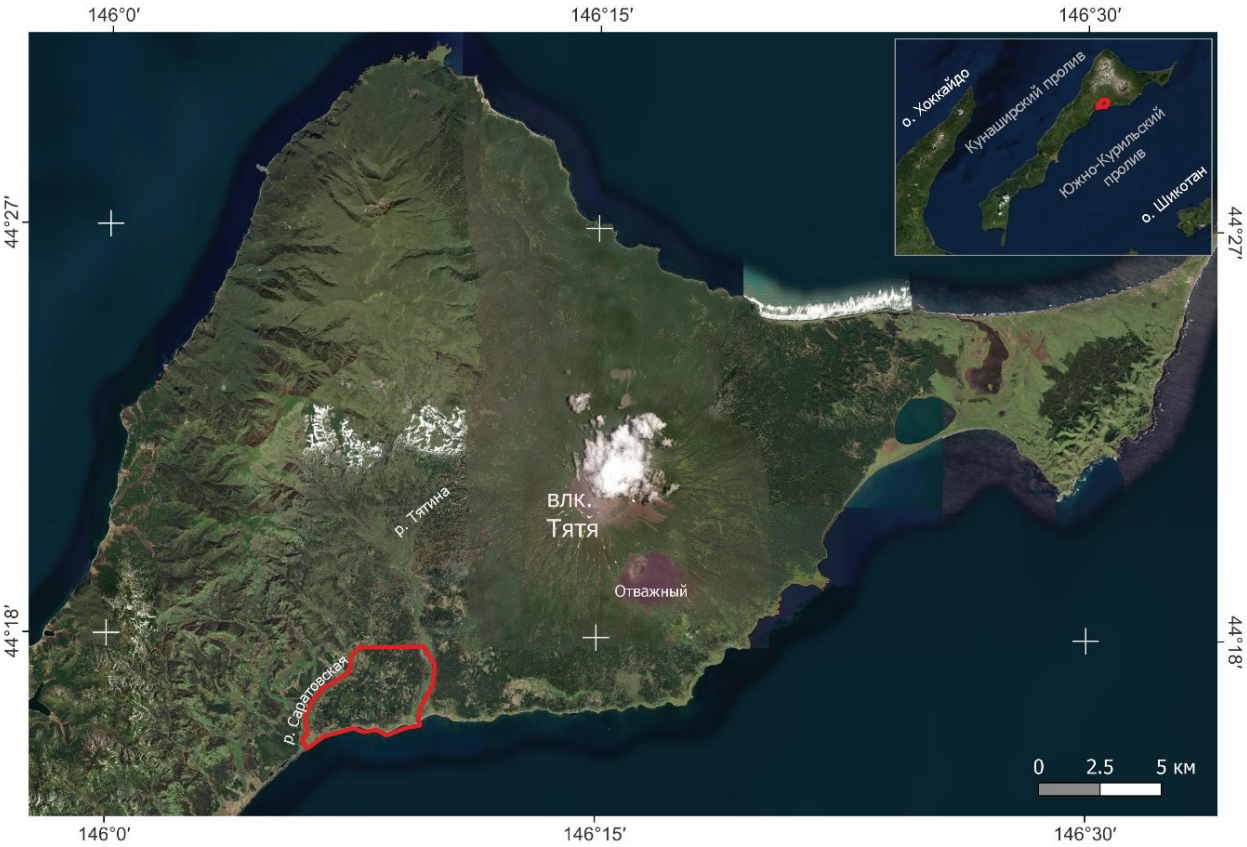


Рис. 1. Положение ключевого («Саратовского») участка. В качестве подложки использована мозаика снимков сверхвысокого разрешения ESRI Satellite
Fig. 1. The position of the key ("Saratovsky") site. A mosaic of ultra-high resolution ESRI Satellite images was used as a background

Рельеф исследуемой территории нетипичен для остального Кунашира. Он выражен в виде пологоволнистых равнин, высота которых не превышает 50 м. Это связано с тем, что рельеф сформировался на отложениях разнообразного генезиса, которые в течение четвертичного периода заполняли понижение между вулканическими постройками вулкана Тятя и хребтом Докучаева. Возраст фундамента из вулканогенно-осадочных пород относится к позднему плиоцену. В это время происходили поднятия суши, которые сопровождались эксплозивным вулканизмом, что привело к накоплению рыхлого материала [Камчатка…, 1974]. В начале плейстоцена территория подверглась значительному опусканию до 600 м, и большая ее часть оказалась под водой. В этот период происходило абразионное выравнивание. Затем территория вновь начала воздыматься, что и продолжается и по настоящее время [Геология СССР…, 1964]. В отличие от междуречной части, приокеаническая зона представлена серией морских террас и береговых валов. Гидрографическая сеть исследуемой территории явлена крупными реками Саратовской и Тятиной, ограничивающими ключевой участок с запада и востока, а также небольшими ключами (Кол, Банный). Безымянные ручьи, как правило, берут свое начало из верховых

болот, расположенных на водоразделе. Реки врезаны слабо в связи с молодостью территории.

Растительность северной части острова, в т. ч. и на рассматриваемом ключевом участке, относится к бореальным сообществам, в то время как растительность южной части — к неморальным [*Воробьев*, 1963; *Баркалов*, 2009]. На «Саратовском» участке в древесном ярусе доминируют темнохвойные: пихта сахалинская (*Abies sachalinensis*), ель Глена (*Picea glehnii*), ель аянская (*Picea jezoensis*). В южной части острова, наоборот, в основном представлены широколиственные породы с обилием южных видов: калопанакс семилопастной (*Calopanax septemlobus*), клен желтый (*Acer ukurunduense*), бархат сахалинский (*Phellodendron sachalinense*), черемуха айнская (*Padus ssiori*), бересклет большекрылый (*Euonimus macroptera*). Такое распределение растительных сообществ и видовой состав связаны с периодическими трансгрессиями и регрессиями, приводившими к появлению перешейков, по которым осуществлялась миграция видов с о. Хоккайдо (на юг Кунашира) и п-ова Камчатка (на север Кунашира).

Согласно исследованиям, положенным в основу Атласа Курильских островов, на Курилах под лесами преобладают дерновые подзолистые почвы, под луговыми сообществами — дерновые луговые, в долинах водотоков — дерновые и болотные [*Корсунская*, 1958]. При рассмотрении в масштабе ключевого участка почвенный покров варьирует следующим образом: под лесными сообществами формируются охристые типичные почвы, под лугами — серогумусовые типичные, в долинах водотоков — аллювиальные, а в случае заболоченности — торфяные олиготрофные слоисто-пепловые [Атлас…, 2009].

Наиболее детальные карты ландшафтов Кунашира (м-б 1: 200 000) выполнены только для южной части острова и ближайших окрестностей влк. Тятя. Карта ландшафтов, охватывающая весь остров, предоставляет существенно более обобщенную информацию (м-б 1: 500 000). Там выделено всего 3 типа ландшафтов. Эрозионно-денудационные низкогорные пологосклонные под темнохвойными лесами на подбурах в сочетании с буроземами занимают все автоморфные позиции. У побережья располагаются аккумулятивные морские террасы двух типов: с лугами и кустарниками на дерновых, местами перегнойно-глеевых почвах; луговые на фрагментарных перегнойных псаммоземах гумусовых [Атлас…, 2009]. Такой уровень обобщения недостаточен для полноценного изучения ландшафтного разнообразия в масштабе ключевого участка.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Во время предполевого этапа было проведено визуальное дешифрирование природных комплексов на основании информации о растительности. Для камеральной работы был привлечен снимок сверхвысокого пространственного разрешения (0,5 м) со спутника Pleiades-1B за 27.09.2019. Доступные каналы включали синий, зеленый, красный и ближний инфракрасный. При дешифрировании внимание уделялось визуальным отличиям, прослеживаемым по снимкам в натуральной цветопередаче и в стандартных псевдоцветах. Различные визуальные свойства растительности и подстилающей поверхности (текстура, цвет, шероховатость, размеры объектов) позволили выделить несколько типов лесов, болот и лугов. На основании выделенных контуров и дополнительных материалов были спроектированы полевые маршруты и намечены точки предполагаемых комплексных и кратких описаний.

На местности выполнены следующие виды работ: а) составлено 54 описания растительности; б) заложено 22 почвенных профиля; в) сделано 22 комплексных ландшафтных описания и 32 картировочных. Комплексные описания были проведены для наполнения выделенных контуров необходимыми сведениями об особенностях рельефа и

почвенно-растительного покрова. Морфологические описания почвенных горизонтов и их свойств позволили определить положение почв в классификации [*Шишов* и др., 2004]. Описание почвенного разреза включало цвет, влажность, механический состав, структуру, плотность, включения, новообразования, переход к нижележащему горизонту и границу. Далее были приведены сведения о почвообразующей породе и некоторых дополнительных признаках (заболоченность, засоленность, вскипание от HCl и др.). Геоботанические описания подразумевали характеристику 4 ярусов растительности для площадки 20×20 м в лесу и 10×10 м на открытой местности: древесного, кустарникового, травяно-кустарничкового, мохово-лишайникового. Для них было указано проективное покрытие, средняя высота, обилие. В древесном ярусе также оценивалась сомкнутость и количество древостоя, диаметр стволов (средний и максимальный), количество подроста, а также был проведен подсчет количества сухих стволов. Для травяно-кустарничкового яруса было определено проективное покрытие и фенологическая фаза каждого вида. Кроме того, было уделено внимание внеярусной растительности с указанием видового состава, высоты, фенологической фазы и проективного покрытия.

Легенда почвенной карты имеет следующую иерархию по степени развитости почв: сначала показаны условно-коренные развитые почвы (серогумусовые), затем интразональные слаборазвитые (псаммоземы) и, наконец, гидроморфные (дерново-глеевые, эутрофно-торфяные). Фрагмент почвенной карты с легендой показан на рис. 2. Вариации серогумусовых почв показаны оттенками коричневого цвета с применением штриховки.

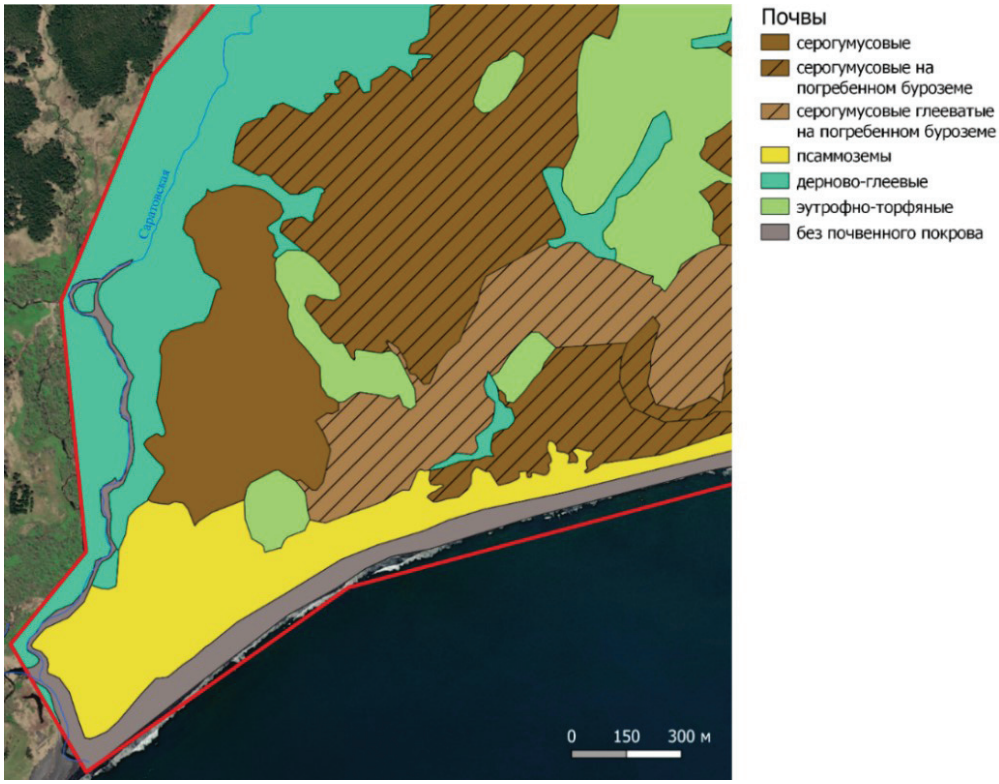
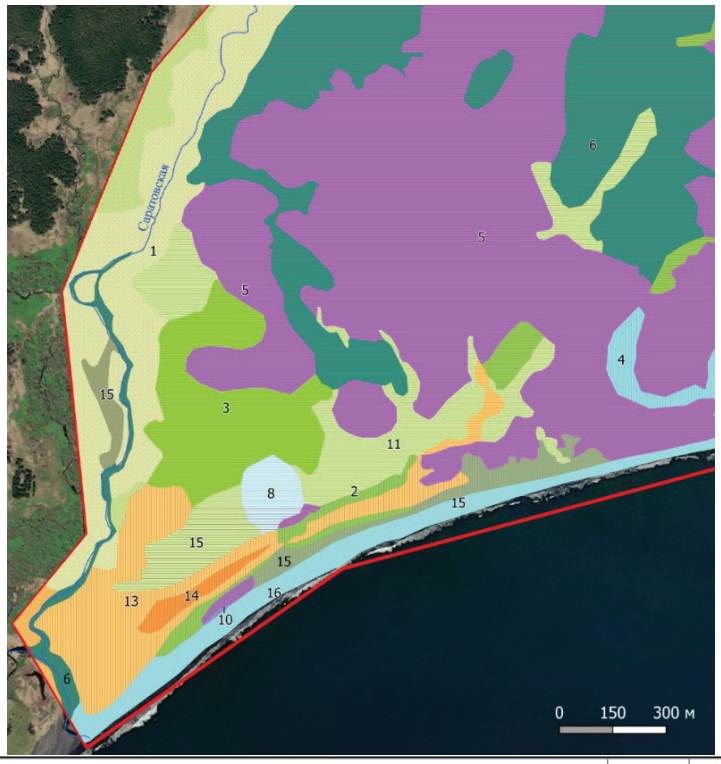


Рис. 2. Фрагмент карты почв «Саратовского» участка
Fig. 2. A fragment of the soil map of the "Saratovsky" key-site

Почвенный и растительный покровы тесно взаимосвязаны. На одном типе почв могут формироваться близкие по потребностям в субстрате растительные сообщества. Как

правило, изменения в растительности соотносятся с переходом к другой почве и наоборот. Для подтверждения этого высказывания следует обратиться к фрагменту карты растительности, представленном на рисунке 3.



			ПТК междуречий	ПТК морских террас	ПТК речных долин	ПТК океанических побережий	номер на карте
А. Бореальная растительность							
1. Мелколиственные леса и редколесья	а. Ивовые *(Salix udensis)*						1
	б. Ольховые *(Alnus hirsuta)* разнотравно-высокотравные						2
	в. Березовые *(Betula Ermanii)*	I. Щитовниковые (*Dryopteris expansa*)					3
		II. Осоковые (*Carex sp.*)					4
2. Темнохвойные леса и редколесья	а. Пихтовые *(Abies sachalinensis)* разнотравно - осоково -						5
	б. Еловые *(Picea glehnia)*	I. Менциезиевые (*Menziesia pentandra*) бамбуково-осоковые (*Sasa kurilensis, Carex sp.*)					6
		II. Осоковые (*Carex sp.*)					7
3. Осоковые болота (*Carex sp.*)							8
4. Луга	а. Прибрежно-водные (*Geum fauriei, Filipendula camtschatica, Phragmites australis*)						9
	б. Приморские (*Leymus mollis*)						10
	в. Высокотравные (*Filipendula camtschatica, Polygonum sachalinense, Cacalia kamtschaticus*)						11
	г. Вейниково-страусниковые *(Calamagrostis langsdorffii, Matteuccia orientalis)*						12
	д. Разнотравные морских террас (*Calamagrostis langsdorfii, Sasa kurilensis*)						13
	е. Кустарниково-разнотравные (*Sasa kurilensis, Juncus sp.*)						14
Б. Субнеморальная растительность							
5. Бамбучники (*Sasa kurilensis*)							15
6. Без растительного покрова							16

Рис. 3. Фрагмент карты растительности «Саратовского» участка
Fig. 3. A fragment of the vegetation map of the "Saratovsky" key-site

На рисунке 4 представлен фрагмент ландшафтной карты. В оригинальной версии легенда выполнена в матричной форме: по горизонтали показана морфолитогенная основа, по вертикали — почвенно-растительный покров. Классификация морфолитогенной основы проводится от водораздельных позиций к береговой зоне. Порядок почвенно-растительного покрова подчиняется этому же принципу: сначала отмечены лесные сообщества на автоморфных почвах, затем болота на торфяных почвах, разные типы лугов на дерново-глеевых, серогумусовых почвах или псаммоземах (в зависимости от типа растительности и характера увлажнения), и наконец, бамбучники на серогумусовых и дерново-аллювиальных почвах. В пересечениях горизонтальной и вертикальной осей ставится номер ПТК, если такая геосистема была обнаружена в ходе полевого обследования. Всего было выделено 37 урочищ и подурочищ.

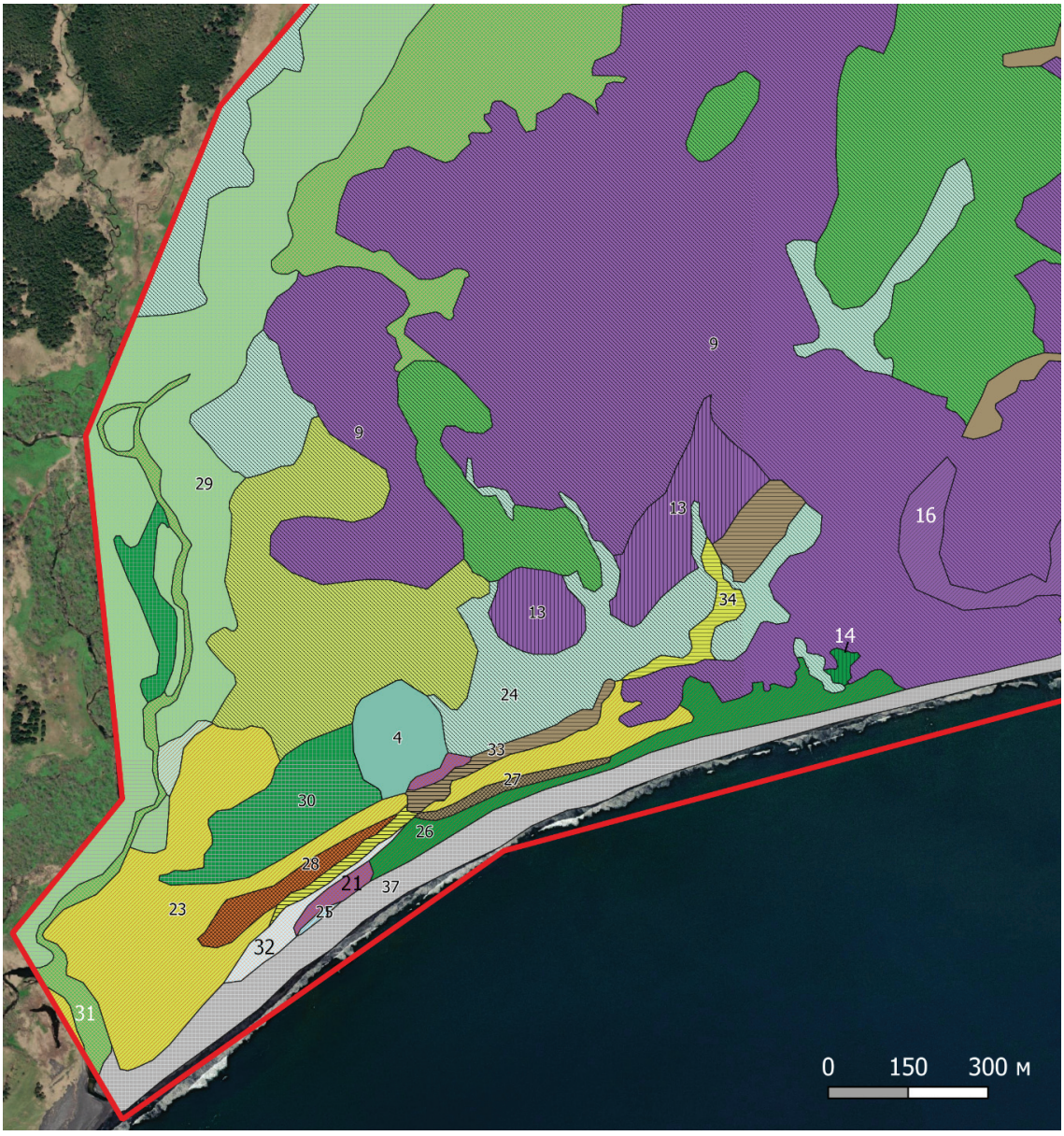


Рис. 4. Фрагмент ландшафтной карты «Саратовского» участка

Урочища и подурочища: ***Кочковатые субгоризонтальные поверхности ступенчато-аккумулятивных морских равнин*** *(3) — под ольховыми разнотравно-высокотравными*

лесами на дерново-глеевых почвах, (4) — под осоковыми болотами на эутрофно-торфяных почвах; ***волнистые субгоризонтальные поверхности ступенчато-аккумулятивных морских равнин*** *(5) — под березовыми щитовниковыми лесами на серогумусовых почвах, (7) — под еловыми менциезиевыми бамбуково-осоковыми лесами на эутрофно-торфяных почвах, (9) — под пихтовыми разнотравно-осоково-щитовниковыми лесами на серогумусовых в сочетании с серогумусовыми почвами на погребенном буроземе, (11) — под высокотравными лугами на дерново-глеевых почвах;* ***волнистые пологие склоны ступенчато-аккумулятивных морских равнин*** *(12) — см. (5), (13) — см. (9), (14) — под бамбучниками на серогумусовых и почвах;* ***волнистые субгоризонтальные поверхности вторых морских террас*** *(16) — см. (9);* ***волнистые субгоризонтальные поверхности первых морских террас с покатыми склонами*** *(21) — см. (9), (23) — под разнотравными лугами на псаммоземах, (24) — см. (11), (25) — под приморскими лугами на серогумусовых почвах, (26) — см. (14),* ***субгоризонтальные поверхности староречий*** *(27) — см. (3), (28) — под кустарниково-разнотравными лугами на дерново-глеевых почвах; волнистые субгоризонтальные поверхности высоких пойм с крутыми склонами (29) — под ивовыми лесами на дерново-глеевых почвах, (30) — под бамбучниками на дерново-аллювиальных почвах;* ***каменистые субгоризонтальные поверхности низких пойм*** *(31) — см. (7), (32) — под прибрежно-водными лугами на псаммоземах; каменистые субгоризонтальные поверхности пойм долин малых водотоков (33) — см. (3), (34) — см. (23); волнистые пологонаклонные поверхности пляжей без почвенно-растительного покрова*

Fig. 4. A fragment of the landscape map of the "Saratovsky" key-site

Landscape units and subunits: ***Hillocky sub-horizontal surfaces of stepped-accumulative marine plains*** *(3) — with alder forb-high-grass forests on sod-gleys, (4) — with sedge eutrophic fens on peats boggy;* ***rolling sub-horizontal surfaces of stepped-accumulative marine plains (5)*** *with birch shield-fern forests on soddy soils, (7) — with spruce menziesia bamboo-sedge forests on peats boggy, (9) — with fir forb-sedge and shield-fern forests on soddy soils in combination with soddy soils on buried brown earth, (11) — with high-grass meadows on sod-gleys;* ***rolling gentle slopes of stepped-accumulative marine plains*** *(12) — qv (5); (13) — qv (9), (14) — with bamboo on soddy soils;* ***rolling sub-horizontal surfaces of second marine terraces*** *(16) — qv (9);* ***rolling sub-horizontal surfaces of first marine terraces with slopes 512°*** *(21) — qv (9), (23) — with forb meadows on psammozems, (24) — qv (11); (25) — with seaside meadows on soddy soils, (26) — qv (14);* ***sub-horizontal surfaces of oxbows*** *(27) — qv (3), (28) — with shrub-forb meadows on sod-gleys;* ***rolling sub-horizontal surfaces of high floodplains with steep slopes*** *(29) — with willow forests on sod-gleys, (30) — with bamboo on sod-alluvial soils;* ***rocky sub-horizontal surfaces of low floodplains*** *(31) — qv (7); (32) — with coastal meadows on psammozems;* ***rocky sub-horizontal surfaces of floodplains of the small streams valleys*** *(33) — qv (3); (34) — qv (23);* ***rolling gently sloping beach surfaces without soil and vegetation cover***

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полевое исследование «Саратовского» ключевого участка включало комплексное описание территории, а именно изучение рельефа, почв, растительности и ландшафтов. Это позволило получить новые данные для крупномасштабного тематического картографирования и повысить степень изученности северной части Кунашира. Ниже приведены основные результаты.

Почвенный покров автоморфных позиций представлен гумусово-аккумулятивными почвами с признаками буроземообразования. Как правило, в них наблюдается погребенный или второй гумусовый горизонт. На первых морских террасах формируются псаммоземы типичные и гумусовые, их профиль однородный и гумусированный. Значительная площадь

на водоразделах занята почвами гидроморфного ряда в связи с высокой степенью заболоченности территории.

В ходе проведенного исследования было установлено, что основными процессами, происходящими в почвах, выступают гумусонакопление (на автоморфных позициях), оглеение и торфообразование (в гидроморфных ПТК). Представлены почвы 3 стволов почвообразования: постлитогенного (серогумусовые, псаммоземы), синлитогенного (дерново-глеевые) и органогенного (эутрофно-торфяные, эутрофно-перегнойно-торфяные) [*Шишов* и др., 2004].

Серогумусовые и серогумусовые почвы на погребенном буроземе формируются в коренных и условно коренных сообществах: на междуречьях под пихтовыми разнотравно-осоково-щитовниковыми лесами, разнотравными лугами. На них хорошо произрастают бамбучники. Мощность серогумусовых (дерновых) горизонтов AY варьируется от 40 до 60 см. Они залегают на среднесуглинистых либо песчаных отложениях (C). В серогумусовых глееватых почвах ввиду тяжелого механического состава нижерасположенных горизонтов дренаж затруднен, в связи с чем формируется подстилочно-торфяной горизонт (O) мощностью 5 см.

Псаммоземы встречаются повсеместно на морских террасах. В их строении отмечен грубогумусовый горизонт (AO), максимальная мощность которого составляет 24 см, и почвообразующая порода (C), представленная песками и супесями. Наличие гумусового горизонта обусловлено распространением прибрежно-водных и разнотравных лугов.

Дерново-глеевые почвы широко распространены на участке исследования. Они маркируют участки с повышенной степенью увлажнения на междуречьях, террасах и поймах. Традиционно выделяют 2 горизонта: дерновый (AY) и почвообразующую породу (C). В данном случае мощность первого варьируется от 15 см под березово-осоковыми лесами до 68 см под высокотравными лугами. У второго образца классический для дерново-глеевых почв набор горизонтов, в то время как в западной части участка строение интереснее за счет наличия 2 пепловых горизонтов мощностью 4 см каждый. Их присутствие объясняется близостью к активному вулкану Тятя. Интересно, что пепловые горизонты были обнаружены еще в 3 разрезах, причем 2 из них расположены ближе к западной части участка (один из которых на первой морской террасе у р. Саратовской), что позволяет говорить о нерегулярном размещении продуктов активности вулкана.

Органогенные почвы широко представлены на верховых болотах и в пределах заболоченных и переувлажненных лесов. На ключевом участке в пределах этих сообществ выделено 2 типа почв — эутрофно-торфяные и эутрофно-перегнойно-торфяные. Первые из них характеризуются наличием эутрофно-торфяного горизонта (TE) мощностью от 10 до 40 см, торфяного горизонта (T) до 50 см либо торфа как породы (TT) мощностью до 55 см. На этих почвах формируются еловые менциезиевые бамбуково-осоковые леса и осоковые болота. Строение профиля эутрофно-перегнойно-торфяных почв подразумевает наличие перегнойных горизонтов (H), мощность которых достигает 58 см. Один из почвенных разрезов, расположенный неподалеку от р. Саратовской, имеет своеобразное строение: изначально его развитие шло по типу развития буроземов с наличием нескольких структурно-метаморфических горизонтов (BM), осложненное перегнойным процессом. Наличие перегноя, вероятно, объясняется перекрытием сверху эутрофно-торфяным горизонтом при общем увеличении влагозапасов, что привело к анаэробным условиям в почвенной толще. На эутрофно-перегнойно-торфяных почвах в сочетании с эутрофно-торфяными произрастают еловые осоковые леса.

Анализ пространственной дифференциации ландшафтов показывает, что основную площадь занимают междуречья. Они представлены ступенчато-аккумулятивными морскими равнинами и склонами на верхнечетвертичных нерасчлененных отложениях.

Почвенно-растительный покров разнообразен и представлен лесными, луговыми сообществами, болотами и зарослями бамбука. Практически вся водораздельная поверхность не имеет уклона и подстилается средними и тяжелыми по механическому составу отложениями, что в совокупности с обильными осадками способствует активизации процесса болотообразования. Наиболее высокие по абсолютной высоте кочковатые и волнистые водораздельные позиции занимают разные типы болот: еловые осоковые леса на эутрофно-торфяных и эутрофно-перегнойно-торфяных почвах, т. е. верховые болота, а также более богатые еловые менциезиевые бамбуково-осоковые леса на эутрофно-торфяных почвах. Коренные леса на основных поверхностях междуречий и их пологих склонах представлены пихтовыми разнотравно-осоково-щитовниковыми лесами на серогумусовых почвах в сочетании с серогумусовыми почвами на погребенном буроземе. Дренаж у данных местообитаний лучше по сравнению с еловыми лесами, о чем свидетельствует их почва, а растительные сообщества богаче. На волнистых междуречных поверхностях и пологих склонах местами встречаются березовые щитовниковые леса на серогумусовых почвах. Они занимают светлые местообитания, например, среди лугов или на опушке. Березовые осоковые леса произрастают на дерново-глеевых почвах неподалеку от болот. Переувлажненные местообитания в пределах междуречий заняты ольховыми разнотравно-высокотравными лесами и кустарниками на дерново-глеевых почвах, которые чередуются с коренными лесами и болотами. Помимо лесных болот, на водоразделах встречаются осоковые болота на эутрофно-торфяных почвах. На них был отмечен подрост ели Глена, в связи с чем через некоторое время они, возможно, трансформируются в еловые осоковые леса.

Луговые сообщества в пределах волнистых поверхностей междуречий представлены вейниково-страусниковыми лугами и высокотравными лугами на дерново-глеевых почвах. Они расположены по краям лесных геосистем, и в центральных частях участка замечены не были: данные луга не продвигаются вглубь из-за высокой сомкнутости крон. На пологих склонах междуречья местами встречаются бамбучники на серогумусовых почвах. Это доминантный вид в сообществах, который быстро вытесняет другие травянистые виды и не является требовательным к богатству почвенного покрова.

По мере продвижения от водораздела к океану междуречья сменяются аккумулятивными морскими террасами на верхнечетвертичных нерасчлененных отложениях. Вторые морские террасы имеют большую абсолютную высоту по сравнению с первыми, однако представлены они только в центральной и восточной частях исследуемой территории. Кроме того, вторые террасы периодически прерываются и затем появляются снова. У восточной границы участка они постепенно переходят в первые морские террасы.

На основных субгоризонтальных выровненных поверхностях вторых морских террас сформированы высокотравные луга на дерново-глеевых почвах. Однако большим разнообразием отличаются волнистые поверхности вторых террас: на опушке, перед коренными темнохвойными лесами, обнаружены березовые осоковые леса на дерново-глеевых почвах. Из луговых сообществ на основных поверхностях и крутых склонах располагаются разнотравные луга на серогумусовых почвах, а также встречаются монодоминантные бамбучники на серогумусовых почвах.

Первые морские террасы протягиваются вдоль всего побережья ниже междуречий или вторых морских террас. Они отличаются большим разнообразием ПТК по сравнению со вторыми морскими террасами. Из лесных сообществ можно выделить пихтовые разнотравно-осоково-щитовниковые леса на серогумусовых почвах в сочетании с серогумусовыми почвами на погребенном буроземе, которые появляются в виде островов среди других комплексов. У подножья крутого склона второй морской террасы отмечены

ольховые разнотравно-высокотравные леса на дерново-глеевых почвах. Они формируются там ввиду избыточного увлажнения за счет своего аккумулятивного положения. Луговые сообщества представлены разнотравными лугами на слаборазвитых псаммоземах и приморскими лугами на серогумусовых почвах, у подножия склонов вторых террас — высокотравными лугами на дерново-глеевых почвах. На первой морской террасе встречаются сообщества бамбучников на серогумусовых почвах.

Речные долины на «Саратовском» участке аккумулятивные на верхнечетвертичных нерасчлененных отложениях. В ходе проведения полевых исследований были выделены комплексы староречий, которые отличаются повышенным увлажнением и богатством растительного покрова. Там сформированы ольховые разнотравно-высокотравные, а также кустарниково-разнотравные луга. Высокие поймы с крутыми склонами характерны для крупных рек, таких как Тятина и Саратовская. Доминантным сообществом там выступают ивовые леса. Для всех перечисленных местообитаний характерны дерново-глеевые почвы. На высокой пойме р. Саратовской часть поверхности занимают бамбучники на дерново-аллювиальных почвах. На низких поймах рек местами отмечены еловые менциезиевые бамбуково-осоковые леса на эутрофно-торфяных почвах, характерные для избыточно влажных каменистых местообитаний. На низких поймах и вдоль русел малых водотоков типичные нелесные сообщества представлены прибрежно-водными лугами на псаммоземах. Долины малых водотоков не занимают больших площадей, и часто их затруднительно обнаружить среди других переувлажненных ПТК. Из лесной растительности для них характерны ольховые разнотравно-высокотравные леса на дерново-глеевых почвах.

ВЫВОДЫ

Проведенные полевые и камеральные исследования позволили подробно изучить особенности «Саратовского» участка о. Кунашир. В частности, обнаружены и исследованы многочисленные гидроморфные комплексы, нетипичные для остальной части острова. Установлено, что переувлажнение значительно влияет на условия и характер формирования почвенно-растительных комплексов. Основные выводы следующие:

1) «Саратовский» участок Кунашира характеризуется высокой степенью гидроморфности: на территории формируются лесные и осоковые болота. Это связано с тяжелым механическим составом отложений и отсутствием уклона на междуречьях (крутизна не превышает 2°).
2) В связи с этим на территории широко представлены почвы гидроморфного ряда: дерново-глеевые, эутрофно-торфяные и эутрофно-перегнойно-торфяные, на которых сформированы влаголюбивые лесные сообщества, болота и влажнотравные луга.
3) Основной фактор дифференциации ландшафтов — рельеф. Наибольшее разнообразие геосистем характерно для участков с различным рельефом и режимом увлажнения. В данном случае это сочетание морских террас и их склонов, долин малых водотоков, староречья.
4) Второстепенные факторы, влияющие на дифференциацию ландшафтов — механический состав почв и наличие повреждений лесов (в результате ветровалов или действий короеда-типографа). Так, первый фактор определяет скорость просачивания влаги, что однозначно связано с заболачиванием. Второй фактор связан с прореживанием лесов, уменьшением затенения и появлением луговых сообществ и кустарников, в частности малины. Упавшие или поврежденные деревья создают новые местообитания для флоры и фауны.

5) Водоразделы заняты коренными лесами и болотами, на морских террасах ближе к водоразделу формируются леса, а ближе к побережью — луга. Вероятно, это связано с режимом увлажнения и деятельностью ветра, который препятствует продвижению лесов к береговой зоне.
6) Пепел влк. Тятя обнаружен только в 4 почвенных разрезах из 27, что свидетельствует о прерывистом покрытии территории продуктами активности вулкана. Более того, не выявлено приуроченности пепловых горизонтов к восточной части «Саратовского» участка, который находится ближе к Тяте.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность коллективу Государственного природного заповедника «Курильский» за помощь в организации полевых и камеральных работ.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their deep gratitude to the staff of the State Natural Reserve “Kuril’sky” for their help in organizing field and cameral work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеева Л.М. Флора о. Кунашир (сосудистые растения). Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. 129 с.

Атлас Курильских островов. М. – Владивосток: ДИК, 2009. 516 с.

Баркалов В.Ю. Флора Курильских островов. Владивосток: Дальнаука, 2009. 468 с.

Воробьев Д.П. Растительность Курильских островов. М. – Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 92 с.

Ганзей К.С. Ландшафты и физико-географическое районирование Курильских островов. Владивосток: Дальнаука, 2010. 214 с.

Ганзей К.С., Иванов А.Н. Ландшафтное разнообразие Курильских островов. География и природные ресурсы, 2012. № 2. С. 87–94.

Геология СССР. Т. XXXI — Камчатка, Курильские и Командорские о-ва. Ч. 1: Геологическое описание. М.: Недра, 1964. 733 с.

Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 182 с.

Грищенко М.Ю., Гаврилова В.И., Карпачевский А.М., Петровская А.Ю., Леонова Г.М. Изучение и картографирование почв и ландшафтов п-ова Весловский (о. Кунашир, Курильские о-ва). Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2018. № 1. С. 63–69.

Грищенко М.Ю., Устюхина А.В. Дешифрирование и картографирование проявлений вулканической и поствулканической активности по тепловым космическим снимкам высокого пространственного разрешения. Геодезия и картография, 2019. № 11. С. 56–64.

Грищенко М.Ю., Хлюстова В.В., Изюмникова Е.А., Калимова И.В. Изучение и картографирование почв южной части охотоморского сектора о. Кунашир, Курильские о-ва. Геодезия и картография, 2021. № 3. С. 19–27.

Грищенко М.Ю., Шишкин В.С. Создание крупномасштабных и среднемасштабных геоморфологических карт о. Кунашир (Курильские о-ва). Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2020. № 4. С. 423–434.

Ивлев А.М., Таргульян В.О., Куликов А.В. Почвы о. Кунашир. Почвенный покров Дальнего Востока. Владивосток: Изд-во ДВО АН СССР, 1982. С. 30–49.

Камчатка. Курильские и Командорские о-ва. История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. М.: Наука, 1974. 437 с.

Короткий А.М., Разжигаева Н.Г., Гребенникова Т.А., Ганзей Л.А., Мохова Л.М., Базарова В.Б., Сулержицкий Л.Д., Лутаенко К.А. Голоценовые отложения и палеогеография о. Кунашир (Курильские о-ва). Тихоокеанская геология, 1999. Т. 18. № 1. С. 25–40.

Корсунская Г.В. Курильская островная дуга. Физико-географический очерк. М.: Географгиз, 1958 г. 224 с.

Лашков А.Н. К морфологии почв южных Курильских островов. Известия Всесоюзного географического общества, 1948. Т. 80. С. 61–68.

Мархинин Е.К. Вулканы о. Кунашир. Труды Лаборатории вулканологии АН СССР. № 17. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 64–155.

Мелекесцев И.В. Основные этапы формирования современного рельефа Курило-Камчатской области. Камчатка, Курильские и Командорские о-ва. М.: Недра, 1974. С. 337–344.

Разжигаева Н.Г., Гребенникова Т.А., Базарова В.Б., Сулержицкий Л.Д., Ганзей Л.А., Пушкарь В.С., Чернов А.В. Континентальный поздний плейстоцен о. Кунашир (Курильские о-ва). Тихоокеанская геология, 2000. Т. 19. № 2. С. 73–86.

Фураев Е.А. Геохимия ландшафтов о. Кунашир (Курильские о-ва). М.: Прометей, 2013. 180 с.

Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

REFERENCES

Alekseeva L.M. Flora of Kunashir Island (vascular plants). Vladivostok, Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR, 1983. 129 p. (in Russian).

Atlas of the Kuril Islands. Moscow − Vladivostok: DIK, 2009. 516 p. (in Russian).

Barkalov V.Yu. Flora of the Kuril Islands. Vladivostok: Dalnauka, 2009. 468 p. (in Russian).

Furaev E.A. Geochemistry of Landscapes of Kunashir Island (Kuril Islands). Moscow: Prometey, 2013. 180 p. (in Russian).

Ganzey K.S. Landscapes and physical-geographical zoning of the Kuril Islands. Vladivostok: Dalnauka, 2010. 214 p. (in Russian).

Ganzey K.S., Ivanov A.M. Landscape diversity of the Kuril Islands. Geography and Natural Resources, 2012. No. 2. P. 87–94 (in Russian).

Geology of the USSR. V. XXXI — Kamchatka, Kuril and Commander Islands. Part 1: Geological description. Moscow: Nedra, 1964. 733 p. (in Russian).

Gorshkov G.S. Volcanism of the Kuril Island Arc. Moscow: Nauka, 1967. 182 p. (in Russian).

Grishchenko M.Yu., Gavrilova V.I., Karpachevskiy A.M., Petrovskaya A.Yu., Leonova G.M. Study and mapping of soils and landscapes of the Veslovsky Peninsula (Kunashir Island, Kuril Islands). Izvestia vuzov “Geodesy and aerophotosurveying” (Proceedings of the Higher Educational Institutions), 2018. No. 1. P. 63–69 (in Russian).

Grishchenko M.Yu., Khlyustova V.V., Izyumnikova E.A., Kalimova I.V. Study and mapping of soils in the southern part of the Sea of Okhotsk sector of Kunashir Island, Kuril Islands. Geodesy and Cartography, 2021. No. 3. P. 19–27 (in Russian).

Grishchenko M.Yu., Shishkin V.S. Creation of large-scale and medium-scale geomorphological maps of Kunashir Island (Kuril Islands). Izvestia vuzov "Geodesy and aerophotosurveying" (Proceedings of the Higher Educational Institutions), 2020. No. 4. P. 423–434 (in Russian).

Grishchenko M.Yu., Ustyukhina A.V. Interpretation and mapping of manifestations of volcanic and post-volcanic activity from thermal satellite images of high spatial resolution. Geodesy and Cartography, 2019. No. 11. P. 56–64 (in Russian).

Ivlev A.M., Targulyan V.O., Kulikov A.V. Soils of Kunashir Island. Soil cover of the Far East. Vladivostok: Far Eastern Department of the Academy of Sciences of the USSR, 1982. P. 30–49 (in Russian).

Kamchatka. Kuril and Commander Islands. The history of the development of the relief of Siberia and the Far East. Moscow: Nauka. 1974. 437 p. (in Russian).

Korotky A.M., Razjigaeva N.G., Grebennikova T.A., Ganzey L.A., Mokhova L.M., Bazarova V.B., Sulerzhitsky L.D., Lutaenko K.A. Holocene deposits and paleogeography of Kunashir Island (Kuril Islands). Geology of the Pacific Ocean, 1999. V. 18. No. 1. P. 25–40 (in Russian).

Korsunskaya G.V. Kuril Island Arc. Physico-geographical essay. Moscow: Geografgiz, 1958. 224 p. (in Russian).

Lashkov A.N. On the morphology of soils of the southern Kuril Islands. Izvestiya Vsesoyuznogo Geograficheskogo Obshestva (News of All-Union Geographical Society), 1948. V. 80. P. 61–68 (in Russian).

Markhinin E.K. Volcanoes of Kunashir Island. Proceedings of the Laboratory of Volcanology of the Academy of Sciences of the USSR. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1959. No. 17. P. 64–155 (in Russian).

Melekestsev I.V. The main stages in the formation of the modern relief of the Kuril-Kamchatka region. Kamchatka, Kuril and Commander Islands. Moscow: Nedra, 1974. P. 337–344 (in Russian).

Razjigaeva N.G., Grebennikova T.A., Bazarova V.B., Sulerzhitsky L.D., Ganzey L.A., Pushkar V.S., Chernov A.V. Continental Late Pleistocene of Kunashir Island (Kuril Islands). Russian Journal of Pacific Geology, 2000. V. 19. No. 2. P. 73–86 (in Russian).

Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. Classification and diagnostics of Russian soils. Smolensk: Ojkumena, 2004. 342 p (in Russian).

Vorobyov D.P. Vegetation of the Kuril Islands. Moscow – Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1963. 92 p. (in Russian).

УДК: 528.8 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-452-464**

И.А. Рыльский[1], М.С. Малеванная[2], М.В. Грибок[3], А.Н. Панин[4]

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ДАННЫМ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

Растительность является одним из наиболее важных компонентов географической среды. Создание карт растительности и определение ее характеристик — распространенная задача при ведении лесохозяйственной деятельности. При создании карт наиболее крупных масштабов возникает задача определения параметров отдельных деревьев — их высот, диаметров крон, координат положения стволов в пространстве (т. наз. подеревная съемка). Существующие наземные технологии решения этой задачи дороги и малопроизводительны. Космические средства съемки не обеспечивают приемлемого результата. Аэрофотосъемка также мало подходит для решения данной задачи (по ряду причин). Наиболее перспективным является применение метода воздушного лазерного сканирования с использованием не слишком плотных облаков точек лазерных отражений (4–8 точек на 1 м^2), что позволяет обеспечить подобными данными значительные (до нескольких млн га леса в год на одну систему) площади лесов. Выполнение съемок с большей плотностью (в т. ч. с применением беспилотных летательных средств) представляется нерациональным по причине невозможности прямых измерений стволов деревьев и низкой производительности. Исследование проведено на тестовой территории в регионе Северного Кавказа (Республика Адыгея) по данным съемочных работ 2022 г., осень). Данная работа посвящена разработке и оценке результатов использования методики определения параметров отдельных деревьев. Для этого предлагается использовать типовые функции анализа рельефа и гидрологического моделирования в сочетании с фильтрацией данных с использованием статистических функций в пределах скользящего окна. Анализ ведется с использованием регулярно-ячеистой модели относительных высот деревьев. Итоговым результатом работы является точечный векторный ГИС-слой, где плановое положение точки соответствует положению ствола дерева, а его высота и диаметр кроны записаны в таблице атрибутов. Итоговые результаты после сплошной визуальной проверки по регулярно-ячеистой модели данных и выборочной ручной проверки с использованием ортофотопланов и исходных точек лазерных отражений можно оценить как приемлемые, но нуждающиеся в дальнейшем совершенствовании методики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аэрофотосъемка, древесная растительность, лидар, ГИС, лесотаксация

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail:* **rilskiy@mail.ru**

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail:* **malevannaya_m@mail.ru**

[3] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail:* **gribok.marina@gmail.com**

[4] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail:* **alex_panin@mail.ru**

Ilya A. Rylskiy[1], **Marina S. Malevannaya**[2], **Marina V. Gribok**[3], **Alexandr N. Panin**[4]

DETERMINATION OF THE GEOMETRIC PARAMETERS OF VEGETATION USING AIRBORNE LASER SCANNING DATA

ABSTRACT

Vegetation is one of the most important components of the geographic environment. Creating vegetation maps and characterizing vegetation is a common task in forest management. When creating maps of the largest scales, the problem arises of determining the parameters of individual trees — their heights, crown diameters, coordinates of the position of trunks in space (the so-called tree-by-tree survey). Existing ground-based technologies for solving this problem are expensive and inefficient. Satellite imagery do not provide an acceptable result. Aerial photography is also not very suitable for solving this problem (for a number of reasons). The most promising is the use of airborne laser scanning using not too dense clouds of points of laser reflections (4–8 points per 1 m^2), which makes it possible to provide such data with significant (up to several million hectares of forest per year per system) forest areas. Performing surveys with a higher density (including using unmanned aerial vehicles) seems to be irrational due to the impossibility of direct measurements of tree trunks and low productivity. The study was conducted on a test area in the North Caucasus region (Republic of Adygea) according to survey data from 2022 (autumn). This work is devoted to the development and evaluation of the results of using the methodology for determining the parameters of individual trees. To do this, it is proposed to use typical functions of relief analysis and hydrological modeling in combination with data filtering using statistical functions within a sliding window. The analysis is carried out using a regular-cell model of relative tree heights. The final result of the work is a point vector GIS layer, where the planned position of the point corresponds to the position of the tree trunk, and its height and crown diameter are recorded in the attribute table. The final results after a complete visual check on a regular cell data model and a selective manual check using orthomosaics and initial points of laser reflections can be assessed as acceptable, but in need of further improvement of the methodology.

KEYWORDS: airborne imagery, remote sensing, GIS, LIDAR, forest inventory

ВВЕДЕНИЕ

Цели и проблематика определения геометрических параметров растительности

Растительность — один из важнейших компонентов географической среды. Картографирование растительности и ее свойств — одна из широко распространенных задач в картографии и топографии. Если на картах м-ба 1: 25 000 и мельче растительность и ее характеристики приводятся в обобщенном виде (контур растительности, состав), то на материалах более крупного масштаба возникает необходимость картографирования отдельных групп деревьев, отдельных деревьев и их параметров. Наиболее подробные сведения приводятся на материалах подеревной съемки (м-б 1: 500 или 1: 200), где наносятся сведения о центрах осей стволов, диаметре стволов, крон, высоте деревьев и пр. информация. При выполнении работ по лесотаксации, особенно лесотаксации 1 разряда,

[1] M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **rilskiy@mail.ru**

[2] M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **malevannaya_m@mail.ru**

[3] M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **gribok.marina@gmail.com**

[4] M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **alex_panin@mail.ru**

также необходим учет сведений о деревьях для оценки объемов деловой древесины, биомассы, планирования мероприятий по улучшению леса (осветляющие рубки и т. п. действия). Сведения о геометрических параметрах отдельных деревьев часто необходимы и при выполнении проектных работ в туристических районах. Наиболее частые виды деятельности с использованием этих материалов предполагают обустройство или реконструкцию парковых зон, вписывание новой застройки в существующую растительность (создание эко-отелей или экопоселений), планирование горнолыжных трасс, пешеходных маршрутов и пр.

Существующие традиционные методы измерений геометрических параметров деревьев и их недостатки

Поскольку вышеупомянутые задачи далеко не новы, исторически сложились несколько подходов к решению данной задачи. Тем не менее, каждый из них обладает рядом очень существенных недостатков.

Наиболее старым и точным традиционно считается **ручной метод**. Он применяется в настоящее время для целей лесотаксации на участках тестовых рубок или при эталонных замерах, он же используется и для подеревной съемки при выполнении топографических работ наивысшей детальности. Помимо очевидной трудоемкости метода (когда производительность работ одной бригады измеряется десятыми долями гектара в день), метод обладает и рядом технологических недостатков. Среди них:

- невозможность применения высокоточного спутникового позиционирования в лесу;
- затрудненность привязки с помощью тахеометров в лесу ввиду плохого обзора;
- невозможность измерения высот деревьев в лесу при высокой сомкнутости крон;
- затрудненность наблюдения вершины дерева снизу в условиях леса;
- стволы деревьев могут быть не вертикальны;
- субъективность при измерении диаметра ствола (ствол никогда не имеет идеально круглого сечения, обладает выступами и наростами).

В лесотаксации распространенным подходом является **работа с использованием ортофотопланов** (получаемых по материалам воздушных или космических съемок) в видимом или ближнем инфракрасном диапазоне. В этом случае наиболее распространенной проблемой является тот факт, что ортофотопланы строятся с использованием сведений о рельефе (радарная модель местности SRTM либо модели рельефа с топографических карт). При этом не учитывается смещение верхушек крон, возникающее из-за высоты самих деревьев. Например, при высоте дерева в 20 м и использовании фотокамеры с углом охвата 60° смещение верхушки дерева на краю кадра может составлять до 10 м.

Возможным вариантом решения этой проблемы является использование не одиночных снимков и модели рельефа, а стереоданных. В этом случае необходимо построить полноценный фотограмметрический блок, в стереорежиме создать цифровую модель видимой поверхности деревьев, и уже эту поверхность использовать для оценки планового положения дерева. Однако и в первом, и во втором случае вопрос определения собственно высоты дерева является открытым, т. к. в первом случае известна (причем с крайне невысокой точностью — около 5–7 м по высоте) отметка рельефа, но неизвестна высота дерева, а во втором случае нет модели рельефа. В случае совмещения и ЦМР (цифровая модель рельефа), и ЦМП (цифровая модель поверхности) получаемый результат в виде высот деревьев содержит в себе как погрешность рельефа, так и погрешность стереомоделирования. Так, при использовании топографической карты м-ба 1: 25 000 с шагом горизонталей в 10 м ожидаемая точность ЦМР составит около ½ сечения рельефа, т. е. 5 м. При использовании космической стереосъемки с детальностью 50 см ожидаемая

точность стереомодели составит около 1,5 м. Итоговая погрешность определения высот деревьев в данном примере составит в пределе до 6,5 м, что неприемлемо. Конечно, при использовании аэрофотосъемки качество стереомодели возрастает, однако проблема определения высот подстилающей поверхности не решается никак — в залесенной местности высота рельефа достоверно определена быть не может. Очевидно, что определить диаметр ствола с использованием подобных методов также невозможно ввиду его невидимости на данных съемок в видимом диапазоне.

Применяемый в лесотаксации метод осредненного измерения диаметров крон на основании визуальных оценок текстуры снимков и последующего районирования территории по этому параметру является крайне субъективным и допускает очень большой (в несколько раз) разброс параметров даже в пределах одного контура, заявленного как однородный.

Современные источники данных для определения геометрических параметров древесной растительности

В последние 20 лет в области изучения геометрических параметров древесной растительности произошли позитивные изменения, связанные с появлением метода воздушного лазерного сканирования. Метод лазерного сканирования (лидар, LIDAR) основан на измерении дальности по времени прохождения очень короткого лазерного импульса в видимом или ближнем инфракрасном диапазоне и аппаратном измерении элементов внешнего ориентирования источника этого импульса в момент испускания [*Haala*, 1998]. Результатом измерения является одна или несколько трехмерных точек, соответствующих координатам некоторой поверхности, от которой отразился лазерный луч. В упрощенном понимании, лазерный сканер работает аналогично радару, но не в радио-, а в видимом или ближнем инфракрасном диапазоне, и использует не широкое поле излучения, а узкий сфокусированный луч.

Принципиальным отличием данного метода от всех прочих является возможность проникновения сквозь несплошные объекты (например, кроны деревьев) испущенного импульса лазерного излучения с последующим формированием нескольких последовательно возвращающихся и регистрируемых отражений. Так, при попадании вертикального луча в крону дерева (сверху) первое отражение придет от видимой поверхности кроны, далее — по мере прохождения импульса сквозь крону — ряд отражений будут сформированы ветвями, и последним отражением будет отражение от земли (грунта). Это позволяет в рамках одного измерения получить как координаты внешней, так и подстилающей поверхности [*Lohr*, 1997]. При наличии значительного количества точек лазерных отражений, равномерно и часто распределенных по поверхности дерева, возможно достаточно детальное (на уровне первых дециметров) построение модели кроны, ее внутреннего строения (не всегда) и точное построение подстилающего рельефа.

Скорость современных лазерных сканеров составляет от десятков тысяч до миллионов точек лазерных измерений в секунду. Современные лазерные сканеры делятся на статические и кинематические системы. Первые по принципу действия схожи с роботизированными тахеометрами, превосходя их в скорости в сотни и даже тысячи раз. Дальность действия подобных приборов достигает нескольких км (например, для Riegl VZ4000 максимальная измеренная дальность составляет свыше 10 700 м), что, впрочем, в условиях леса является нереализуемым преимуществом. Работа всегда ведется со статической позиции [*Рыльский, Малеванная*, 2014], далее сканер переставляется (на штативе) на новую точку, и так — до полного покрытия территории данными. Использование лидарного сканирования систем для сканирования лесов возможно, но в большинстве случаев нерационально ввиду низкой производительности метода. Тем не менее, при работе в городских парках, лишенных подлеска, применение этих систем дает

наилучшие и наиболее точные результаты. Плотность подобных измерений доходит до 3000–5000 точек на 1 м^2, точность измерений — 3–6 мм. Подобные данные позволяют полностью описать сколь угодно сложную структуру дерева и сколь угодно кривой ствол.

Более производительным методом является кинематическое лазерное сканирование. Работа в этом случае ведется непрерывно, без остановок и пауз. Для определения элементов внешнего ориентирования используются бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) на базе волоконно-оптических гироскопов и акселерометров. В зависимости от класса точности системы погрешность угловых измерений составляет от 0,003° до 0,05°. Для коррекции результатов измерений БИНС используются либо ГНСС-системы (ГЛОНАСС, GPS), либо SLAM-алгоритмы (в основном при работе в закрытых средах или в лесах). Скорость подобных систем также составляет от нескольких десятков тысяч до нескольких миллионов измерений в секунду, однако за счет непрерывности измерений и постоянной смены ракурса производительность оказывается в десятки и сотни раз выше, чем при использовании статического лазерного сканирования. Платой за это является более низкая точность (2–5 см) и плотность съемки. Она колеблется от 1–4 точек на 1 м^2 для низкоплотного авиационного сканирования до 100–500 точек на 1 м^2 для переносных мобильных лазерных сканеров для съемки пешком. Именно с помощью подобных систем и производится в настоящее время съемка лесов.

В качестве платформы-носителя для кинематической лазерной системы может выступать человек (несущий ее в руке, масса до 2–3 кг), автомобиль или квадроцикл (на который она ставится сверху), беспилотный летательный аппарат (мультикоптер, самолет, вертолет) или пилотируемое воздушное судно (самолет, вертолет, автожир, мотопараплан и им подобные). По мере роста скорости и высоты полета воздушного судна происходит падение плотности данных и рост производительности съемки. Так, БПЛА с высоты 80–90 м может обеспечить плотность до 50–150 точек на 1 м^2 с производительностью 300–500 га/сут., а тяжелая лазерная система с дальностью действия в 2000–3000 м, летящая со скоростью около 250 км/ч, может обеспечить плотность на уровне 10–15 т/м^2 при производительности около 150 000 га/сут. Отметим, что для картографирования кроны дерева и определения его геометрических параметров в целом достаточно плотности сканирования на уровне 2–3 точки на 1 м^2 [*Рыльский*, *Тикунов,* 2016].

Данные лазерного сканирования всегда сопровождаются одновременно производимой фотосъемкой (наземной или воздушной) [*Allen*, 2003]. Результатом этих съемок при работе с воздуха является ортофотоплан. При этом отметим, что поскольку лазерное сканирование позволяет получить с точностью лучше 10 см отметки высот как истинного рельефа, так и видимой поверхности кроны, то это дает возможность построить ортофотоплан, на котором плановое положение крон истинно. Кроме того, используя методы картографической алгебры [*Капралов*, 2004], возможно построить поверхность, представляющую собой разность высот между видимой поверхностью, включая кроны, и поверхностью рельефа. Полученная модель разностей высот будет фактически моделью относительных высот растительности, что позволяет определить и высоты отдельных деревьев. Габариты каждой кроны в трехмерном пространстве позволяют определить ее диаметр. Единственно, что по-прежнему не может быть определено при работе с воздуха — это диаметр ствола, поскольку гарантированной передачи формы ствола не дает ни один из вариантов съемки с использованием лазерного сканирования.

Предлагаемый подход к решению задачи и используемые для этого данные

Как уже было отмечено выше, авиационные методы лазерного сканирования являются наиболее производительными, при этом итоговая производительность напрямую зависит от итоговой плотности сканирования, скорости и высоты полета. В зарубежных и

отечественных источниках представлено большое число публикаций, где рассматривается возможность использования данных съемок с БПЛА с плотность 50–150 точек на 1 м^2 для решения вышеперечисленных задач. Несмотря на традиционные заявления об успешности достигнутых результатов, все они отличаются двумя недостатками:

- параметры ствола недоступны для прямых измерений при любых плотностях сканирования (ствол просто не виден, или видна его приблизительная ось);
- производительность съемок с такими параметрами крайне мала, а себестоимость съемок и моделирования деревьев на площади в 1 га — очень велика, и не может представлять практического интереса для целей лесотаксации или подеревной съемки на значительных (десятки и сотни километров) территориях.

На практике значимо низкая себестоимость работ наблюдается при использовании носителей со скоростями 160–280 км/ч и плотности сканирования 3–10 точек на 1 м^2, что обеспечивает возможность съемки до 20 тыс. га в день. Таким образом, практически значимый результат может представлять методика, основанная на использовании именно таких данных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор участка и получение данных

В качестве тестового участка для отработки вышеописанной концепции была выбрана территория существующих и проектируемых горно-туристических комплексов в районе плато Лагонаки. Объект съемки расположен на территории Республики Адыгеи (рис. 1).

Район включает в себя предгорные ландшафты Кавказа. Для наполнения данными модели были использованы материалы залета 2022 г., съемка выполнена в начале ноября, после опадания листвы.

В настоящее время на территории создания модели наблюдается очень высокая активность в части развития горно-туристических кластеров и сопутствующей прилежащей селитебной инфраструктуры с целью увеличения потока отдыхающих во все сезоны года.

Климат региона — умеренный, со слабо выраженной высотной поясностью. Территория частично покрыта лесами смешанного типа, что хорошо видно на ортофотоплане. В ходе выполнения работ было отснято около 1700 га. Местность характеризуется высокорасчлененным рельефом, обилием крутых склонов и скальных сбросов (рис. 2). Работа традиционными наземными способами для определения параметров растительности весьма затруднена.

Лазерное сканирование выполнялось с использованием лазерного сканера Riegl Q560, использовалась цифровая фотокамера IGI DigiCam 60 (среднеформатная авиационная камера с разрешением матрицы в 60 Мп) в режиме RGB.

Залет производился по системе параллельных треков, продольное перекрытие фотоснимков составило 60 %, поперечное — от 30 до 55 % (аналогично и для лазерного сканирования).

Аэрофотосъемка и лидарное сканирование производились одновременно. Работа велась с высот 350–800 м над поверхностью рельефа. Разрешение фотоснимков составило от 5 до 10 см, плотность лазерного сканирования — 5,5 точек на 1 м^2. Это соответствует требованиям м-ба 1: 100 и 1: 2 000 с запасом по детальности и плотности сканирования.

Система координат и высот проекта — WGS 84, проекция UTM (зона 37), высоты — эллипсоидальные. В целом выбор системы координат не оказывает никакого влияния на конечные результаты классификации.

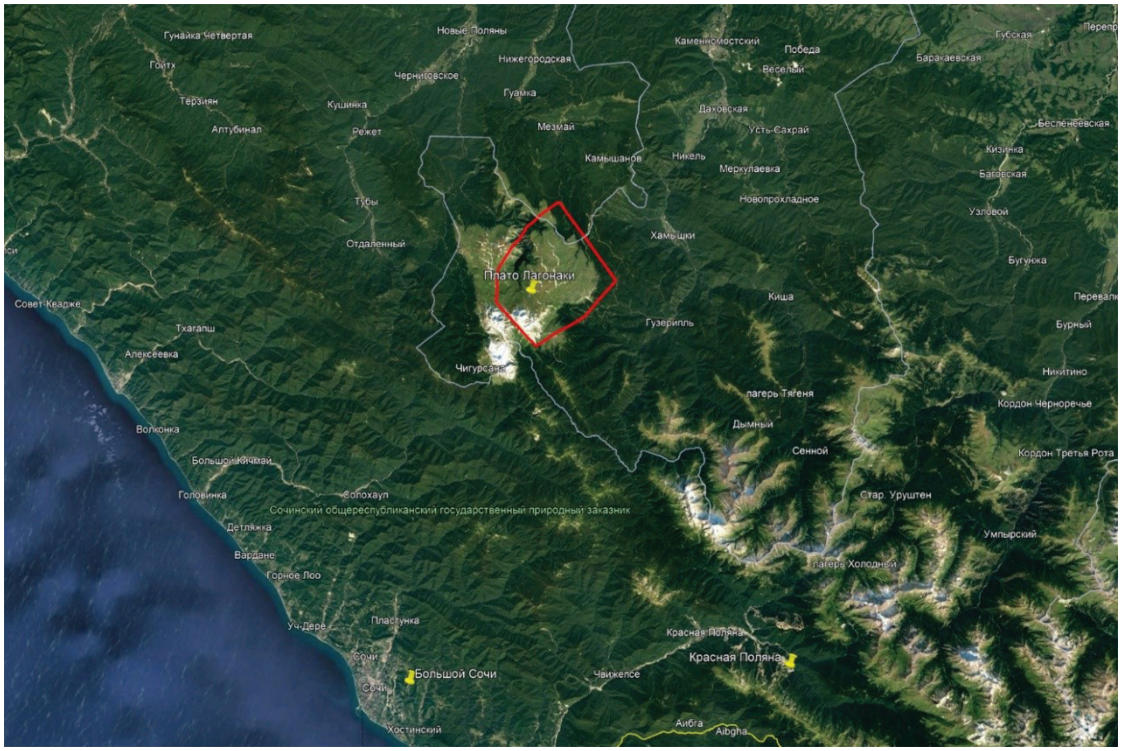


Рис. 1. Районы выполнения съемок и моделирования деревьев (красный контур)
Fig. 1. Airborne laser scanning and tree modelling areas (red outline)

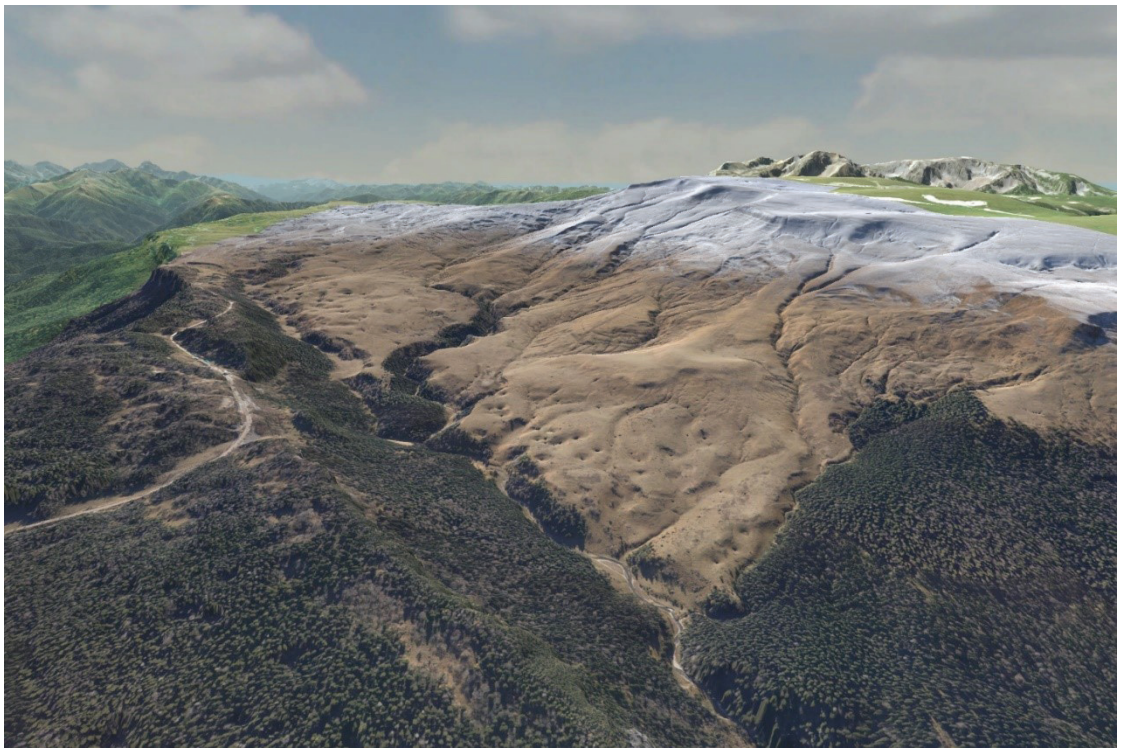


Рис. 2. Вид на территорию плато Лаго-Наки. Виртуальное моделирование с использованием данных съемки 2022 г.
Fig. 2. Virtual model view on Lago-Naki plateau. Virtual model made using airborne laser scanning data surveyed in 2022

Отличительной и крайне важной для последующих рассуждений чертой лазерных сканеров Riegl начиная с 560-й модели является возможность обеспечения полностью равномерного распределения точек лазерных отражений при максимальной частоте сканирования. Подобной функцией не располагают сканеры с синусоидальной, пилообразной и круговой разверткой, что существенно ограничивает их возможности при выполнении работ, аналогичных описанным в данной статье. В данном проекте среднее расстояние между точками в строке сканирования и между строками сканирования (использовалось сканирование по параллельным строкам) было принято исходя из запланированной средней плотности сканирования 5 точек на 1 м^2, скорости носителя в 165 км/ч и составило 45 см как по оси залета, так и поперек нее.

Выбор программной среды для разработки методики определения геометрических параметров древесной растительности

Для оценки геометрических параметров деревьев в данной работе был использован подход, в котором не делается попыток описания конкретной формы кроны дерева какой-либо идеальной геометрической формой (конус, цилиндр, параболоид вращения и т. п.). Вместо этого предлагается вычислить поверхность относительных высот деревьев над землей, зеркально отразить ее (так, что вершины деревьев становятся котловинами, а границы их крон — водораздельными поверхностями). После этого задача сводится к определению областей замкнутого стока, которые соответствуют в плане и по высоте (с обратным знаком) плановым координатам центра ствола и высоте дерева. Водосборный бассейн в данном случае будет соответствовать проективной площади кроны, параметры его (площадь, ширина/высота) будут соответствовать аналогичным параметрам кроны. В качестве проверочной меры может быть использован либо метод визуального ручного дешифрирования этих же материалов аэросъемки специалистом, либо полевая проверка. И тот, и другой метод, несмотря на вышеописанную субъективность, считается полностью пригодным для решения этой задачи. В случае получения схожих или идентичных результатов это можно считать критерием правильности представленного подхода.

После выполнения залета, расчета траектории и вывода исходных фотоснимков точки лазерных отражений были координированы и выведены в систему координат и высот проекта с использованием программного комплекса Riprocess. Результатом данного процесса явилось облако точек в формате LAS, исходные снимки с элементами внутреннего и внешнего ориентирования (измерены аппаратно с помощью бортовой БИНС).

В дальнейшем в данной работе использовались два семейства программных продуктов. Первое — для работы с точками лазерных отражений и построения ортофотопланов, второе — для работы с ГИС-слоями данных и моделирования древесной растительности.

Для первой группы задач было принято решение об использовании пакета программных модулей TerraSolid — использованы модули TerraScan (классификация, сегментация точек), TerraPhoto (создание ортофотопланов и мозаик), TerraModel (для создания GRID-моделей по точкам лазерного сканирования). Для второй группы задач был использован пакет ArcView и дополнительные программные модули, написанные авторами на языке Avenue.

Полученное в ходе залета облако точек было классифицировано [*Chen*, 2007] автоматизированным способом (с использованием программного обеспечения TerraSolid) на классы «Земля», «Растительность», «Прочие точки». Классификация растительности производилась по критерию высоты относительно поверхности рельефа. В анализ принимались точки с относительной высотой выше 2 м над уровнем земли (растительность высотой менее 2 м не относится к деревьям и не является предметом анализа.

Полученные два класса точек — «Земля» и «Растительность» — были экспортированы в ГИС-формат ArcInfo GRID (далее — просто «грид»). Каждое облако точек экспортировалось в абсолютной системе координат и высот [*Gorgens*, 2017]. Для экспорта каждого класса точек использовались различные алгоритмы. Так, класс точек «Земля» был экспортирован как результат триангуляции Делоне, конвертированный в растровую форму. Класс точек «Растительность» был экспортирован как прямая растеризация точек по принципу: если в пиксел грида попадает одна или несколько точек — он экспортируется с высотой, максимальной из этих точек.

Учитывая, что шаг точек при съемке был равен 0,45 м, итоговое разрешение гридов было принято равным 0,5 м. При среднем диаметре кроны в 5 м это составляет около 80–100 ячеек грида, что достаточно для достоверного моделирования кроны дерева.

Разработка методики определения центров, высот и габаритов крон деревьев

Полученные две поверхности (по классам «Земля» и «Растительность») были вычтены друг из друга с использованием картографической алгебры (т. е. попиксельно в случае взаимного перекрытия) с образованием итоговой поверхности для анализа (формула 1):

$$A = B - C \quad (1),$$

где A — поверхность относительных высот деревьев,
B — поверхность растительности в абсолютных высотах,
C — поверхность земли в абсолютных высотах.

Далее была сделана попытка использовать инструментарий ГИС, предназначенный для гидрологического анализа рельефа, для целей поиска центров крон и прочих параметров деревьев на полученной поверхности относительных высот деревьев (далее — ПОВД).

Деревья в общем случае представляют собой совокупность выпуклых форм (конических, яйцеобразных и произвольных), описываемых точками лазерных отражений класса «Растительность». Вышеописанный метод экспорта данных класса «Растительность» (по высшей точке) обеспечивает достоверное описание внешней поверхности кроны дерева по всей ее площади (в случае отдельно стоящего дерева) или по ее вершинной [*Korpela*, 2008] части (при высокой сомкнутости деревьев).

Поскольку инструментарий ГИС для гидрологического анализа оперирует с отрицательными формами рельефа, то ПОВД была умножена на −1, что зеркально отражает ее вниз, делая вершины деревьев низшими точками котловин.

При этом предполагается, что:

- глубина впадины * (−1) = высота дерева;
- координаты центра впадины = координаты ствола дерева (оси);
- площадь водосборного бассейна соответствует площади кроны;
- диаметр круга, равного по площади водосборному бассейну, соответствует диаметру кроны.

По итогам ряда проведенных экспериментов была разработана следующая схема работы, дающая наиболее оптимальные результаты с использованием принятого для данной работы набора данных лазерного сканирования.

Шаг 1. К полученному после умножения на −1 гриду применяем анализ статистики в пределах скользящего окна радиусом R1. В целом неплохие и сопоставимые по качеству результаты получаются при использовании круглых скользящих окон (рис. 3, 4) радиусом от 3 до 5 ячеек (в целом радиус анализа коррелирует с средним радиусом кроны). Используемая статистическая функция — либо математическое среднее, либо медиана.

Шаг 2. Применяем функцию, определяющую локальные понижения и районы внутреннего дренажа (Sink — входит в комплект функций Spatial Analyst). Выходные результаты данного инструмента — это целочисленный растр, в котором каждому локальному понижению присваивается уникальное значение. Локальные понижения нумеруются от единицы до числа, равного количеству локальных понижений.

Шаг 3. Для каждого местоположения Sink определяем максимальное значение в некоторой окрестности, равной примерно половине радиуса кроны. Применяем функцию расчета максимального значения ячеек для окрестности к полученному растру локальных понижений.

Шаг 4. Конвертируем полученный растр в ArcView Shape-файл (*.shp) и находим центры полученных полигонов. Центроидам присваиваются значения высоты дерева. Дополнительно с учетом площади каждого дерева рассчитывается радиус его кроны (как радиус окружности с площадью, равной площади кроны дерева).

Для отработки методики были использованы несколько тестовых полигонов площадью до 200 га (с визуальным контролем по ортофотопланам), до 3 га — с контролем по точкам лазерных отражений и ортофотопланам, до 0.5 га — предполагаемый объем контроля с использованием полевых работ в течение лета – осени 2023 г. Контроль по точкам лазерных отражений с использованием данных лазерных точек и ортофотопланов производился вручную. Оператор подгружал упомянутые массивы данных и в районе каждого из полученных центроидов дерева выполнял ручное профилирование и измерение параметров кроны как по данным лазерного сканирования, так и ортофотоплана (в случае сомнений). Также профилировались отдельные скопления точек, рядом с которыми по тем или иным причинам не были поставлены центроиды. Итоговые результаты сравнивались с результатами автоматизированного поиска.

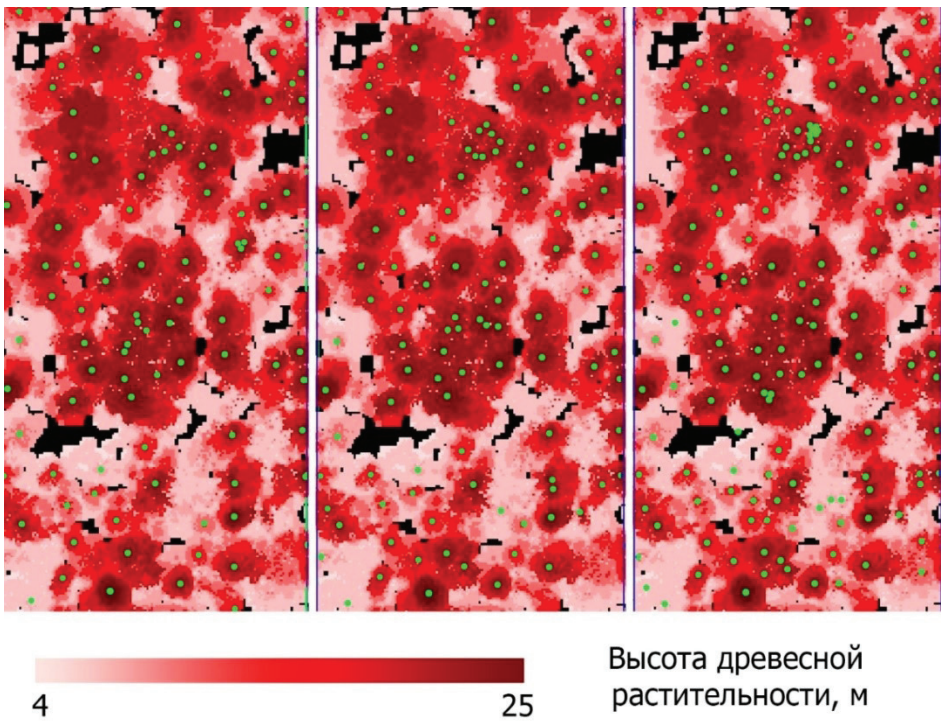


Рис. 3. Влияние выбора радиуса окна осреднения на итоговый результат (слева направо: 5 ячеек, 4 ячейки, 3 ячейки). Подложка — цифровая модель высот деревьев
Fig. 3. Influence of the choice of the averaging window radius on the final result (from left to right: 5 cells, 4 cells, 3 cells). Background — digital model of tree heights

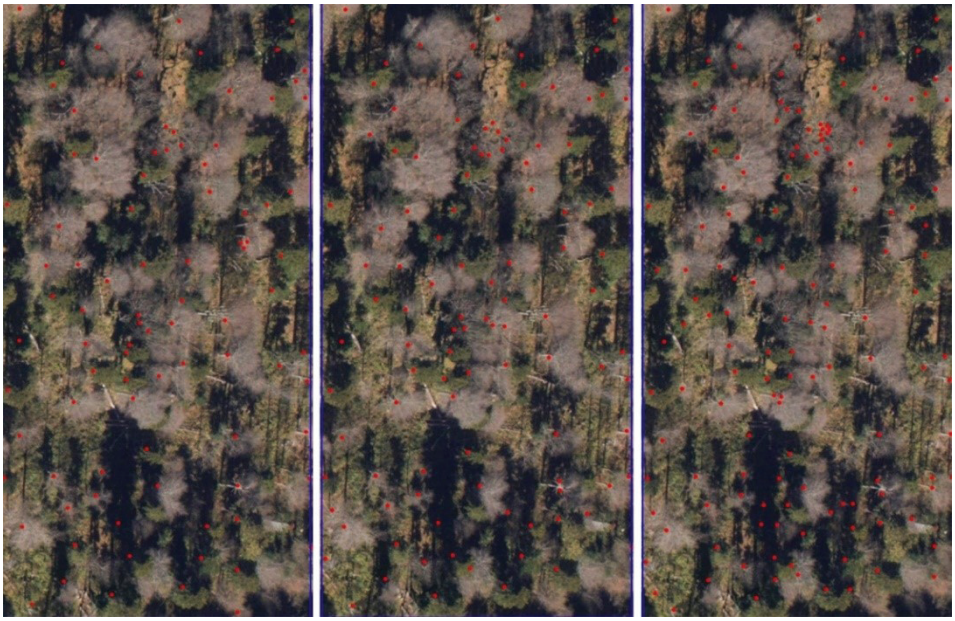


Рис. 4. Влияние выбора радиуса окна осреднения на итоговый результат (слева направо: 5 ячеек, 4 ячейки, 3 ячейки). Подложка — ортофотоплан
Fig. 4. Influence of the choice of the averaging window radius on the final result (from left to right: 5 cells, 4 cells, 3 cells). Background — orthomosaic

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По итогам тестовой обработки вышеописанным способом были достигнуты следующие результаты:

1. На территории до 200 га было проведено тестовое определение параметров деревьев. Для выбора наилучших параметров дешифрирования было отработано свыше 30 вариантов подходов к использованию статистических функций, форме скользящего окна, его радиусу и принципам фильтрации полученных результатов.
2. Итоговый контроль в первом приближении производился визуально (по цифровой модели деревьев и/или по ортофотопланам). Наиболее реалистичные результаты передавались для более подробного выборочного контроля.
3. Выборочный контроль предполагает оценку результатов с использованием исходных облаков точек и ортофотопланов на площади до 3 га.
4. Полученные результаты предполагается проверить в ходе полевого сезона 2023 г.

На текущем этапе исследований можно уже отметить, что предложенные подходы в подавляющем числе случаев верны для отдельно стоящих деревьев или для лесов с разомкнутыми кронами, когда между каждым из деревьев есть некоторое пустое пространство. Также нужно отметить, что наиболее точный результат получается в условиях хвойного леса (ель, пихта) с четко выраженной конической формой стволов. В условиях смешанного или лиственного леса (реже — хвойного) результат может обладать следующими недостатками:

- Плановые координаты вершины не соответствуют плановым координатам ствола на уровне земли (рис. 4). Причины: искривленные стволы, «пьяный лес» на оползневых склонах, раздваивание вершины и пр.
- Отдельные ветви широколиственных пород могут быть сопоставимы по размерам кроны с небольшим деревом, смыкаясь с основным стволом лишь на уровне земли, что снижает правильность дешифрирования.

На текущем этапе также можно говорить, что полученный подход дает уровень достоверности отдешифрированных характеристик деревьев на уровне около 80–85 % для хвойных пород и около 65–70 % для лиственных пород. Несомненно, подобный результат не является на данном этапе промышленно значимым, однако по мере совершенствования методики обработки данных и их фильтрации потенциально представляет интерес для использования при широкомасштабных исследованиях лесов.

Преимущества описанного подхода

Основными достоинствами подобного подхода являются:

- простота в использовании для специалистов, владеющих функционалом стандартных ГИС-пакетов без необходимости использования дорогостоящих программных продуктов;
- возможность работы с низкоплотными (менее 6 точек на 1 м^2) данными воздушного лазерного сканирования, что открывает возможности выполнять такие работы в очень больших объемах с чрезвычайной быстротой, при этом уровень достоверности, достигнутый уже на данном этапе, может быть вполне пригоден для задач лесотаксации и схожих с ними;
- возможность легкой перенастройки параметров методики в зависимости от характера залесенности и породного состава при смене региона работы.

ВЫВОДЫ

По итогам проделанной работы можно утверждать, что описанная в работе концепция создания точечных векторных слоев с центрами каждого отдельного дерева и его характеристиками, определяемыми по данным низкоплотного (ниже 6 точек на 1 м^2) воздушного лазерного сканирования, реализуема с достаточно высоким уровнем достоверности. В то же время полученные результаты не являются окончательными — методика нуждается в дополнительной полевой проверке и доработке параметров дешифрирования и фильтрации полученных результатов.

Полученные по результатам применения вышеописанного подхода материалы (векторные ГИС-слои с параметрами отдельных деревьев) могут быть использованы для:

- лесотаксационных работ (включая определение объемов запасов древесины, биомассы и т. п.) при условии использования дополнительных материалов;
- подеревной съемки (при неполной сомкнутости крон и/или в чисто хвойных лесах);
- уточнения статистических параметров лесопокрытых площадей;
- расчетов проходимости территории по категориям;
- использования в виртуальных моделях местности.

Несмотря на ряд недостатков, предложенный метод является быстрым и недорогим решением, использующим данные воздушного лазерного сканирования с низкой плотностью и невысокой стоимостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Капралов Е.Г., Кошкарев А.В., Тикунов В.С. Основы геоинформатики. Учебное пособие для студентов вузов в 2-х книгах. М.: Академия, 2004. 352 с.; 480 с.

Рыльский И.А., Малеванная М.С. Наземные лазерные методы — новые подходы к информационному обеспечению географических исследований. Геодезия и картография, 2014. № 8. С. 38–48. DOI: 10.22389/0016-7126-2014-890-8-38-48.

Рыльский И.А., Тикунов В.С. Перспективы использования комплексов воздушного лазерного сканирования для картографирования лесов. Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле», 2016. Т. 15. С. 104–113.

Allen P.K., Stamos I., Troccoli A.A., Smith B., Leordeanu M., Hsu Y. 3D modeling of historic sites using range and image data. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003. V. 1. P. 145–150.

Chen Q. Airborne lidar data processing and information extraction. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007. V. 73. No. 2. P. 109–112.

Gorgens E., Valbuena R., Rodriguez L. A method for optimizing height threshold when computing airborne laser scanning metrics. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2017. V. 1. P. 343–350.

Haala N., Brenner C., Anders K.-H. 3D urban GIS from laser altimeter and 2D map data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1998. P. 339–346.

Korpela I. Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data. Remote Sensing of Environment, 2008. P. 3891–3897.

Lohr U. Digital elevation models by laser scanning: Principle and applications. Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1997. P. 174–180.

REFERENCES

Allen P.K., Stamos I., Troccoli A. A., Smith B., Leordeanu M., Hsu Y. 3D modeling of historic sites using range and image data. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003. V. 1. P. 145–150.

Chen Q. Airborne lidar data processing and information extraction. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007. V. 73. No. 2. P. 109–112.

Gorgens E., Valbuena R., Rodriguez L. A method for optimizing height threshold when computing airborne laser scanning metrics. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2017. V. 1. P. 343–350.

Haala N., Brenner C., Anders K.-H. 3D urban GIS from laser altimeter and 2D map data. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1998, P. 339–346.

Kapralov E.G., Koshkarev A.V., Tikunov V.S. Fundamentals of geoinformatics. Moscow: Academy, 2004. P. 480.

Korpela I. Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data. Remote Sensing of Environment, 2008. P. 3891–3897.

Lohr U. Digital elevation models by laser scanning: Principle and applications. Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1997. P. 174–180.

Rylskiy I.A., Malevannaya M.S. Terrestrial laser scanning methods — new approaches to the information supply for geographic researches. Geodesy and Cartography, 2014. No. 8. C. 38–48 (in Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2014-890-8-38-48.

Rylskiy I.A., Tikunov V.S. Perspectives of using airborne laser scanning systems for forest mapping. Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya “Nauki o Zemle” (The Bulletin of Irkutsk State University. Series “Earth Sciences”), 2016. V. 15. P. 104–113 (in Russian).

Новые методы и подходы в геоинформационном моделировании, анализе данных, разработке карт и атласов

New methods and approaches in geoinformation modeling, data analysis, creation of maps and atlases

УДК: 556.555.6 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-465-481**

А.В. Погорелов[1], **А.А. Лагута**[2], **П.Б. Нетребин**[3]

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДОННОГО РЕЛЬЕФА КРУПНОГО ДОЛИННОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ЭВОЛЮЦИИ

АННОТАЦИЯ

До сих пор исследованию морфологии дна крупных водохранилищ, подвергающихся постепенному заилению, уделялось мало внимания. Морфометрические описания водохранилищ обычно ограничиваются видом, формой, высотным положением, размерами ложа и объемом воды в них. В статье представлены результаты анализа донного рельефа Краснодарского водохранилища и преобразований этого рельефа за 2005–2021 гг. Анализ выполнен по материалам батиметрических съемок для регулируемого объема водохранилища на площади 224 км^2 с построением соответствующих цифровых моделей рельефа. Рельеф дна водохранилища представлен плоскими участками затопленной аккумулятивной равнины с преобладающими уклонами около 0,2–0,4°, расчлененной речными руслами притоков низшего порядка. Преобразование рельефа вызвано постепенным заилением. Суммарный объем отложений для указанной площади в 2005–2021 гг. составил 127 млн м^3 при среднем слое заиления 0,4 м. Для описания морфологических свойств рельефа дна нами использованы приемы геоморфометрии с расчетом индекса BPI (Bathymetric Position Index) и классификацией мезомасштабных форм рельефа на его основе. Для ложа установлены формы рельефа, относящиеся к трем видам поверхностей: плоские (плато), вогнутые (ложбины, впадины) и выпуклые (валы, тыловые склоны, фронтальные склоны). Построенные карты отражают дифференцированную морфологию поверхности ложа, эволюцию форм рельефа в условиях непрерывной трансформации котловины, а также позволяют судить о преобладающих процессах морфогенеза. Наиболее сложно в морфологическом плане построена береговая зона и мелководная часть

[1] Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, Краснодар, Россия, 350040, *e-mail:* **pogorelov_av@bk.ru**

[2] Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, Краснодар, Россия, 350040, *e-mail:* **alaguta@icloud.com**

[3] Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, Краснодар, Россия, 350040, *e-mail:* **netrebinpetr@gmail.com**

ложа. Здесь наряду с вдольбереговыми валами разного генезиса на аккумулятивной отмели могут формироваться ложбины и впадины в виде подводных русел на дельтах выдвижения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водохранилище, рельеф дна, морфометрический анализ, формы рельефа, трансформация

Anatoly V. Pogorelov[1], **Andrey A. Laguta**[2], **Petr B. Netrebin**[3]

MORPHOMETRIC ANALYSIS OF THE BOTTOM TOPOGRAPHY OF A LARGE VALLEY RESERVOIR DURING ITS EVOLUTION

ABSTRACT

Until now, the study of the morphology of the bottom of large reservoirs, subject to gradual siltation, received little attention. Morphometric descriptions of reservoirs are limited by the type, shape, altitude position, size of the bed, and the volume of water in them. The article presents the results of the analysis of the bottom relief of the Krasnodar Reservoir and the transformations of this relief for 2005–2021. The analysis was performed based on the materials of bathymetric surveys for the regulated volume of the reservoir on an area of 224 km^2 with the construction of the corresponding digital relief models. The relief of the bottom of the reservoir is represented by flat areas of a flooded accumulative plain with prevailing slopes of about 0.2–0.4°, dissected by river channels of lower order tributaries. The transformation of the relief is caused by gradual siltation. The total volume of deposits for the specified area in 2005–2021 amounted to 127 million m^3 with an average silt layer of 0.4 m. To describe the morphological properties of the bottom topography, we used geomorphometric techniques with the calculation of the BPI (Bathymetric Position Index) and the classification of mesoscale landforms based on it. For the bed, relief forms have been established related to three types of surfaces: flat (lower bank shelf), concave (depressions, deep depressions) and convex (reef crests, back reefs, mid-slope reefs). The constructed maps reflect the differentiated morphology of the bed surface, the evolution of landforms under conditions of continuous transformation of the basin, and also make it possible to judge the prevailing processes of morphogenesis. The coastal zone and the shallow part of the bed are the most complex in morphological terms. Here, along with reefs of different genesis, deep depressions and depressions in the form of underwater channels in advanced deltas can form on the accumulative shoal.

KEYWORDS: reservoir, bottom topography, morphometric analysis, landforms, transformation

ВВЕДЕНИЕ

Краснодарское водохранилище на р. Кубани (Россия) введено в эксплуатацию в 1973 г., и по классификации [*Авакян* и др., 1987] является крупным водохранилищем. Водохранилище, расположенное на юге России вблизи г. Краснодара на границе двух регионов — Краснодарского края и Республики Адыгеи, имеет две ключевые функции — противопаводковую и ирригационную. При наполнении до проектного уровня в 1975 г. площадь водоема достигла 400 км^2, а полный объем — около 3 км^3. Водохранилище относится к долинному типу, имеет удлиненную форму. На начальной стадии эксплуатации оно имело длину 46 км, максимальную ширину 11 км при средней глубине 5,9 м и максимальной глубине 24,7 м [*Лурье* и др., 2005].

[1] Kuban State University, 149, Stavropolskaya str., Krasnodar, 350040, Russia, *e-mail:* **pogorelov_av@bk.ru**
[2] Kuban State University, 149, Stavropolskaya str., Krasnodar, 350040, Russia, *e-mail:* **alaguta@icloud.com**
[3] Kuban State University, 149, Stavropolskaya str., Krasnodar, 350040, Russia, *e-mail:* **netrebinpetr@gmail.com**

Водохранилище служит опорным объектом всей ирригационной системы Краснодарского края и основным источником воды для посевов риса в нижнем течении р. Кубани с ежегодным забором воды на орошение около 3,3 км^3. В этом смысле важной характеристикой является полезный объем водохранилища — 2,2 км^3 согласно проектным показателям. Особенность водного режима — сезонное регулирование объема с относительно большими внутригодовыми амплитудами уровня воды, достигающими в отдельные годы 7 м. Такая амплитуда выступает фактором формирования поверхности ложа, способствует образованию значительных площадей переменного затопления, постоянному перемещению контактной зоны «вода – суша», а также влияет на циркуляцию водных масс.

Среди рек России, на которых созданы крупные водохранилища, р. Кубани свойственна наибольшая мутность — 0,68 кг/м^3. По данным[1], [*Алексеевский* и др., 2012] в водохранилище осаждается до 95–98 % наносов, приносимых рекой. По нашим расчетам, в течение 1973–2021 гг. в результате заиления полезный объем водохранилища сократился с 2160 до 1270 млн м^3, а площадь зеркала — с 400 до 224 км^2 [*Погорелов* и др., 2022]. Заиление сопровождается непрерывной перестройкой подводного рельефа вследствие взаимосвязанных геоморфологических и гидрологических процессов — отложения наносов, изменения локальной структуры течений и пр.

В формировании рельефа ложа водохранилища и его трансформации ведущая роль принадлежит флювиальным процессам, из которых наиболее активно проявляют себя процессы дельтообразования. За период существования водохранилища эволюция речных дельт Кубани и Белой существенно повлияла на его морфометрические характеристики [*Лагута*, *Погорелов*, 2019; *Pogorelov* et al., 2021]. Сразу после наполнения Краснодарского вдхр. началось отчуждение его северо-восточной части — бывшего Тщикского вдхр. [*Курбатова*, 2014], чему способствовали развитие дельты р. Белой, сохранение старой плотины и обвалование Тщикского вдхр. При определенных отметках лежащий выше участок бывшего Тщикского вдхр. не становился русловым, что обычно свойственно долинным водохранилищам. В настоящее время отчужденному Тщикскому водоему присущи собственные условия циркуляции и отложения наносов.

По нашим расчетам за период 2005–2021 гг. (рис. 1) объем аккумуляции наносов в основном водоеме без учета отчленившегося Тщикского водоема и дельтовых отложений разделяющей перемычки составил 127 млн м^3 [*Погорелов* и др., 2022]. Максимальные объемы отложений и скорости осадконакопления в процессе выноса взвесей зафиксированы в дельтах Кубани и Белой, наименьшие — в области мертвого объема, т. е. в западной (наиболее глубокой) части котловины. Как видно на рис. 1, в наибольшей степени подвержен преобразованиям подводный рельеф вблизи берега, где в процессе активного вдольберегового и поперечного транспорта наносов происходит непрерывное формирование и преобразование аккумулятивных и абразионных форм. Активность рельефообразования в долинных водохранилищах в зоне вдольберегового переноса с формированием мезомасштабных форм подтверждается [*Финаров*, 1986; *Назаров* и др., 2011; 2013]. Наличие локальных отрицательных форм рельефа (ям) — результат ограниченного техногенного изъятия донных отложений в 2005–2021 гг.

Стандартные морфометрические характеристики водохранилищ, принятые в гидрометрии, отражают вид, форму, высотное положение, размеры ложа водоемов и объемы воды в них. Однако изучению морфологии дна, несмотря на ее роль в формировании интегральных морфометрических показателей, уделяется мало внимания. Причина — сложность получения исходных данных. Вместе с тем, геоморфологические особенности рельефа дна водохранилища, а также динамика рельефа являются ключевыми

[1] Правила использования водных ресурсов Краснодарского водохранилища. Кубаньводпроект. Краснодар: 2008. 158 с.

для понимания процессов трансформации водохранилища и прогнозирования его морфометрических характеристик (площадь, глубина, объем воды при разных уровнях, батиграфическая и объемная кривые водоема и др.). С развитием инструментов пространственного анализа с использованием ЦМР [*Землянов* и др., 2011; *Калинин* и др., 2018], в т. ч. инструментов геоморфометрии [Geomorphometry…, 2009; *Флоринский*, 2021], анализ рельефа дна водоемов вышел на новый технический уровень.

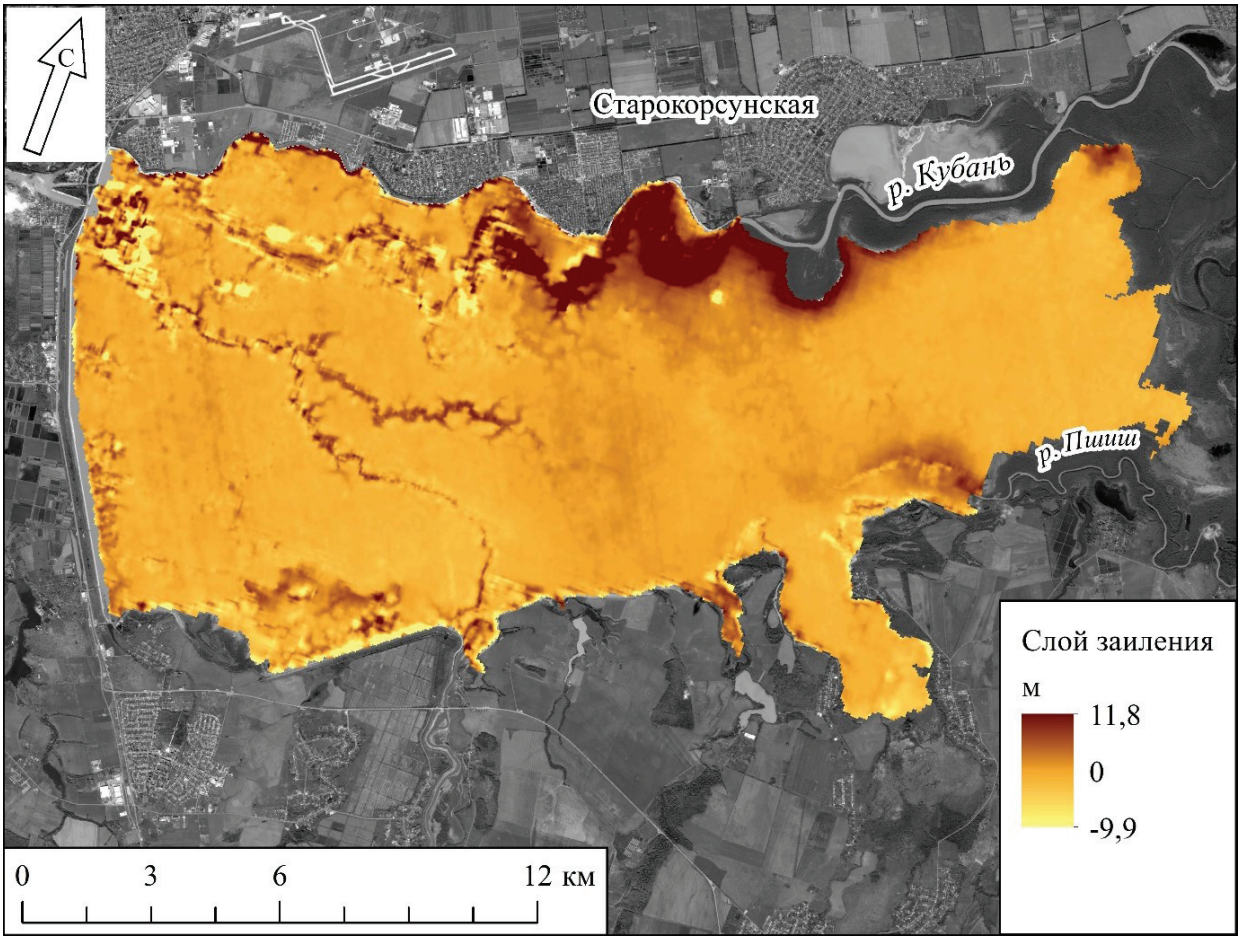


Рис. 1. Толщина слоя заиления Краснодарского водохранилища за период 2005–2021 гг.
Fig. 1. Increment of the siltation layer of the Krasnodar Reservoir over the period 2005–2021

Морфологические свойства рельефа дна Краснодарского водохранилища не изучены и представляют особый интерес с позиции его многолетних эволюционных преобразований. В статье решаются основные задачи:

1) описать морфологические свойства подводного рельефа Краснодарского вдхр. с использованием приемов геоморфометрии, определить основные формы рельефа котловины водохранилища и построить соответствующие карты;
2) установить многолетние морфометрические изменения, вызванные перестройкой подводного и надводного (мелководья, берега) рельефа, оценить интенсивность деформаций дна водохранилища;
3) выявить доминирующие процессы морфогенеза, установить закономерности осадконакопления, характер его проявления в рельефе ложа и береговой зоны.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ выполнялся по данным батиметрических съемок Краснодарского вдхр., сделанных с участием авторов в 2005 и 2021 гг. Батиметрические съемки проведены в соответствии со сводом правил[1] и руководством[2]; методика проведения полевых исследований и обработки исходных материалов описана в работе [*Лагута*, *Погорелов*, 2018]. Морфометрический анализ и расчеты выполнялись с использованием предварительно построенных цифровых моделей рельефа дна водохранилища с пространственным разрешением 50 м (рис. 2). Поскольку в процессе трансформации водоема северо-восточная его часть (бывшее Тщикское вдхр.) отчленилась от основной чаши водоема, основные расчеты выполнены для регулируемого участка Краснодарского вдхр. площадью 224 км^2 (рис. 1).

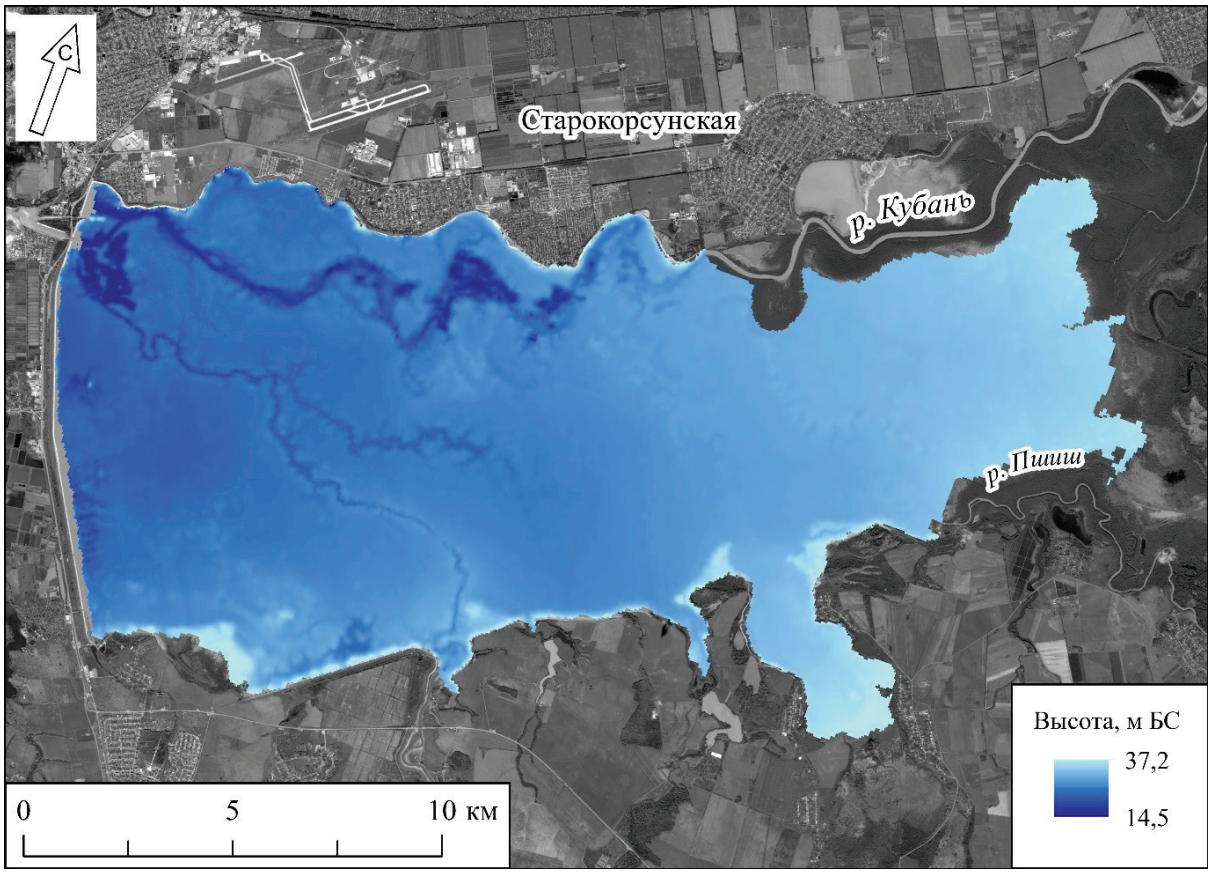


Рис. 2. Цифровая модель рельефа дна Краснодарского водохранилища, построенная по данным съемки 2005 г.
Fig. 2. Digital elevation model of the bottom of the Krasnodar Reservoir, built according to the 2005 survey data

В основе классификации морфометрических элементов поверхности дна Краснодарского вдхр. по ЦМР лежит метод расчета индекса BPI (Bathymetric Position Index) и классификации морфологических элементов на его основе [*Guisan* et al., 1999; *Weiss*, 2001]. Данный индекс, являясь модификацией индекса TPI (Topographic Positions Index) [*Jenness*, 2006], ориентирован на работу с материалами батиметрической съемки. До сих пор он применялся преимущественно для исследования рельефа морского дна [*Wilson* et al.,

[1] Инженерно-геодезические изыскания для строительства (СП 11-104-97). Свод правил. М., 1998. 139 с.
[2] РД 52.08.767-2012. Расход воды на водотоках. Методика измерений акустическими доплеровскими профилографами «Stream Pro» и «Rio Grande». ФГБУ «ГГИ» Росгидромета, 2012.

2007]. Индекс BPI является мультимасштабным и предполагает построение «грубого» (Broad-BPI) и детализированного (Fine-BPI) индексов растровых изображений. Расчету BPI предшествовало преобразование исходной ЦМР в батиметрическую модель; при этом в качестве нуля нами выбран форсированный уровень 35,23 м, а высотам присвоены отрицательные значения.

BPI представляет собой разность между абсолютной высотой данной точки (в растровом слое — ячейки) и средней высотой точек в заданном буфере вокруг исходной точки. Положительные значения индекса соответствуют выпуклостям поверхности; отрицательные — вогнутым формам; значения около 0 указывают на то, что поверхность близка к плоской. Для уменьшения влияния автокорреляции исходных данных на результаты морфометрической классификации использовано нормализованное значение индекса [*Weiss*, 2001]. Нормализация осуществлена по формуле (1):

$$BPI_{sd} = int\left(\left(\left(\frac{BPI - mean_{BPI}}{\sigma_{BPI}}\right) * 100\right) + 0.5\right), \quad (1),$$

где BPI_{sd} — нормализованная величина *BPI*,
int — преобразование в целочисленное число,
$mean_{BPI}$ — среднее значений индекса *BPI* (по всему набору данных),
σ_{BPI} — среднее квадратическое отклонение значений индекса *BPI* (по всему набору данных).

Помимо растровых слоев индексов Fine-BPI и Broad-BPI, для распознавания (классификации) элементарных форм рельефа необходимы карта уклонов и батиметрическая карта. Количество классов, их наименование и морфометрические параметры задаются пользователем в формате CSV. Процедура выделения морфометрических элементов поверхности дна описана в работе [*Verfaillie* et al., 2007]. Нами экспериментально установлены параметры расчета индекса BPI, обеспечивающие оптимальный уровень детализации форм донного рельефа применительно к пространственному разрешению ЦМР. Использовано окно поиска в форме кольца с заданными внутренним и внешним радиусами (табл. 1). При выборе параметров мы руководствовались размерами распознаваемых положительных и отрицательных форм донного рельефа исследуемого водохранилища, которые относим к мезомасштабным, а именно — вдольбереговых валов с их гребнями и склонами, впадин и ложбин.

Табл. 1. Принятые параметры расчета индекса BPI
Table 1. Accepted parameters for calculating the BPI index

Индекс	**Форма окна поиска**	**Внутренний радиус**		**Внешний радиус**	
		количество ячеек	**м**	**количество ячеек**	**м**
Fine-BPI	Кольцо	3	150	5	250
Broad-BPI	Кольцо	5	250	30	1500

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Среди морфометрических особенностей долинного Краснодарского вдхр., определяющих перестройку рельефа, выделим следующие. Рельеф дна водохранилища унаследовал как элементы речных долин с врезами русел (Кубани, Пшиша, Псекупса), так и обширные фрагменты плоской равнины, существовавшие до затопления в 1973–1976 гг.

Особенно хорошо прослеживается затопленное вблизи правого берега русло Кубани (рис. 2). Долине Кубани на участке водохранилища свойственна поперечная асимметрия, а именно — высокий обрывистый правый берег, спускающийся в старое русло Кубани, и пологий левый берег со слабо выраженной террасой. Между берегами располагается платообразная слабо расчлененная поверхность. В настоящее время в затопленных речных руслах отмечается повышенная в сравнении с фоновой аккумуляция наносов (рис. 1). В затопленном русле Кубани, имеющем максимальные глубины, происходит локализация мутьевого потока. Гидродинамическая активность здесь проявляется особым образом: струя в затопленном русле Кубани прижимается к правому берегу, что способствует интенсивному размыву берега до тех пор, пока не образуется аккумулятивное тело в виде выдвижной дельты.

Преобладающий процесс в рельефообразовании ложа за исследуемый период — постепенное нивелирование его поверхности, выравнивание сверху в процессе непрерывного заиления. Средний слой заиления на исследуемой акватории за 2005–2021 гг. составил 0,40 м; изменчивость толщины слоя заиления на площади 224 км^2 характеризуется стандартным отклонением 0,81 м. Средний уклон поверхности ложа в 2005 г. составлял 0,20°, в 2021 г. — 0,18°. Уменьшение среднего уклона — очевидный признак постепенного выравнивания ложа при заилении. Повышенные уклоны на аккумулятивной равнине, как правило, маркируют затопленные береговые склоны речных долин.

На фоне указанных геоморфологических особенностей представляет интерес выделение элементарных форм рельефа согласной принятой методике (рис. 3), а также динамика преобразования этих форм за 2005–2021 гг. (рис. 3, табл. 2).

В процессе классификации поверхности ложа водохранилища выявлено 6 морфологических элементов (табл. 2, рис. 2), относящихся к 3 категориям поверхностей: плоские (плато), вогнутые (ложбины, впадины) и выпуклые (валы и их склоны). Рассмотрим происхождение и динамику каждой из них, а также выделенных элементарных форм рельефа чаши водохранилища.

По данным съемки 2021 г. 89,2 % площади водохранилища занято аккумулятивной платообразной равниной, которая до затопления представляла собой кубанскую пойму, расчлененную руслами рек. Преобладающие уклоны в пределах равнины — 0,1–0,4°. Понятие плато в наибольшей мере отражает основные свойства данной формы рельефа — плоскость, пологость.

Отрицательные формы — ложбинообразные углубления и более выраженные вытянутые впадины — занимают 2 % и 4,1 % площади соответственно. Генетически ложбины имеют различное происхождение: часть относится к затопленным руслам рек, часть — к вогнутым подножиям вдольбереговых аккумулятивных форм — валов. При этом старые русла в процессе заиливания и выполаживания эволюционируют в последовательности «впадина – ложбина – плато», а вновь формируемые русла (например, в дельте р. Пшиша) в ходе врезания образуют впадины. Наиболее сложно в морфологическом смысле построена береговая область и мелководная часть ложа (литораль), где наряду с положительными формами рельефа (вдольбереговые валы) на аккумулятивной отмели могут формироваться отрицательные формы (ложбины) на абразионной части отмели.

Хорошо выражены в рельефе затопленные долины рр. Кубани, Псекупса и Туапчи (бывший правый приток Псекупса). В течение исследуемого периода долины двух последних подверглись расчленению на отдельные участки и в настоящее время эволюционируют в сторону плато. В целом доля впадин в общей площади ложа водоема сокращается, чего нельзя сказать о ложбинах (табл. 2), часть которых формируется на участках вновь образующихся берегов флювиального происхождения — дельтах выдвижения.

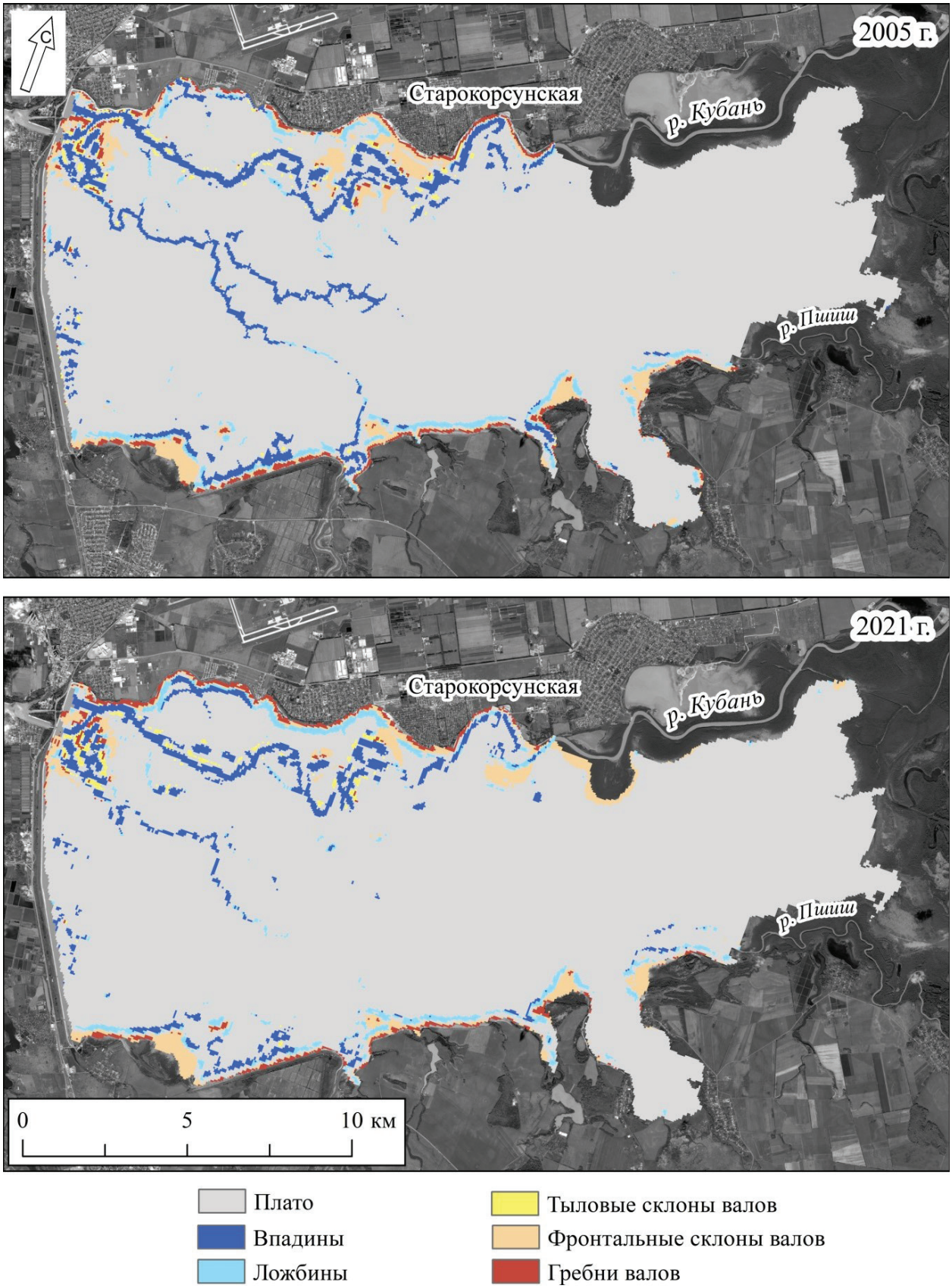


Рис. 3. Формы рельефа ложа водохранилища, выделенные по данным съемок 2005 и 2021 гг.
Fig. 3. Reservoir bed relief forms, selected according to surveys data from 2005 and 2021

Табл. 2. Морфологические элементы поверхности дна Краснодарского водохранилища и их изменение за 2005–2021 гг.
Table 2. Morphological elements of the bottom surface of the Krasnodar reservoir and their change in 2005–2021

Форма рельефа	2005 г.			2021 г.		
	Количество фрагментов	Площадь		Количество фрагментов	Площадь	
		га	%		га	%
Плато (Lower Bank Shelf)	280	19787	88,3	222	19984	89,2
Ложбины (Depressions)	258	387	1,7	257	438	2,0
Впадины (Deep Depression)	172	1172	5,2	184	919	4,1
Фронтальные склоны валов (Mid-Slope Ridges)	197	640	2,9	212	666	3,0
Гребни валов (Reef Crest)	208	317	1,4	166	295	1,3
Тыловые склоны валов (Back Reef)	144	98	0,4	92	98	0,4

Положительные элементы морфологии ложа представлены группой валообразных форм, внутри которой выделим 3 элементарные формы: гребни валов, фронтальные (дистальные) склоны и тыловые (проксимальные) склоны. Как и в случае с группой отрицательных форм рельефа, происхождение валов различно и генетически определяется вкладом аккумулятивных (флювиальных) и абразионных процессов (см. ниже). Расположение характерных генетически однородных элементарных форм рельефа иллюстрировано на рис. 4. Выделим следующие генетически однородные формы рельефа.

1. В литоральной зоне водохранилища (береговая отмель) как у абразионных, так и не поддающихся абразии берегов в результате поперечного перемещения наносов под воздействием прибоя сформированы аккумулятивные формы — береговые валы. Морфологически здесь выражены гребни и фронтальные (морские) склоны валов, а также ложбины, отделяющие береговой вал от нижележащего плато. Тыловые (обращенные к берегу) склоны не обнаруживаются в масштабе, обусловленном пространственным разрешением съемки. Снимки (рис. 5, а–е) ярко иллюстрируют серийность береговых валов, имеющую две основные причины — переменный подпор водохранилища и разную интенсивность волнения. Два указанных обстоятельства определяют пределы локализации рассматриваемой формы рельефа. Вдольбереговые валы также образуется под влиянием флювиального фактора морфолитогенеза — твердого речного стока с объемом в общем вещественном балансе, превышающим вклад прибоя. Естественное перемещение устья как источника наносов в процессе роста дельты вызывает постоянную смену условий формирования береговых валов, рождая их новые генерации с выходом старых валов из-под волнового воздействия (рис. 6 а–в).
2. В глубокой части ложа водохранилища сохранились прирусловые валы затопленных русел. Эта форма обнаруживается фрагментарно вдоль затопленного русла Кубани (рис. 3). Наличие рудиментов тыловых склонов валов (здесь — обращенных внутрь, к руслу), несмотря на потерю целостности, свидетельствует об их былой массивности.
3. Кроме перечисленных, валообразные формы образуются в виде косы или переймы (перешейка), соединяющей наносами существовавшие до затопления возвышенности с берегом при наличии волновой тени (эффект томболо) (рис. 7 а–г).

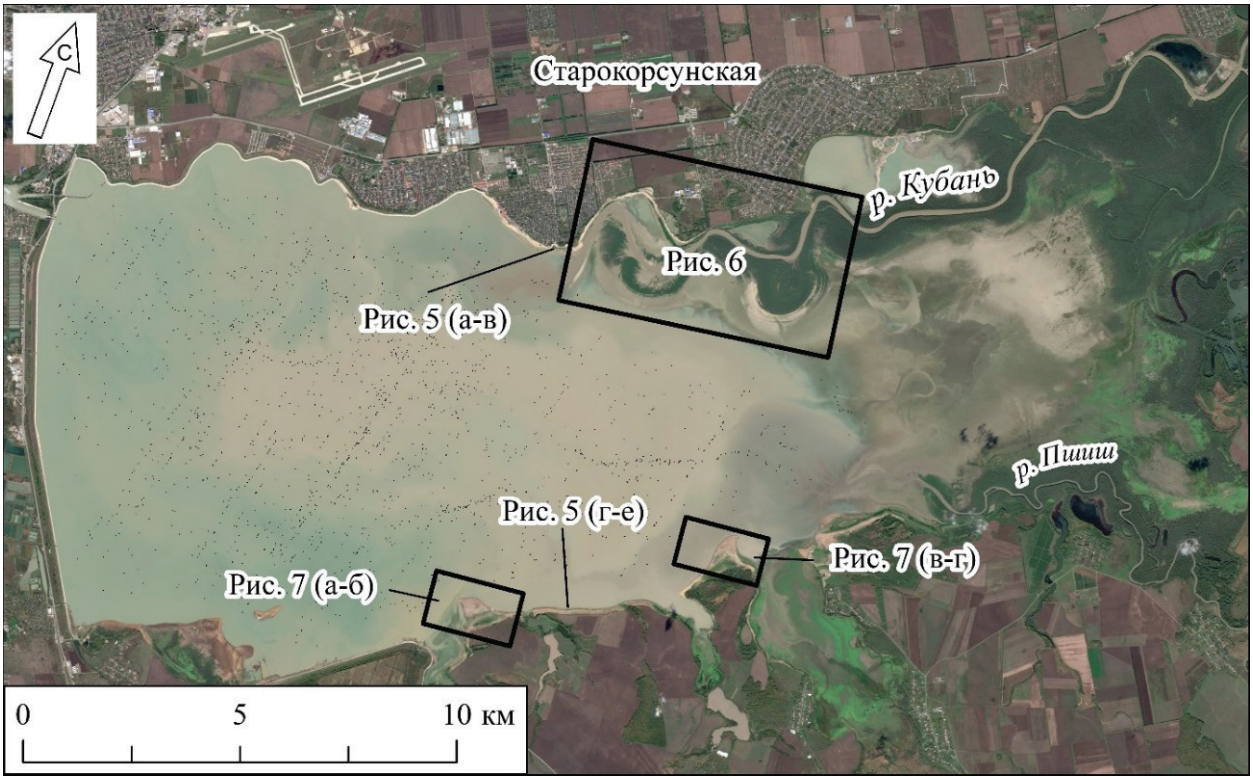


Рис. 4. Расположение типичных генетически однородных элементов рельефа
Fig. 4. Location of typical genetically homogeneous relief elements

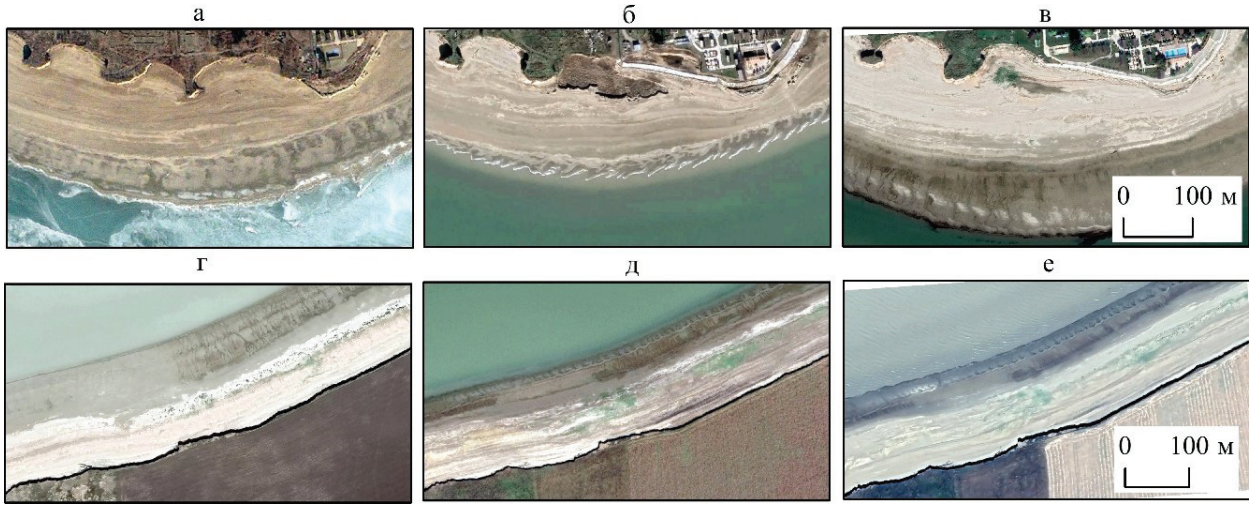


Рис. 5. Формирование характерных выпуклых форм рельефа — береговых валов и их склонов. Даты съемки 30.12.2012 (а), 24.11.2016 (б), 18.10.2018 (в), 09.09.2014 (г), 24.09.2014 (д), 28.09.2017 (е). Снимки Maxar Technologies
Fig. 5. Formation of characteristic convex relief forms — coastal reefs and their slopes. Imagery data: 30.12.2012 (a), 24.11.2016 (b), 18.10.2018 (c), 09.09.2014 (d), 24.09.2014 (e), 28.09.2017 (f). Images by Maxar Technologies

Рис. 6. Генерации береговых валов растущей дельты выдвижения р. Кубани. Даты съемки: 23.09.2014 (а), 18.10.2018 (б), 18.12.2022 (в). Снимки Maxar Technologies
Fig. 6. Generations of coastal reefs of the growing advanced delta of the Kuban River. Imagery data: 23.09.2014 (a), 18.10.2018 (b), 18.12.2022 (c). Images by Maxar Technologies

Рис. 7. Формирование валообразных форм рельефа в виде косы или переймы. Даты съемки 17.08.2005 (а), 28.09.2017 (б), 30.05.2013 (в), 30.12.2012 (г). Снимки Maxar Technologies — а, г; CNES / Airbus — б, в
Fig. 7. Formation of reef-like forms of relief in the form of a spit or tombolo. Imagery data: 17.08.2005 (a), 28.09.2017 (b), 30.05.2013 (c), 30.12.2012 (d). Images by Maxar Technologies — a, d; CNES / Airbus — b, c

Рассмотрим эволюцию донного рельефа. За анализируемый период морфологическим преобразованиям в наибольшей мере подверглись прибрежные участки дна, а также затопленные русла рек (рис. 8) и, соответственно, расположенные на этих участках элементарные формы рельефа. Всего преобразования затронули 34,1 км^2 или около 15 % анализируемой площади водохранилища. Дифференцированный характер морфологи-ческих преобразований отражает таблица 3.

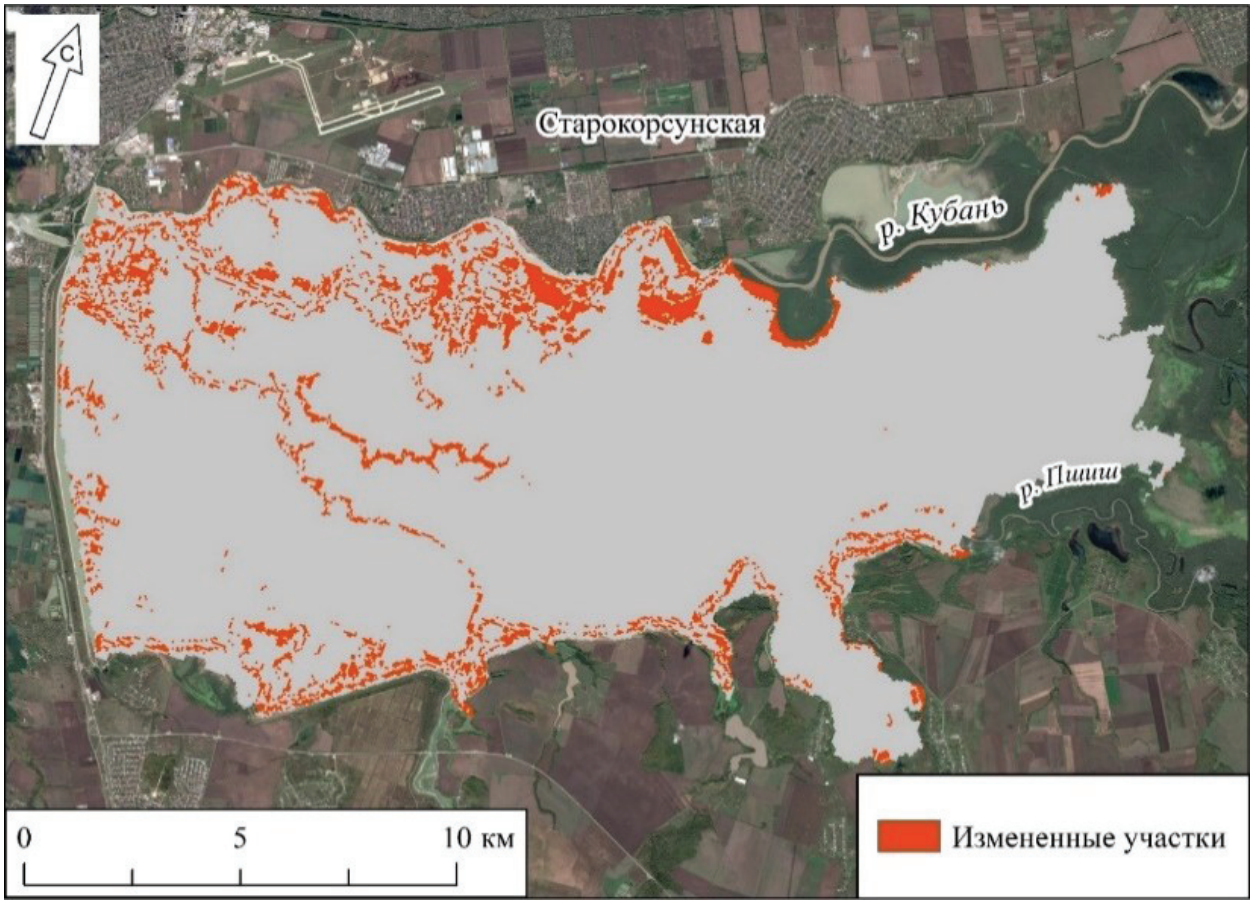


Рис. 8. Участки дна, подвергшиеся морфологическим изменениям за 2005–2021 гг.
Fig. 8. Bottom areas subjected to morphological changes in 2005–2021

Табл. 3. Морфологические преобразования выделенных элементарных форм рельефа в течение 2005–2021 гг.
Table 3. Morphological transformation of the identified elementary landforms during 2005–2021

Формы рельефа		**Площадь, га**
2005 г.	**2021 г.**	
Плато	Тыловой склон вала	52
	Впадина	303
	Ложбина	179,25
	Фронтальный склон вала	232
	Гребень вала	31,5
Ложбина	Впадина	29
	Плато	165,75
	Фронтальный склон вала	11,75
	Гребень вала	0,75
	Тыловой склон вала	0
Впадина	Тыловой склон вала	6,5
	Ложбина	39,25

Формы рельефа		Площадь, га
2005 г.	**2021 г.**	
	Плато	525
	Фронтальный склон вала	6,75
	Гребень вала	5,75
Фронтальный склон вала	Тыловой склон вала	2
	Впадина	5,75
	Ложбина	36
	Плато	225,75
	Гребень вала	41,25
Тыловой склон вала	Впадина	7,5
	Ложбина	0,75
	Плато	53
	Фронтальный склон вала	0,5
	Гребень вала	9,5
Гребень вала	Тыловой склон вала	9,75
	Впадина	3,75
	Ложбина	4,75
	Плато	78,75
	Фронтальный склон вала	76,75

При анализе преобразования выпуклых форм необходимо учитывать следующее. Вследствие практически полного зарастания литорали водоема в зоне формирования новых дельтовых берегов большая часть береговых валов, вышедших и выходящих из зоны волнового воздействия, оказалась недоступна для батиметрической съемки 2021 г. Сравнение двух разновременных ЦМР не охватывает полностью границы съемки 2005 г. Среди выпуклых форм рельефа, выделенных в съемке 2005 г. (в границах сравнения), еще нет береговых валов, сформированных с участием флювиального процесса, хотя в съемке 2021 г. их доля в данной категории доходит до 30 %. При сопоставимых площадях выпуклых форм рельефа (гребней валов и выпуклых склонов валов) в 2005 г. и 2021 г. (табл. 2) следует отметить их существенные различия в генезисе, обусловленные, с одной стороны, появлением и развитием валов на потамогенных (дельтовых) берегах и, с другой стороны, сокращением площади валов вблизи берегов абразионного и денудационного типов. Значительная часть тыловых и фронтальных склонов — это новые формы, сформировавшиеся на бывшем плато, что отражает интенсивность образования новых берегов в водохранилище.

Преобразованиям подверглись и отрицательные формы поверхности. Площадь впадин имеет тенденцию к сокращению, площадь ложбин — увеличилась (табл. 2, 3). При этом количество обнаруженных впадин при общем сокращении их площади несколько увеличилось, что указывает на их дробление на отдельные фрагменты. Ярким примером «самоликвидации» впадин под действием заиливания служит бывшее русло р. Туапчи, следы которого в 2021 г. практически не обнаруживаются (рис. 3). Часть впадин преобразовалась в ложбины. Наряду с этим, как выяснилось, новые вогнутые формы образуются в пределах бывшего плато (около 40 % их общей площади), что вызвано врезанием формирующихся русел с образованием ложбин в аккумулятивной части отмели

и подводных откосах дельт. Так, участок нового подводного русла за 2005–2021 гг. образовался у р. Пшиша в виде ложбины на дельте выдвижения. Общая площадь вогнутых форм за исследуемый период в целом сократилась с 1559 до 1357 га вследствие, преимущественно, их заиливания.

Выделим доминирующий геоморфологический процесс эволюции ложа водохранилища — неуклонное нивелирование его поверхности, фактически выразившееся в росте площади плато за 16 лет на 2 км^2. Основными «донорами» процесса послужили впадины и фронтальные склоны (табл. 2, 3).

ВЫВОДЫ

Стандартные морфометрические характеристики водохранилищ, принятые в гидрометрии, ограничиваются видом, формой, высотным положением, размером ложа и объемом воды в водохранилище, а также батиграфическими кривыми. Приемы морфометрического анализа с использованием цифрового моделирования выводят анализ рельефа дна водоемов на новый уровень, способствуя пониманию процессов морфогенеза и направленности трансформации водохранилищ. Одним из эффективных инструментов геоморфометрии служит мультимасштабный индекс BPI (Bathymetric Position Index) с последующим выделением элементарных форм донного рельефа.

Ключевой геоморфологический процесс Краснодарского вдхр. — аккумуляция наносов, приводящая в целом к нивелированию поверхности ложа. Средний слой заиления на исследуемой акватории за 2005–2021 гг. составил 0,40 м, однако толщина слоя заиления при средних уклонах поверхности ложа около 0,2° весьма неравномерна. В рельефе котловины долинного Краснодарского вдхр., несмотря на почти полувековой период эксплуатации, хорошо сохранились затопленные долины рр. Кубани, Псекупса и Туапчи (бывший правый приток Псекупса).

В результате морфометрического анализа поверхности ложа Краснодарского вдхр. в пределах регулируемого объема на площади 224 км^2 по данным батиметрических съемок 2005 и 2021 гг. посредством BPI определены характерные формы рельефа, относящиеся к 3 категориям поверхностей: плоские (плато), вогнутые (ложбины, впадины) и выпуклые (гребни валов, тыловые или проксимальные склоны валов, фронтальные или дистальные склоны валов). В 2021 г. 89,2 % площади ложа водохранилища занимало плато, 4,1 % — впадины, 2 % — ложбины, 1,3 % — гребни вдольбереговых валов, 3 % — фронтальные склоны валов, 0,4 % площади — тыловые склоны валов. Установленные формы рельефа, несмотря на морфологическое подобие, могут иметь разный генезис. Так, часть ложбин образована затопленными руслами рек, часть — вогнутыми подножиями вдольбереговых аккумулятивных форм — валов. Происхождение валов также различно и определяется синергией флювиальных (валы дельтовых берегов) и абразионно-аккумулятивным процессов (вдольбереговые валы).

За 2005–2021 гг. морфологические преобразования затронули 34,1 км^2, или 15 % анализируемой площади водохранилища. В наибольшей мере перестройке подверглись прибрежные участки дна, а также затопленные русла рек. Часть затопленных долин (Псекупса, Туапчи и др.) оказались расчлененными на отдельные фрагменты и в процессе заиления эволюционируют через стадии «впадина – ложбина – плато». Для эволюции плато, наоборот, характерна дефрагментация — уменьшение за исследуемый период количества фрагментов с 280 до 222 при увеличении площади платообразных поверхностей на 2 км^2. Общая площадь впадин имеет тенденцию к сокращению, а ложбин — к увеличению. Образование ложбин, как форм рельефа, при врезании русел отмечено на аккумулятивной отмели и подводных откосах формирующихся дельт выдвижения (Кубани, Пшиша). Непрерывной трансформации подвержены и положительные формы рельефа.

Значительная часть тыловых и фронтальных склонов — это новые образования, сформировавшиеся на бывшем плато.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда и Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № 22-27-20008.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation and Kuban Science Foundation in the framework of the scientific project No. 22-27-20008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авакян А.Б., Салтанкин В.П., Шарапов В.А. Водохранилища. М.: Мысль, 1987. 331 с.

Алексеевский Н.И., Беркович К.М., Чалов Р.С., Чалов С.Р. Пространственно-временная изменчивость русловых деформаций на реках России. География и природные ресурсы, 2012. № 3. С. 13–21.

Землянов И.В., Шикунова Е.Ю., Горелиц О.В., Павловский А.Е. Использование цифровых моделей рельефа для уточнения современных морфометрических характеристик водохранилищ. Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Тр. межд. науч.-практ. конф. Пермь, 17–20 мая 2011 г. С. 189–193.

Калинин В.Г., Пьянков С.В., Перевощикова О.А. О формировании подводного рельефа дна долинных водохранилищ (на примере Камского). Географический вестник, 2018. № 1 (44). С. 128–137. DOI: 10.17072/2079-7877-2018-1-128-137.

Курбатова И.Е. Мониторинг трансформации Краснодарского водохранилища с использованием спутниковых данных высокого разрешения. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014. Т. 11. № 3. С. 42–53.

Лагута А.А., Погорелов А.В. Особенности заиления Краснодарского водохранилища. Опыт оценки по данным батиметрических съемок. Географический вестник, 2018. № 4 (47). С. 54–66. DOI: 10.17072/2079-7877-2018-4-54-56.

Лагута А.А., Погорелов А.В. Особенности дельтоформирования рек, впадающих в долинное водохранилище (на примере Краснодарского водохранилища). Географический вестник, 2019. № 3 (50). С. 119–134. DOI: 10/17072/2079-7877-2019-3-119-134.

Лурье П.М., Панов В.Д., Ткаченко Ю.Ю. Река Кубань: гидрография и режим стока. СПб.: Гидрометеоиздат, 2005. 500 с.

Назаров Н.Н., Тюняткин Д.Г., Фролова И.В., Черепанов А.В. Факторы и условия дифференциации наносов в береговой зоне камских водохранилищ. Географический вестник, 2011. № 4. С. 4–10.

Назаров Н.Н., Тюняткин Д.Г., Фролова И.В., Черепанов А.В. Морфолитогенез в зоне вдольберегового переноса наносов на Камском водохранилище (ст. 1. аккумулятивные формы). Географический вестник, 2013. № 1 (24). С. 33–39.

Погорелов А.В., Лагута А.А., Киселев Е.Н. Новые сведения о заилении Краснодарского водохранилища по данным батиметрической съемки. Географический вестник, 2022. № 2 (61). С. 166–179. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-2-166-179.

Финаров Д.П. Геоморфологический анализ и прогнозирование переформирования береговой зоны и дна водохранилищ. Л.: Наука, 1986. 227 с.

Флоринский И.В. Геоморфометрия сегодня. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 2. С. 394–448. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448.

Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Oxford: Elsevier, 2009. 765 p.

Guisan A., Weiss S.B., Weiss A.D. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. Plant Ecology, 1999. V. 143. P. 107–122.

Jenness J. Topographic Position Index (TPI). 2006. V. 1.2. 46 p.

Pogorelov A., Laguta A., Kiselev E., Lipilin D. Features of the long-term transformation of the Krasnodar reservoir, near the mouth of the Kuban River, Russia. Journal of Geographical Sciences, 2021. V. 31. P. 1895–1904. DOI: 10.1007/s11442-021-1928-7.

Verfaillie E., Doornenbal P., Mitchell A.J., White J., Van Lancker V. The bathymetric position index (BPI) as a support tool for habitat mapping, 2007. Электронный ресурс: https://www.researchgate.net/publication/242082725_Title_The_bathymetric_position_index_BPI_as_a_support_tool_for_habitat_mapping (дата обращения 01.03.2023).

Weiss A.D. Topographic positions and landforms analysis (conference poster). Proceedings of the 21st Annual ESRI User Conference. July 9–13. San Diego, CA, 2001.

Wilson M.F.J., O'Connell B., Brown C., Guinan J.C., Grehan A.J. Multiscale terrain analysis of multibeam bathymetry data for habitat mapping on the continental slope. Marine Geodesy, 2007. V. 30. No. 1–2. P. 3–35. DOI: 10.1080/01490410701295962.

REFERENCES

Alekseevskii N.I., Berkovich K.M., Chalov R.S., Chalov S.R. Spatiotemporal variability in channel deformations on rivers of Russia. Geography and Natural Resources, 2012. No. 3. P. 13–21 (in Russian).

Avakyan A.B., Saltankin V.P., Sharapov V.A. Reservoirs. Moscow: Mysl', 1987. 331 p. (in Russian).

Finarov D.P. Geomorphological analysis and forecasting of the reformation of the coastal zone and the bottom of reservoirs. Leningrad: Nauka, 1986. 227 p. (in Russian).

Florinsky I.V. Geomorphometry today. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2021. V. 27. Part 2. P. 394–448 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448.

Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Oxford: Elsevier, 2009. 765 p.

Guisan A., Weiss S.B., Weiss A.D. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. Plant Ecology, 1999. V. 143. 107–122.

Jenness J. Topographic Position Index (TPI). 2006. V. 1.2. 46 p.

Kalinin V.G., Pyankov S.V., Perevoshchikova O.A. On the formation of the underwater relief of valley reservoirs (by the example of the Kama Reservoir). Geographical Bulletin, 2018. No. 1 (44). P. 128–137 (in Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2018-1-128-137.

Kurbatova I.E. Monitoring of the transformation of the Krasnodar reservoir using high resolution satellite data. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2014. V. 11. No. 3. P. 42–53 (in Russian).

Laguta A.A., Pogorelov A.V. Peculiarities of Krasnodar water reservoir silting. Evaluation based on the data of bathymetric surveys. Geographical Bulletin, 2018. No. 4 (47). P. 54–66 (in Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2018-4- 54-66.

Laguta A.A., Pogorelov A.V. Peculiarities of delta formation in rivers flowing into the valley reservoir (a case study of Krasnodar reservoir). Geographical Bulletin, 2019. No. 3 (50). P. 119–134 (in Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2019-3-119-134.

Lurie P.M., Panov V.D., Tkachenko Yu.Yu. Kuban River: Hydrography and flow regime. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2005. 500 p. (in Russian).

Nazarov N.N., Tyunyatkin D.G., Frolova I.V., Cherepanov A.V. Factors and conditions of sediment differentiation in the coastal zone of the Kama reservoirs. Geographical Bulletin, 2011. No. 4. P. 4–10 (in Russian).

Nazarov N.N., Tyunyatkin D.G., Frolova I.V., Cherepanov A.V. Morpholithogenesis in the zone of alongshore sediment transport in the Kama Reservoir (St. 1. Accumulative forms). Geographical Bulletin, 2013. No. 1 (24). P. 33–39 (in Russian).

Pogorelov A.V., Laguta A.A., Kiselev E.N. New data on silting of the Krasnodar reservoir. Geographical Bulletin, 2022. No. 2 (61). P. 166–179 (in Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2022-2-166-179.

Pogorelov A., Laguta A., Kiselev E., Lipilin D. Features of the long-term transformation of the Krasnodar reservoir, near the mouth of the Kuban River, Russia. Journal of Geographical Sciences, 2021. V. 31. P. 1895–1904. DOI: 10.1007/s11442-021-1928-7.

Verfaillie E., Doornenbal P., Mitchell A.J., White J., Van Lancker V. The bathymetric position index (BPI) as a support tool for habitat mapping, 2007. Web resource: https://www.researchgate.net/publication/242082725_Title_The_bathymetric_position_index_BPI_as_a_support_tool_for_habitat_mapping (accessed 01.03.2023).

Weiss A.D. Topographic positions and landforms analysis (conference poster). Proceedings of the 21st Annual ESRI User Conference. July 9–13. San Diego, CA, 2001.

Wilson M.F.J., O'Connell B., Brown C., Guinan J.C., Grehan A.J. Multiscale terrain analysis of multibeam bathymetry data for habitat mapping on the continental slope. Marine Geodesy, 2007. V. 30. No. 1–2. P. 3–35. DOI: 10.1080/01490410701295962.

Zemlyanov I.V., Shikunova E.Yu., Gorelits O.V., Pavlovsky A.E. Using digital elevation models to refine modern morphometric characteristics of reservoirs. Modern problems of reservoirs and their watersheds. Scientific-practical conf. Perm, May 17–20, 2011. P. 189–193 (in Russian).

УДК: 51-7+528.94+551.4 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-482-510**

И.В. Флоринский[1]

ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ АНТАРКТИЧЕСКОГО ОАЗИСА ХОЛМЫ ЛАРСЕМАНН

АННОТАЦИЯ

Геоморфометрические методы широко применяются в науках о Земле. Однако геоморфометрическое моделирование и картографирование антарктических оазисов до сих пор не проводилось. В статье приводятся первые результаты работ по геоморфометрическому моделированию и картографированию антарктического оазиса холмы Ларсеманн, полученные в сезон 68-й Российской антарктической экспедиции в январе–апреле 2023 г. В качестве исходных данных для расчетов и моделирования использовался фрагмент цифровой модели рельефа (ЦМР) Reference Elevation Model of Antarctica. По выделенной и отредактированной ЦМР были рассчитаны цифровые модели и построены карты 17 морфометрических характеристик: крутизна склона, экспозиция склона, горизонтальная кривизна, вертикальная кривизна, разностная кривизна, избыточная горизонтальная кривизна, избыточная вертикальная кривизна, аккумуляционная кривизна, кольцевая кривизна, минимальная кривизна, максимальная кривизна, средняя кривизна, Гауссова кривизна, несферичность, водосборная площадь, топографический индекс и индекс мощности потоков. Проведены работы по полевому геоморфометрическому дешифрированию, которое необходимо для корректных физико-географических и геолого-геоморфологических интерпретаций морфометрических карт. С этой целью пройдены 54 пеших маршрута общей длиной около 422 км, в ходе которых было отобрано 150 образцов горных пород для их последующего петрологического и минералогического анализа и трехмерного моделирования. Рассчитанные карты могут быть полезны для геологических, геоморфологических, почвенных, биологических, климатических и гидрологических исследований. Конечной целью многолетнего авторского проекта является создание цифрового геоморфометрического атласа антарктических оазисов и других свободных от оледенения территорий Антарктики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рельеф, цифровая модель рельефа, геоморфометрия, Антарктика

Igor V. Florinsky[2]

GEOMORPHOMETRIC MODELING AND MAPPING OF THE LARSEMANN HILLS ANTARCTIC OASIS

ABSTRACT

Geomorphometric modeling is widely used in geosciences. However, geomorphometric modeling and mapping of Antarctic oases has not been performed so far. This article presents the

[1] Институт математических проблем биологии РАН — филиал ФИЦ «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН», Пущино, Московская обл., Россия, 142290, *e-mail:* **iflor@mail.ru**

[2] Institute of Mathematical Problems of Biology, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, 142290, Russia, *e-mail:* **iflor@mail.ru**

first results of geomorphometric modeling and mapping of the Larsemann Hills oasis obtained in the 68th Russian Antarctic Expedition in January–April 2023. As input data, we used a fragment of the Reference Elevation Model of Antarctica (REMA). From the extracted and edited digital elevation model, we derived models and maps of the following 17 morphometric variables: slope, aspect, horizontal curvature, vertical curvature, mean curvature, Gaussian curvature, minimal curvature, maximal curvature, unsphericity curvature, difference curvature, vertical excess curvature, horizontal excess curvature, ring curvature, accumulation curvature, catchment area, topographic index, and stream power index. We conducted a field geomorphometric interpretation to provide with correct physical geographic, geological, and geomorphological interpretations of morphometric maps. In this fieldwork, we carried out 54 foot routes with the total length of about 422 km. During the routes, we collected 150 rock samples for further petrological and mineralogical analyses and three-dimensional modeling of the samples. Morphometric maps can be useful for geological, geomorphological, soil, biological, and hydrological studies. The ultimate goal of the author's multiyear project is to create a digital geomorphometric atlas of Antarctic oases and other ice-free Antarctic territories.

KEYWORDS: topography, digital elevation model, geomorphometry, Antarctica

ВВЕДЕНИЕ

Антарктическими оазисами обычно называют свободные от ледникового покрова участки прибрежной зоны Антарктиды площадью от нескольких десятков до нескольких тысяч км^2, которые характеризуются:

1) местным климатом, в значительной мере определяемым окружающим ледниковым покровом;
2) наличием незамерзшей воды в виде системы сезонных ручьев и непромерзающих озер;
3) наличием примитивных почв и биоты [*Симонов*, 1971; *Сократова*, 2010].

Несмотря на относительно небольшие размеры, оазисы имеют важное научное и практическое значение. Благодаря своей доступности, они удобны для строительства круглогодичных станций и сезонных баз, а также обеспечивают возможность получать значительные объемы научного материала за короткий сезон [*Сократова*, 2010].

Геоморфометрия — научная дисциплина, лежащая на стыке геоинформатики, дистанционного зондирования, фотограмметрии и вычислительной математики, предметом которой является математическое моделирование и анализ рельефа, а также взаимосвязей между рельефом и другими компонентами геосистем [*Evans*, 1972; *Shary*, 1995; *Shary* et al., 2002; Geomorphometry…, 2009; *Florinsky*, 2016; 2017]. Геоморфометрия обладает развитой физико-математической теорией и мощным инструментарием вычислительных методов. Исходными данными для моделирования являются цифровые модели рельефа (ЦМР). Объектами моделирования обычно являются рельеф суши, подводный рельеф, поверхность ледников, подледниковый рельеф и рельеф внеземных территорий [*Florinsky*, 2017]. Геоморфометрические методы широко применяются для решения различных разномасштабных задач геоморфологии, гидрологии, почвоведения, геоботаники, лесоведения, геологии, океанологии, планетологии и других наук. Опыт исследований в области геоморфометрии обобщен в ряде обзоров и книг [*Флоринский*, 2021; Terrain Analysis…, 2000; Geomorphometry…, 2009; *Florinsky*, 2016; 2017; *Wilson*, 2018].

Перспективность геоморфометрического моделирования и картографирования антарктических оазисов достаточно очевидна как для получения новых знаний о количественных характеристиках рельефа этих уникальных территорий, так и для дальнейшего использования получаемой геоморфометрической информации для решения

фундаментальных и прикладных задач геоморфологии, геологии, геофизики, гляциологии, климатологии и др. Тем не менее, геоморфометрическое моделирование и картографирование антарктических оазисов до сих пор не проводилось.

В статье приводятся первые результаты работ по геоморфометрическому моделированию и картографированию антарктического оазиса холмы Ларсеманн, полученные автором в ходе выполнения его научной программы «Исследования по математико-картографическому моделированию рельефа в районе станции Прогресс, а также баз Молодежная и Гора Вечерняя и станций Новолазаревская и Беллинсгаузен» в сезон 68-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) в январе–апреле 2023 г. Конечной целью многолетнего проекта является создание геоморфометрического атласа антарктических оазисов и других свободных от оледенения территорий Антарктики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Описание района исследования

Работа проводилась на холмах Ларсеманн в Восточной Антарктиде (рис. 1). Территория представляет собой антарктический прибрежный оазис, включающий свободные ото льда невысокие холмы площадью около 45 км^2, расположенные на юго-восточном побережье залива Прюдс моря Содружества, Берег Ингрид Кристенсен, Земля Принцессы Елизаветы. Оазис состоит из двух крупных полуостровов Стурнес и Брокнес, трех небольших — Гровнес, Браттневет и Стинеар и около 130 островов, в т. ч. трех относительно крупных — Фишер, Мэннинг и МакЛеод (рис. 1). Полуострова и острова разделены системой фьордов и бухт Тала, Нелла, Клеменс, Долкой, Уилкок, Куилти и др. Оазис ограничен с востока выводным ледником Долк, с юга — ледниковым плато и с запада — выводным ледником Поларарбокен.

Холмы Ларсеманн сложены протерозойскими гранат-биотит-силлиманитовыми гнейсами и сланцами, присутствуют интрузии пегматитов и гранитов [*Stïwe* et al., 1989; *Carson*, *Grew*, 2007; План управления, 2021]. На полуострове Стурнес развиты уникальные боросиликатные и фосфатные комплексы [План управления, 2014].

Холмы Ларсеманн освободились от ледникового покрова от 20 000 до 10 000 лет назад [*Burgess* et al., 1994; *Kiernan* et al., 2009]. Рельеф оазиса представляет собой структурно контролируемый экзарационный скалистый мелкосопочник [*Большиянов*, 2011]. Продолговатая форма крупных элементов местного рельефа объясняется наличием складок и разломов в метаморфических коренных породах [План управления, 2021]. Из экзогенных рельефообразующих процессов доминирует нивация. Ландшафт изрезан фьордами и долинами с крутыми склонами (рис. 1). Отметки высот лежат в пределах от 30 до 120 м. Максимальная высота составляет 158 м над уровнем моря (пик Бланделл). В оазисе имеется около 150 озер. Дренажная сеть не развита. Распространены снежники. На п-ове Стурнес расположен небольшой пассивный ледниковый купол.

Холмы Ларсеманн являются Особо управляемым районом Антарктики № 6 [План управления, 2021], а полуостров Стурнес и прилегающие районы — Особо охраняемым районом Антарктики № 174 (геологическим заказником) [План управления, 2014]. В оазисе находятся три круглогодичные полярные станции: Прогресс (Россия), Зонгсан (Китай) и Бхарати (Индия) (рис. 1). К югу от станции Прогресс на ледниковом плато расположен снежно-ледовый аэродром Зенит (Россия).

Геоморфометрическое моделирование

В качестве исходных данных для расчетов и моделирования автор использовал фрагмент ЦМР Reference Elevation Model of Antarctica (REMA) ver. 1.1 [*Howat* et al., 2019]. На сегодняшний день эта ЦМР, полученная фотограмметрическим способом по снимкам

космических аппаратов WorldView-1, WorldView-2 и WorldView-3, является наиболее полной и точной ЦМР территории Антарктиды.

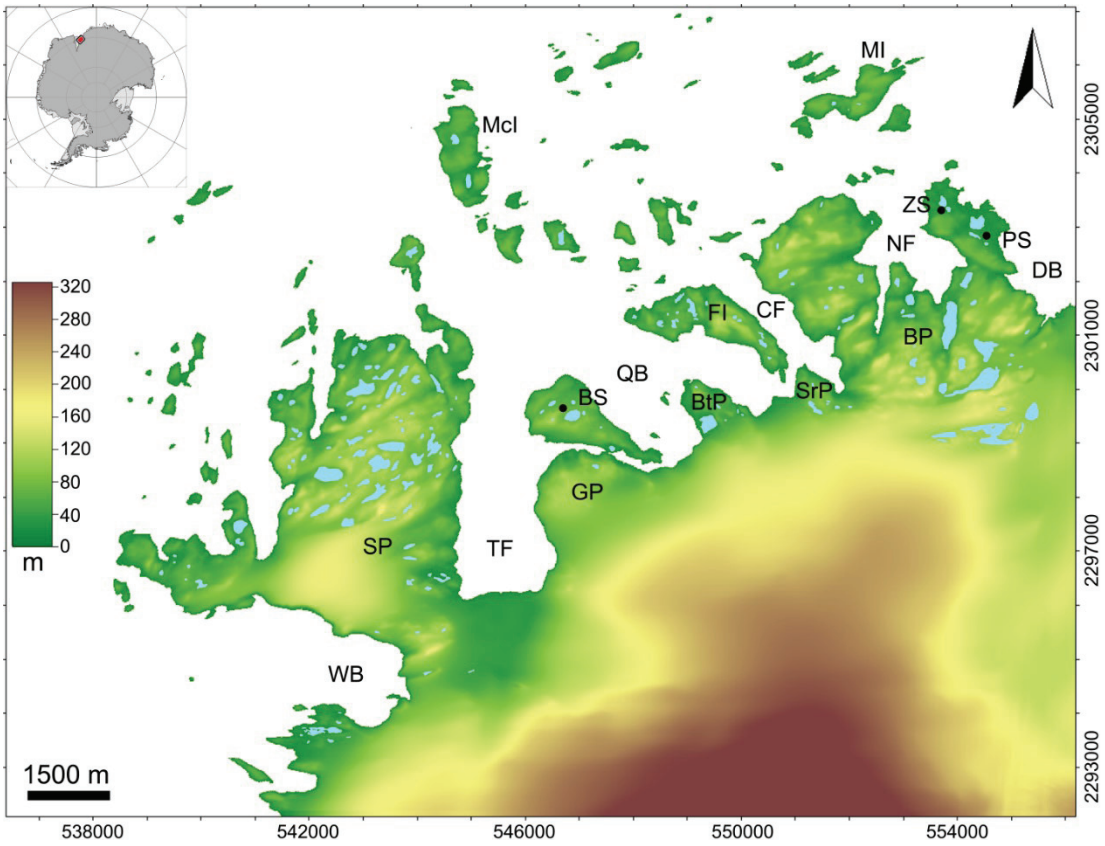


Рис. 1. Холмы Ларсеманн, географическое положение и высоты, м (выделены из ЦМР REMA [Howat et al., 2019]). Полуострова: BP — Брокнес, BtP — Браттневет, GP — Гровнес, SP — Стурнес, SrP — Стинеар; острова: FI — Фишер, MI — Мэннинг, McI — МакЛеод; фьорды: CF — Клеменс, NF — Нелла, TF — Тала; бухты: DB — Долкой, WB — Уилкок, QB — Килти; станции: PS — Прогресс (Россия), ZS — Зонгсан (Китай), BS — Бхарати (Индия)

Fig. 1. Larsemann Hills, the geographic location and elevations, m (extracted from the REMA DEM [Howat et al., 2019]). Peninsulas: BP — Broknes, BtP — Brattnevet, GP — Grovnes, SP — Stornes, SrP — Stinear; islands: FI — Fisher, MI — Manning, McI — McLeod; fjords: CF — Clemence, NF — Nella, TF — Thala; bays: DB — Dålkoy, WB — Wilcock, QB — Quilty; stations: PS — Progress (Russia), ZS — Zhogshan (China), BS — Bharati (India)

Предварительная оценка точности и качества ЦМР REMA показала, что в пределах оазиса она удовлетворяет требованиям геоморфометрического моделирования (низкий уровень высокочастотного шума, незначительное количество явных артефактов, достаточная гладкость поверхности, не требующая дополнительного сглаживания).

Для первичной обработки и редактирования ЦМР, геоморфометрических расчетов и картографирования использовалось программное обеспечение System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) Version 7.8.2 [*Conrad* et al., 2015].

Из ЦМР REMA автором был выделен фрагмент 18 168 × 14 968 м, включающий оазис и прилегающие участки ледникового плато и выводных ледников. ЦМР содержит 4 253 184 точек (матрица высот 2272 × 1872), шаг сетки ЦМР составляет 8 м. ЦМР REMA

не описывает рельеф морского дна, поэтому в выделенной ЦМР количество ячеек со значениями высот составляет 2 068 674.

ЦМР REMA представлена в полярной стереографической проекции (высоты даны относительно эллипсоида WGS84). Выделенная ЦМР была перепроектирована автором в проекцию UTM, зона 43S (рис. 1). Шаг сетки перепроектированной ЦМР составляет 8 м.

Затем автором в ручном режиме было проведено редактирование выделенной ЦМР для удаления артефактов — «островов», которые являются образами айсбергов. При этом в качестве справочного материала использовалась карта [Larsemann Hills, 2005].

По отредактированной ЦМР для территории оазиса автором были рассчитаны цифровые модели 17 морфометрических величин. К ним относятся 14 локальных морфометрических величин: крутизна (G), экспозиция (A), горизонтальная кривизна (k_h), вертикальная кривизна (k_v), разностная кривизна (E), избыточная горизонтальная кривизна (k_{he}), избыточная вертикальная кривизна (k_{ve}), аккумуляционная кривизна (K_a), кольцевая кривизна (K_r), минимальная кривизна (k_{min}), максимальная кривизна (k_{max}), средняя кривизна (H), Гауссова кривизна (K), несферичность (M); одна нелокальная морфометрическая величина — водосборная площадь (CA), а также 2 комбинированные величины: топографический индекс (TI) и индекс мощности потоков (SI). Определения, формулы и интерпретации этих величин см. [*Florinsky*, 2016; 2017].

Возможности SAGA позволяют проводить непосредственный расчет цифровых моделей лишь части указанных морфометрических величин. В частности, непосредственно методом Эванса [*Evans*, 1972] автором были рассчитаны модели 6 локальных морфометрических величин: G, A, k_h, k_v, k_{min} и k_{max}. Модели остальных 8 локальных морфометрических величин — E, k_{he}, k_{ve}, K_a, K_r, H, K и M — были последовательно рассчитаны с использованием их формул и опции SAGA, позволяющей проводить арифметические действия с растровыми слоями. Аналогично, после расчета в SAGA модели total catchment area, на ее основе автором были получены модели CA, TI и SI. При расчете двух последних также использовалась рассчитанная ранее модель G.

В ЦМР REMA отсутствует батиметрия озер, но ячейки ЦМР, соответствующие озерам, не обозначены “no data value” как морская акватория, а содержат значения «высот», полученные путем интерполяции береговых высот, т. е. являются артефактами. В этой связи озера на всех рассчитанных картах были маскированы. Для создания маски озер использовалась карта [Larsemann Hills, 2005].

По рассчитанным моделям были построены карты этих морфометрических величин (рис. 2–9). Все карты представлены в проекции UTM, зона 43S.

Полевые работы

Полевое геоморфометрическое дешифрирование необходимо преимущественно для проведения корректных физико-географических и геолого-геоморфологических интерпретаций элементов изображения морфометрических карт.

Полевое геоморфометрическое дешифрирование основано на прохождении сетки пеших маршрутов по территории, на которую составляются морфометрические карты. Для пространственного разрешения карт оазиса Ларсеманн, рассчитанных по цифровой модели рельефа REMA с шагом сетки 8 м; расстояние между маршрутами может составлять 300–500 м в зависимости от типа рельефа, крутизны склона, типа поверхности (скалы, курумы, снежники), наличия озер и других элементов ландшафта, оказывающих влияние на возможность и скорость передвижения в пешем порядке.

Оптимальная длина и длительность пешего маршрута геоморфометрического дешифрирования в условиях сильно пересеченной местности и антарктического климата в летний сезон составляет 6–10 км и 5–8 ч. соответственно. При таком режиме возможно

проведение полевых работ ежедневно в течение длительного времени (месяц и более) без ухудшения качества работ из-за физической или психологической усталости.

Запланированный маршрут может корректироваться в ходе его прохождения в зависимости от реальных условий местности и погоды. В частности, в сезон легкий снегопад и ветер со скоростью до 10 м/с при температурах от 5 до −5 °С в целом не препятствуют прохождению маршрута (снег сдувается со склонов и приводораздельных участков и, как правило, тает на следующий день). Вместе с тем, в конце февраля сильный многодневный снегопад или метель при температурах от −5 до −15 °С может существенно осложнить или приостановить на неопределенное время полевые работы, т. к. проходимость местности становится проблематичной из-за возникающего рыхлого снежного покрова толщиной до полуметра на склонах и более в понижениях рельефа. Этот снег уже не растает до следующего лета. В то же время ветер со скоростью 30–40 м/с, как правило, может за сутки сдуть рыхлый снег со склонов, а несколько солнечных дней с температурами воздуха порядка −20 °С приводят к образованию прочного наста в понижениях и на снежниках. В результате проходимость местности восстанавливается.

В ходе полевого геоморфометрического дешифрирования автором проводились: 1) сравнительный визуальный анализ элементов реального рельефа местности и их отображения на морфометрических картах; 2) отбор геологических образцов для их последующего петрологического и минералогического анализа и уточнения имеющейся геологической информации с целью изучения связей между статистическими характеристиками морфометрических моделей и свойствами горных пород, слагающих картографируемые территории, а также для создания цифровых трехмерных (3D) моделей образцов для иллюстрирования разрабатываемого геоморфометрического атласа.

В сезон 68 РАЭ в оазисе Ларсеманн автором самостоятельно были пройдены 54 пеших маршрута геоморфометрического дешифрирования[1], общая длина которых составила около 422 км (рис. 10, табл. 1). В ходе маршрутов автором были отобраны 150 образцов горных пород со средними размерами от 10 × 5 × 5 до 25 × 20 × 10 см (рис. 10). Также в ходе маршрутов проводилось подробное фотографирование проходимых ландшафтов; фотографии необходимы для постэкспедиционного анализа рассчитанных карт и иллюстрирования создаваемого геоморфометрического атласа.

Подчеркнем: полевое геоморфометрическое дешифрирование служит проведению корректных физико-географических и геолого-геоморфологических интерпретаций морфометрических карт и не требует выполнения каких-либо полевых измерений. Метрическая составляющая работы проводится камерально, еще до выхода в поле и состоит в математически строгих расчетах морфометрических моделей и карт. Для атласного геоморфометрического картографирования какие-либо полевые измерения тоже не требуются; необходимы визуальные наблюдения картографируемой территории.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты

Фрагменты некоторых морфометрических карт оазиса представлены на рис. 2–9.

Карта *G* (рис. 2) отображает пространственное распределение крутизны склонов. Наиболее крутые склоны имеют горные массивы Стена (южный Брокнес), хребет Расти и утес Кастл (западный Брокнес), безымянная гора к югу от холма Кантербери, а также береговые склоны северо-западного Брокнеса и южного Стурнеса (где они совпадают с краевым обрывом пассивного ледникового купола Стурнес). Несмотря на невысокие

[1] Полуостров Стурнес является Особо охраняемым районом Антарктики (ООРА) № 174 [План управления, 2014]. Для работы на его территории было получено разрешение в Росгидромете.

отметки высот и использование для описания рельефа терминов «холмы», «мелкосопочник», на многих местах рельеф производит впечатление скалистых гор.

Карта *A* отображает пространственное распределение экспозиции склонов. Значительная часть склонов у вытянутых холмов Брокнеса и Стурнеса ориентирована на северо-запад и юго-восток, соответствуя общей разрывной структуре региона. Склоны холмов п-овов Гровнес, Браттневет, Стинеар и о. Фишер как бы вклиниваются между Брокнесом и Стурнесом и ориентированы преимущественно на юго-запад и северо-восток. Это может служить косвенным признаком различия геологического происхождения и/или развития этих двух групп территорий.

Карта k_h (рис. 3) отображает распределение зон конвергенции и дивергенции поверхностных потоков ($k_h < 0$ и $k_h > 0$, соответственно). В геоморфологическом смысле это отроги долин и приводораздельных областей (синие и коричневые оттенки соответственно). В комбинации, зоны конвергенции и дивергенции отображают потоковую структуру местности, которая здесь, очевидно, структурно предопределена.

Карта k_v (рис. 4) отображает пространственное распределение зон относительного замедления и ускорения поверхностных потоков ($k_v < 0$ и $k_v > 0$, соответственно). В геоморфологическом плане на этой карте можно видеть области резкого перепада высот (эскарпы, обрывы и т. п.). Также на карте хорошо читается линеаментная сеть территории.

Карты k_{min} и k_{max} (рис. 5 и 6) целесообразно рассматривать совместно. Их анализ позволяет выявить два типа вытянутых линейных форм: вогнутые — долины и подножия склонов, которые отображаются темно-синими линиями (рис. 5, $k_{min} < 0$) и выпуклые — хребты и бровки склонов, которые отображаются темно-коричневыми линиями (рис. 6, $k_{max} > 0$). С точки зрения выявления геологических линеаментов (разломов, складок и т. п.) территории этого оазиса карты k_{min} и k_{max} являются наиболее информативным материалом, т. к. все линеаменты видны на этих картах невооруженным глазом и их выявление не требуют дополнительной обработки изображения этих карт.

Карты других типов кривизн, на первый взгляд, не несут существенно новой информации, по сравнению с картами наиболее популярных в науках о Земле четверки кривизн k_h, k_v, k_{min} и k_{max}, которые рассмотрены выше. Здесь необходимо отметить, что рассчитанные 12 типов кривизн входят в математически полную систему кривизн поверхности [*Shary*, 1995]. С точки зрения теории геоморфометрии их совместное применение и анализ имеет фундаментальный характер. Рассмотрим далее кратко полученные карты других кривизн.

H представляет два механизма аккумуляции потоков — конвергенцию и относительное замедление — с равными весами. Поэтому неудивительно, что карта *H* визуально представляет собой некую среднюю картину карт k_h и k_v (рис. 3 и 4). *K* сохраняет свои значения после изгибания поверхности, если оно произошло без растяжений, сжатий и разрывов. Карта *K* может быть полезна в геологических исследованиях эволюции рельефа оазиса.

E показывает, насколько сильнее выражен один из двух механизмов аккумуляции поверхностных потоков под действием гравитации — относительное замедление потоков (за которое отвечает k_v), по сравнению с другим механизмом — конвергенцией потоков (за которую отвечает k_h) в данной точке поверхности. Карта *E* может применяться для сравнительного анализа преобладания механизмов аккумуляции потоков вещества в седиментологии. Для этих же целей может применяться карта K_a, т. к. эта морфометрическая величина оценивает степень аккумуляции потоков.

k_{he} показывает, насколько сильнее изогнуто нормальное сечение, тангенциальное горизонтали по сравнению с минимальным изгибом топографической поверхности в данной точке. k_{ve} показывает, насколько сильнее изогнуто нормальное сечение, имеющее общую касательную с линией скольжения по сравнению с минимальным изгибом

поверхности в данной точке. *M* показывает, насколько форма элемента поверхности отклоняется от сферической (рис. 7). K_r описывает степень извилистости потоков.

CA является мерой площади участков, которые могут дренироваться через данную точку. В результате на карте *CA* (рис. 8) в виде светлых и темных линий (низкие и высокие значения *CA*) ясно выделяются хребты и долины. На карте *CA* видна потоковая структура ледников, существенно отличающаяся от структуры оазиса по рисунку карты.

TI является мерой степени аккумуляции потоков. Чем больше водосборная площадь и чем меньше крутизна склонов, тем выше значение топографического индекса и тем больше потенциальное накопление влаги в приповерхностном слое (рис. 9). *SI* является мерой потенциальной эрозионной силы поверхностных потоков. Чем больше водосборная площадь и крутизна склонов, тем выше значение *SI*.

В сезон 68 РАЭ бóльшая часть территории оазиса холмы Ларсеманн была покрыта автором достаточно плотной сеткой маршрутов геоморфометрического дешифрирования (общей длиной около 422 км) и сеткой отбора геологических образцов (150 ед.) (рис. 10). Это позволяет рассчитывать на успешное проведение следующих постэкспедиционных этапов работы по авторскому проекту (см. следующий раздел).

Обсуждение

Цифровые геоморфометрические модели и карты территории оазиса холмы Ларсеманн могут быть полезны прежде всего для выявления и картографирования выраженных в рельефе разрывных нарушений и складок [*Florinsky*, 2016, chaps. 13, 14], которые отображаются на картах кривизн в виде линеаментов (рис. 3–7). Как уже отмечалось в предыдущем разделе, в условиях рельефа данного региона для этих целей наиболее полезными оказались карты k_{min} и k_{max} (рис. 5 и 6). Карты остальных типов кривизн могут использоваться для уточнения положения, геометрии и типа разломов и складок, выявленных по картам k_{min} и k_{max}.

Территория оазиса в геологическом плане является в целом открытой, т. е. отсутствуют почвенный и растительный покровы, четвертичные отложения встречаются в отдельных долинах и впадинах, а выходы коренных пород наблюдаются повсеместно. Поэтому полевая верификация выявленных линеаментов в большинстве случаев не может вызывать существенных затруднений (проблемой являются снежники на п-ове Стурнес).

Совместное использование моделей k_h и k_v (рис. 3 и 4) позволяет выявлять зоны относительной аккумуляции поверхностных потоков, которые одновременно являются узлами пересечения разрывных нарушений и характеризуются повышенной раздробленностью и проницаемостью горных пород [*Florinsky*, 2016, chap. 15]. В этих зонах происходит взаимодействие и обмен между двумя потоками веществ:

1) латеральным потоком веществ, перемещаемых вдоль земной поверхности и в приповерхностном слое под действием гравитации (вода, растворенные и взвешенные в ней вещества);
2) вертикальным восходящим потоком веществ (флюиды, подземные воды различной минерализации и температуры).

Карта зон аккумуляции/узловых структур, построенная по моделям k_h и k_v, может быть полезна для геохимических и минералогических исследований оазиса, особенно полуострова Стурнес, где развиты боросиликатные и фосфатные комплексы, происхождение которых до конца не ясно.

Известно, что рельеф во многом определяет тепловой, ветровой и гидрологический режим склонов, контролируя таким образом распределение и свойства почв и растительного покрова [*Florinsky*, 2016, chap. 9]. В частности, информация о *G* и *A*,

совместно с данными о положении Солнца может быть использована для расчета моделей инсоляции местности, а совместно с данными о розе ветров — для создания карт наветренных и подветренных склонов, прогноза пространственной дифференциации снегонакопления и выявления участков, защищенных от ветрового воздействия.

Такая информация важна для почвенных, геоботанических и экологических исследований оазиса, где одним из основных метеорологических факторов, определяющих микроклимат, является сильный постоянный катабатический ветер. Информация о дифференциации склонов по уровню инсоляции и об участках, защищенных от ветрового воздействия, может быть полезна для уточнения и прогноза распределения в оазисе примитивных почв [*Мергелов*, 2014] и растительности (мхи, лишайники, водоросли) [*Gupta*, 2015]. Для уточнения такого прогноза может быть полезна карта *TI* (рис. 9), которая отображает морфометрические предпосылки путей миграции и областей аккумуляции жидкой влаги в ландшафте в летний период.

Для территории оазиса актуальна задача мониторинга и прогноза прорыва озер (часть которых являются каскадными системами), которые на п-ове Брокнес могут представлять угрозу для связности ст. Прогресс с аэродромом Зенит и ст. Восток [*Боронина*, 2022]. На карте *TI* (рис. 9, верх) в восточной и юго-восточной части Брокнеса видны потенциальные пути сброса паводковых вод (узкие красные зоны) из о. LH73 в о. Прогресс, затем в о. Сибторп и далее по каньону в бухту Долкой, а также из о. Боулдер к зоне провала 2017 г. на леднике Долк и далее в сторону бухты Долкой. Таким образом, *TI* может применяться для выявления морфометрических предпосылок путей сброса паводковых вод по озерным каскадам оазиса.

Все типы кривизн являются функциями первых и вторых частных производных высоты, поэтому они чувствительны к незначительным перепадам значений высоты [*Florinsky*, 2016, chap. 5], в т. ч. к высокочастотному шуму и артефактам. Как уже отмечалось, использованный фрагмент ЦМР REMA характеризуется достаточной гладкостью и практически полным отсутствием видимого высокочастотного шума (рассчитанные карты хорошо читаются). Вместе с тем на всех картах кривизн (рис. 3–7) хорошо виден специально не удаленный автором артефакт — линеамент, проходящий под косым углом на севере западного Брокнеса и отсекающий п-ов Миррор от остальной части восточного Брокнеса. Это след сшивки двух тайлов ЦМР REMA.

Чувствительность кривизн к малым изменениям высоты проявляется также в различном «стиле» отображения на картах кривизн участков оазиса, свободных ото льда, и поверхности ледников. Территория оазиса окрашена контрастными цветами или оттенками одного цвета, что объясняется существенными изменениями значений кривизн, в то время как ледники окрашены блеклыми цветами или оттенками одного цвета, что является следствием незначительных изменений значений кривизн (рис. 3–7).

В постэкспедиционный период отобранные образцы пород будут использованы для решения двух задач. Во-первых, будет проведен петрологический и минералогический анализ образцов, который призван уточнить информацию о возрасте и составе пород исследуемой территории, доступную по существующей, но излишне генерализованной геологической карте оазиса [*Carson*, *Grew*, 2007]. Полученные в результате данные должны способствовать выявлению и анализу связей между статистическими характеристиками морфометрических моделей и возрастом/составом горных пород.

Во-вторых, методами цифровой фотограмметрической музеефикации [*Дрыга*, 2019] будут созданы цифровые трехмерные модели отобранных образцов, которые будут использованы при составлении цифрового геоморфометрического атласа антарктических оазисов для иллюстрации петрологической и минералогической компоненты картографируемых ландшафтов оазиса.

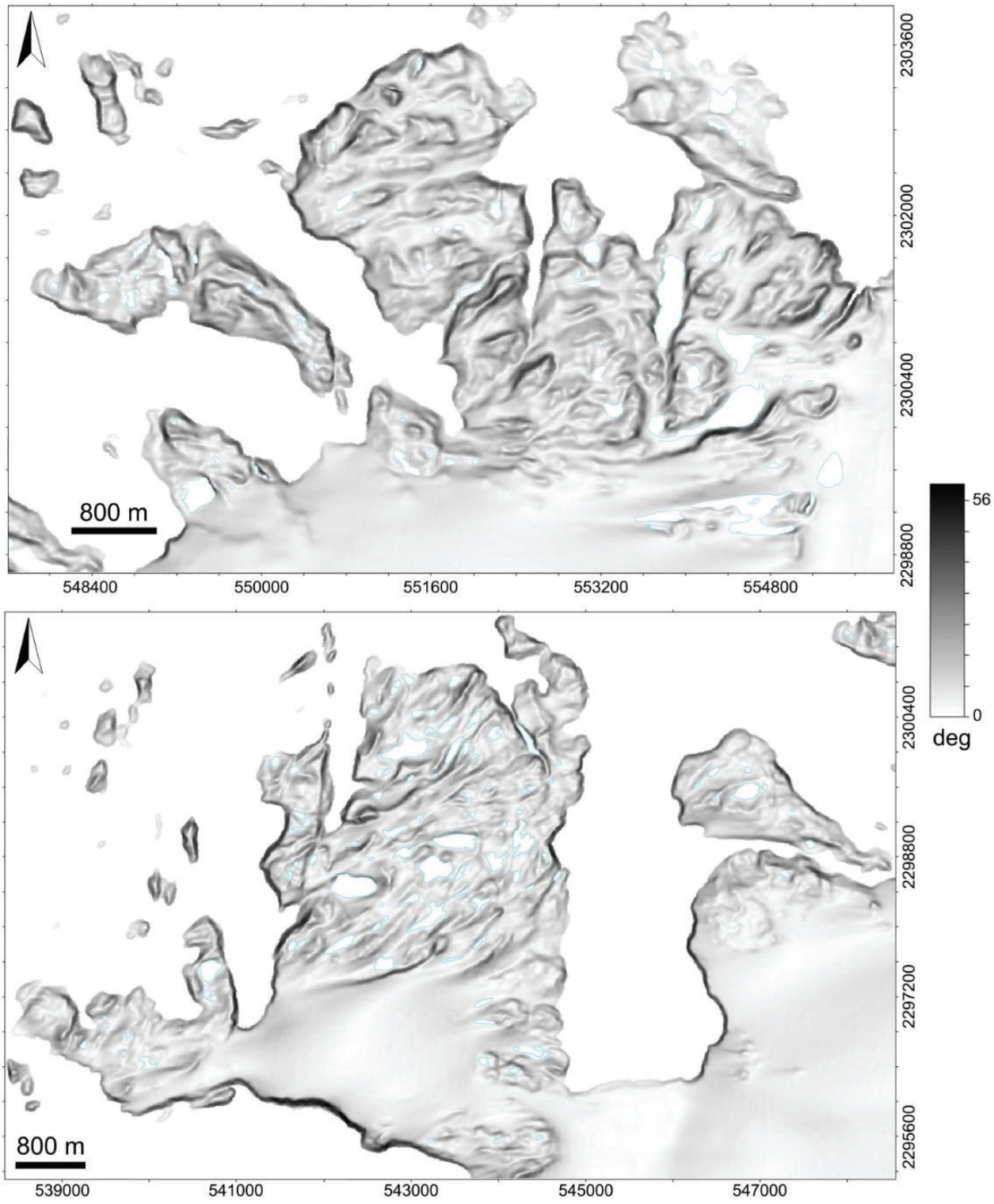


Рис. 2. Холмы Ларсеманн, крутизна склона, °.
Вверху — п-ов Брокнес, внизу — п-ов Стурнес
Fig. 2. Larsemann Hills, slope, °.
Above is the Broknes Peninsula, below — the Stornes Peninsula

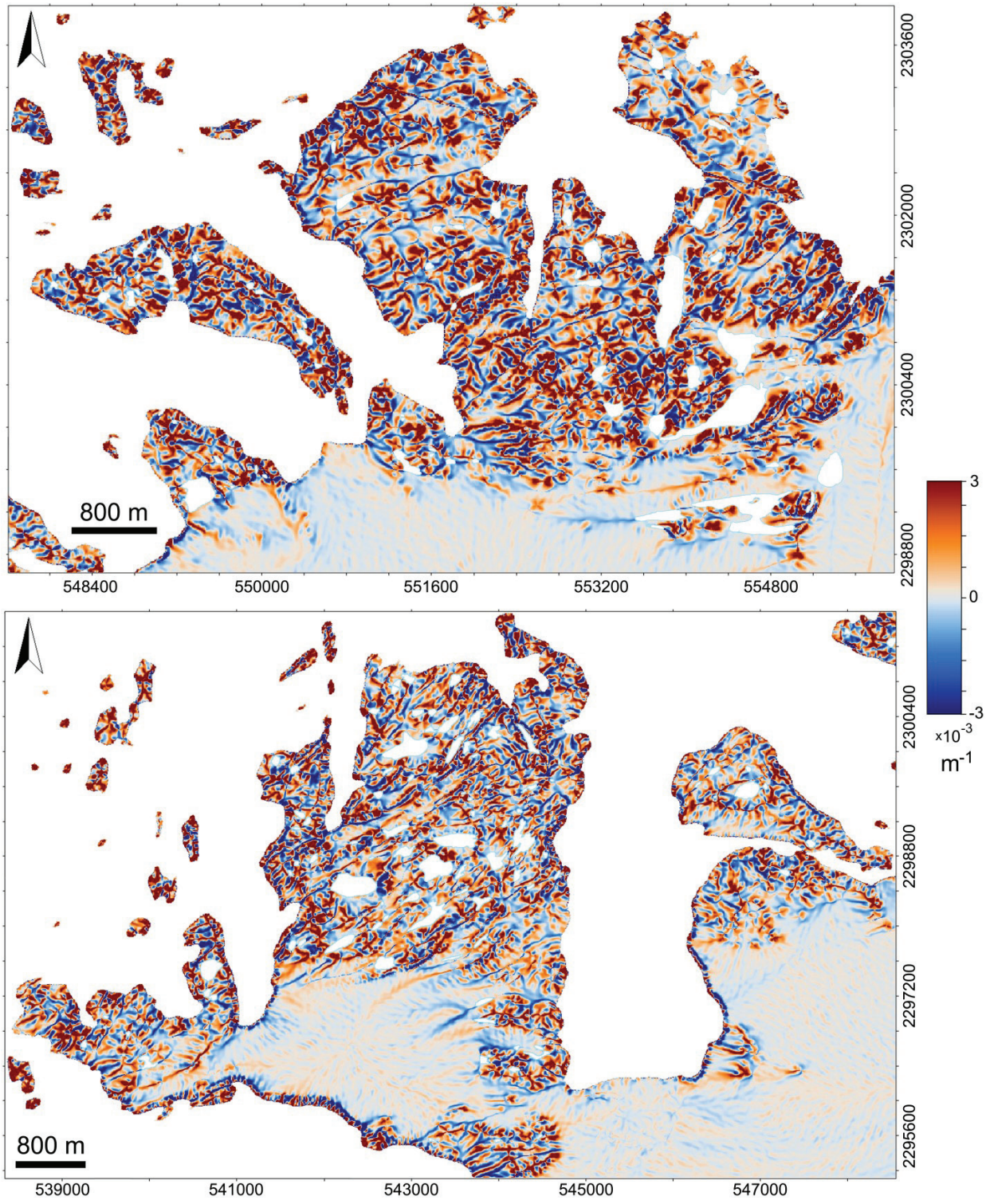


Рис. 3. Холмы Ларсеманн, горизонтальная кривизна, м$^{-1}$.
Вверху — п-ов Брокнес, внизу — п-ов Стурнес
Fig. 3. Larsemann Hills, horizontal curvature, m^{-1}.
Above is the Broknes Peninsula, below — the Stornes Peninsula

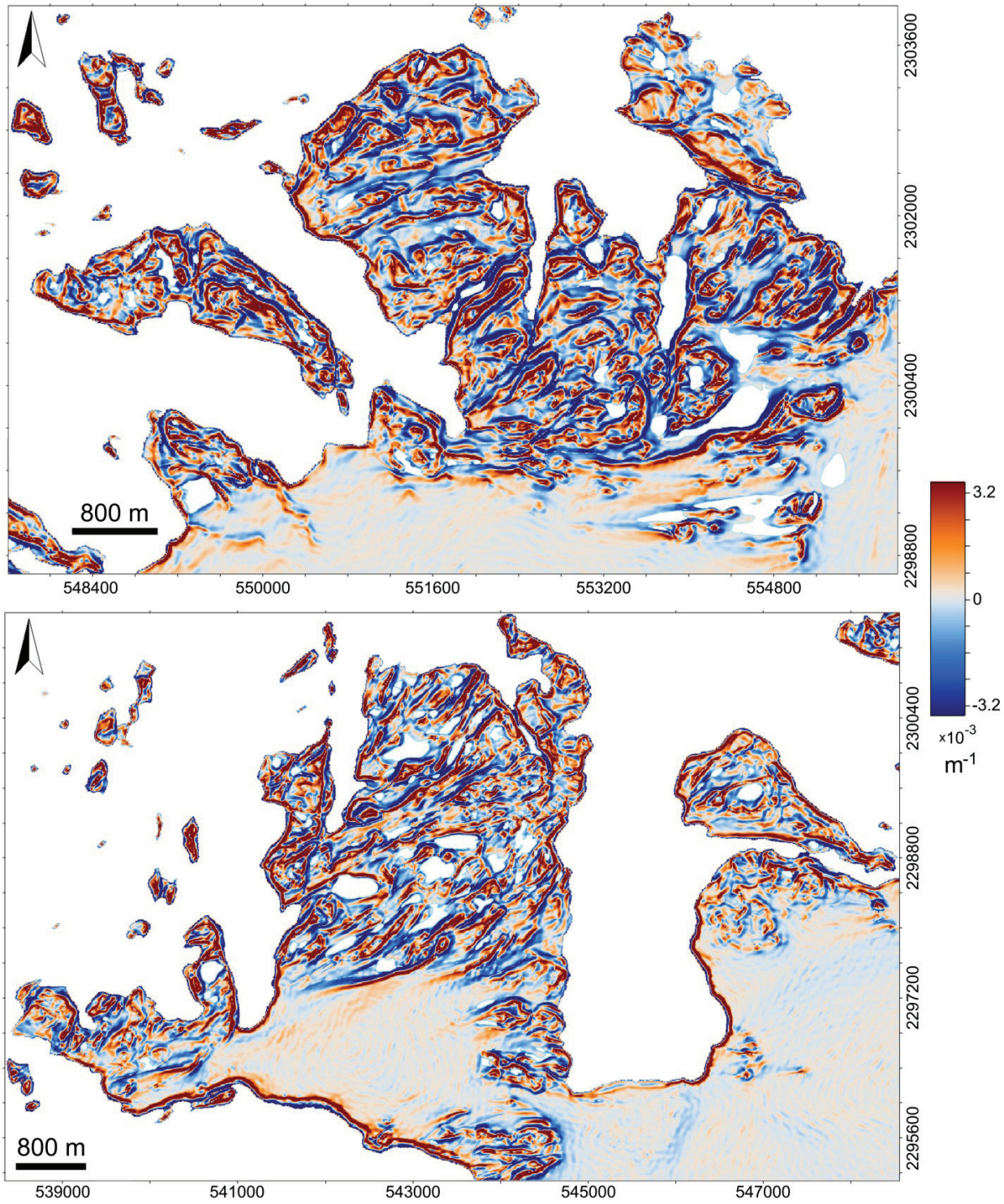


Рис. 4. Холмы Ларсеманн, вертикальная кривизна, м$^{-1}$.
Вверху — п-ов Брокнес, внизу — п-ов Стурнес
Fig. 4. Larsemann Hills, vertical curvature, m^{-1}.
Above is the Broknes Peninsula, below — the Stornes Peninsula

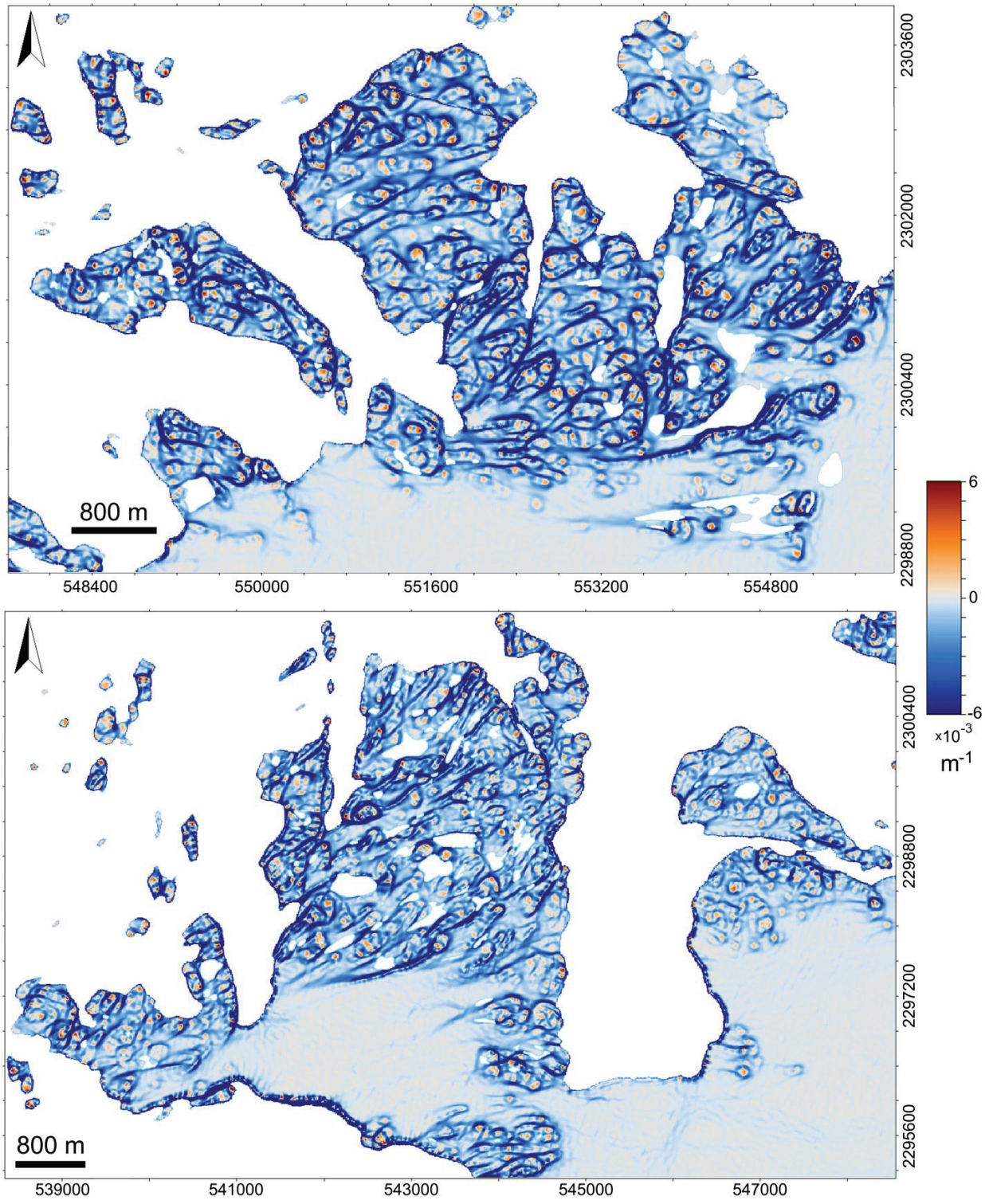


Рис. 5. Холмы Ларсеманн, минимальная кривизна, м$^{-1}$.
Вверху — п-ов Брокнес, внизу — п-ов Стурнес
Fig. 5. Larsemann Hills, minimal curvature, m^{-1}.
Above is the Broknes Peninsula, below — the Stornes Peninsula

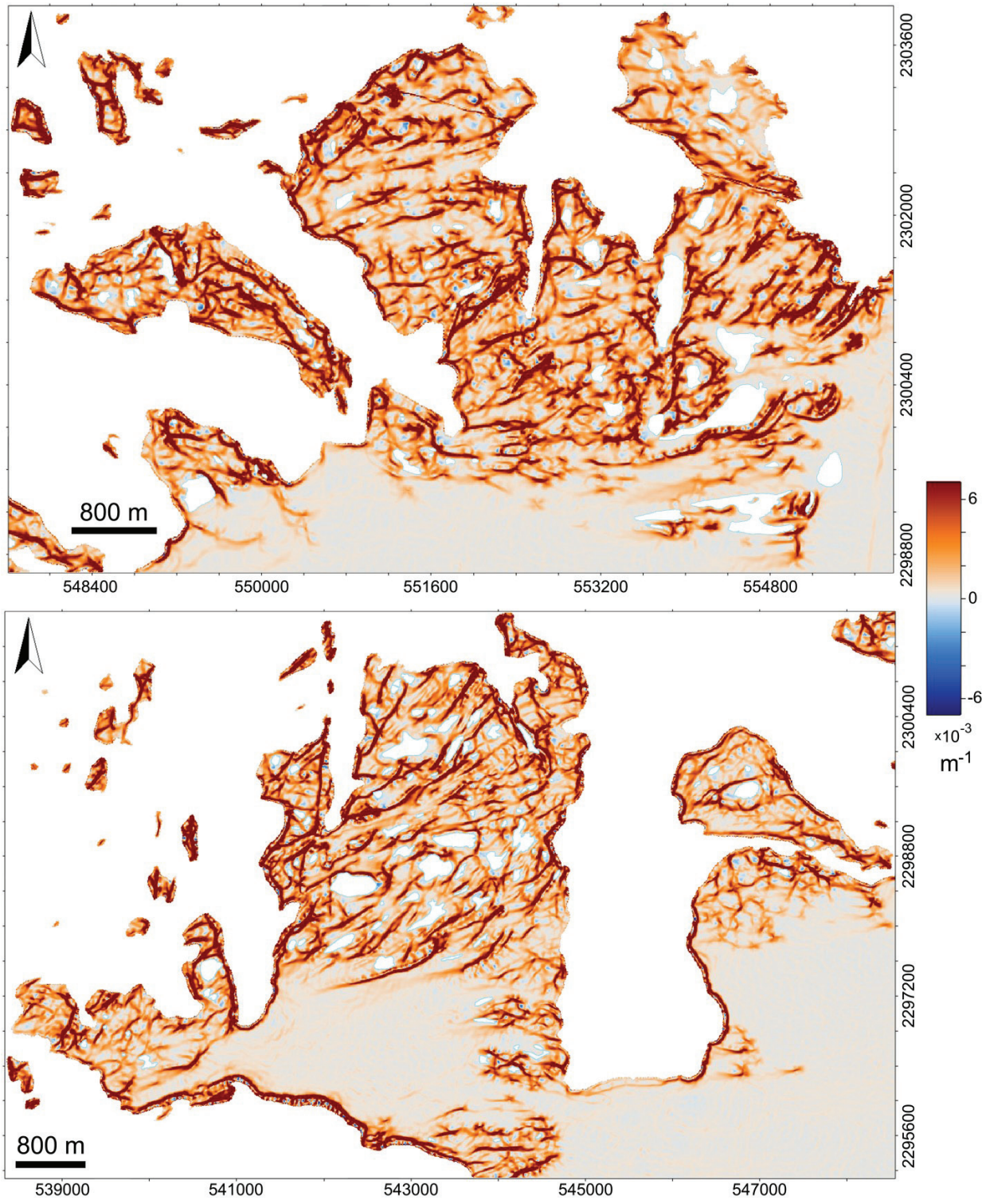


Рис. 6. Холмы Ларсеманн, максимальная кривизна, м$^{-1}$.
Вверху — п-ов Брокнес, внизу — п-ов Стурнес
Fig. 6. Larsemann Hills, maximal curvature, m^{-1}.
Above is the Broknes Peninsula, below — the Stornes Peninsula

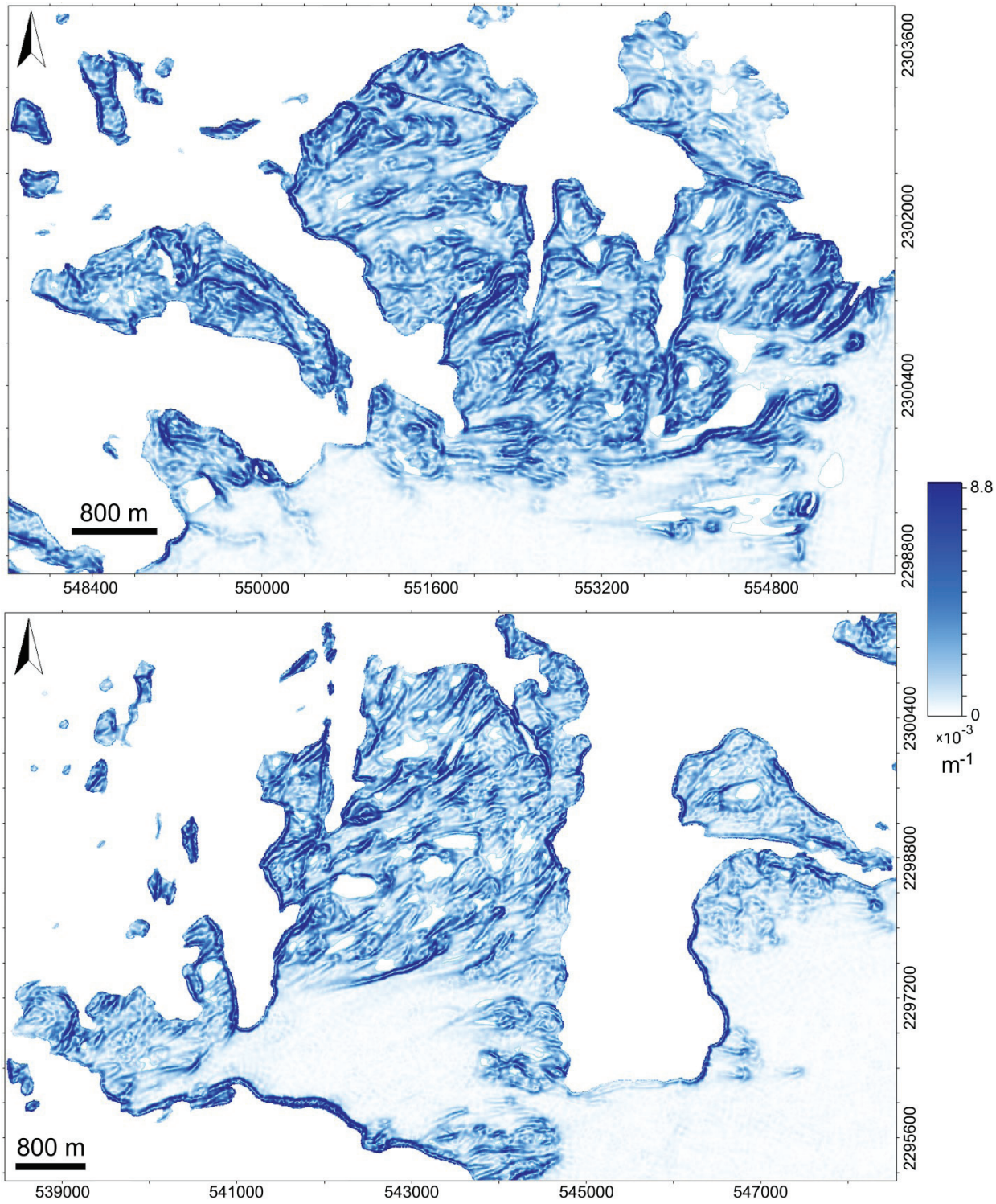


Рис. 7. Холмы Ларсеманн, несферичность, м$^{-1}$.
Вверху — п-ов Брокнес, внизу — п-ов Стурнес
Fig. 7. Larsemann Hills, unsphericity curvature, m^{-1}.
Above is the Broknes Peninsula, below — the Stornes Peninsula

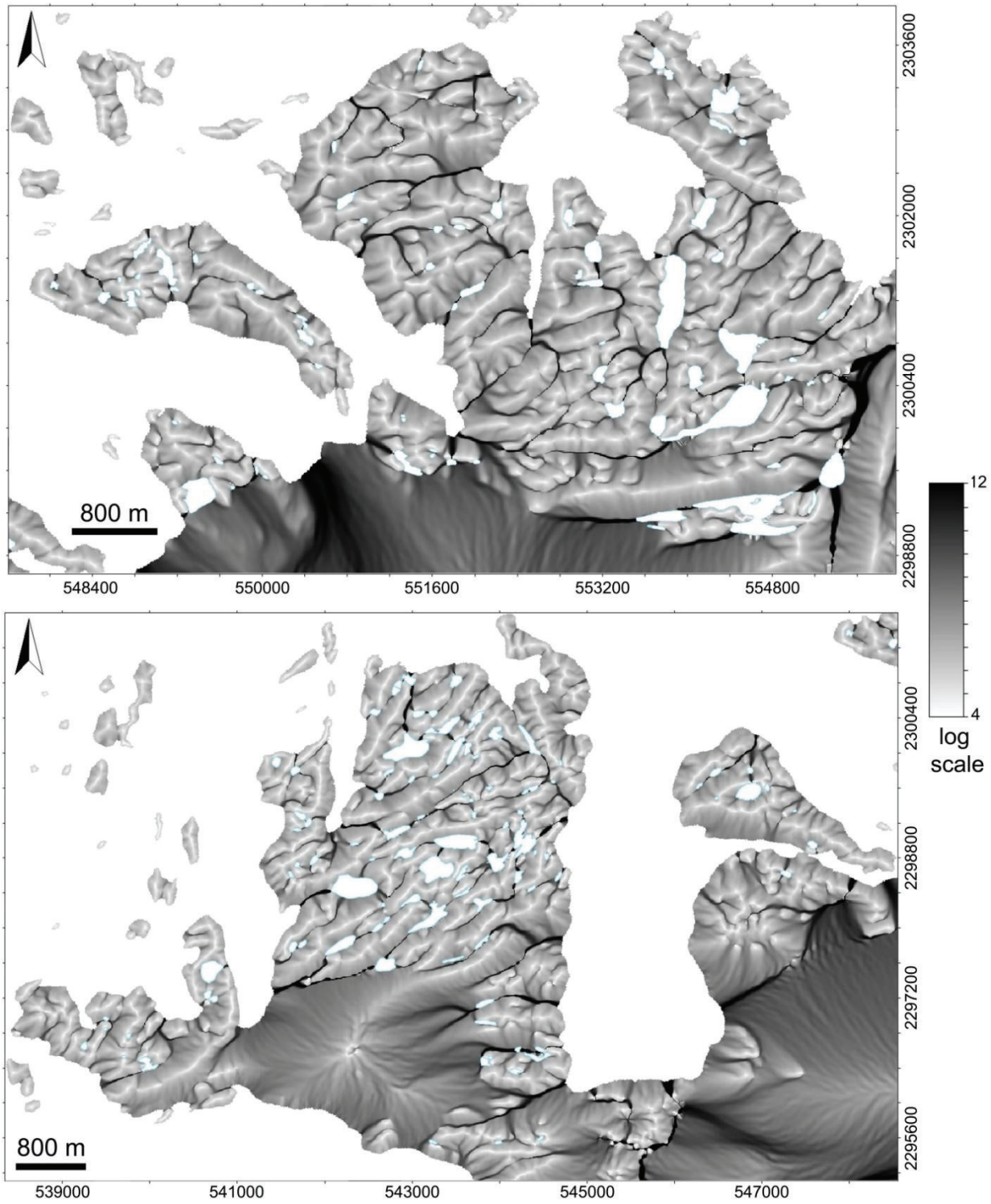


Рис. 8. Холмы Ларсеманн, водосборная площадь, логарифмическая шкала. Вверху — п-ов Брокнес, внизу — п-ов Стурнес
Fig. 8. Larsemann Hills, catchment area, logarithmic scale. Above is the Broknes Peninsula, below — the Stornes Peninsula

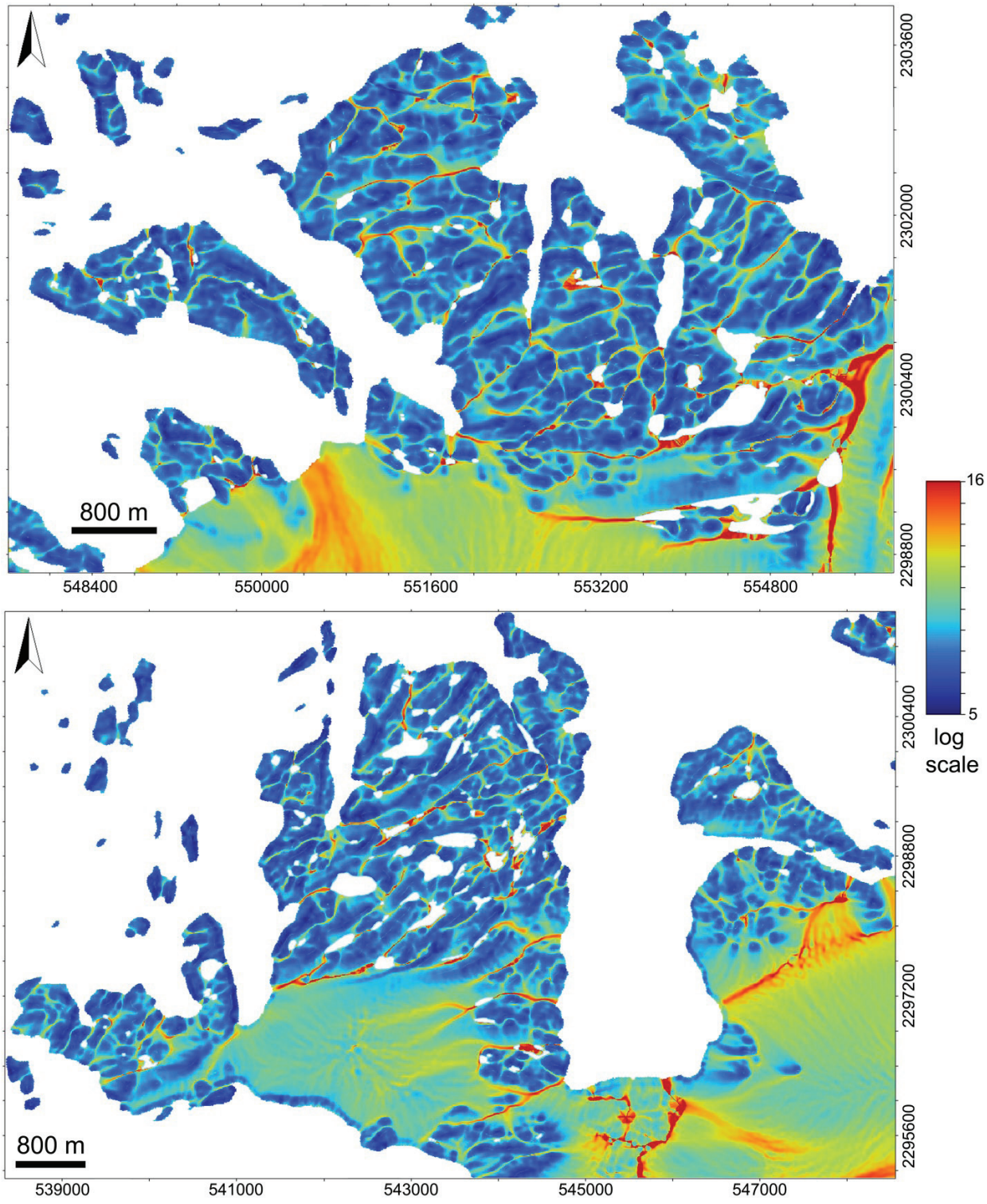
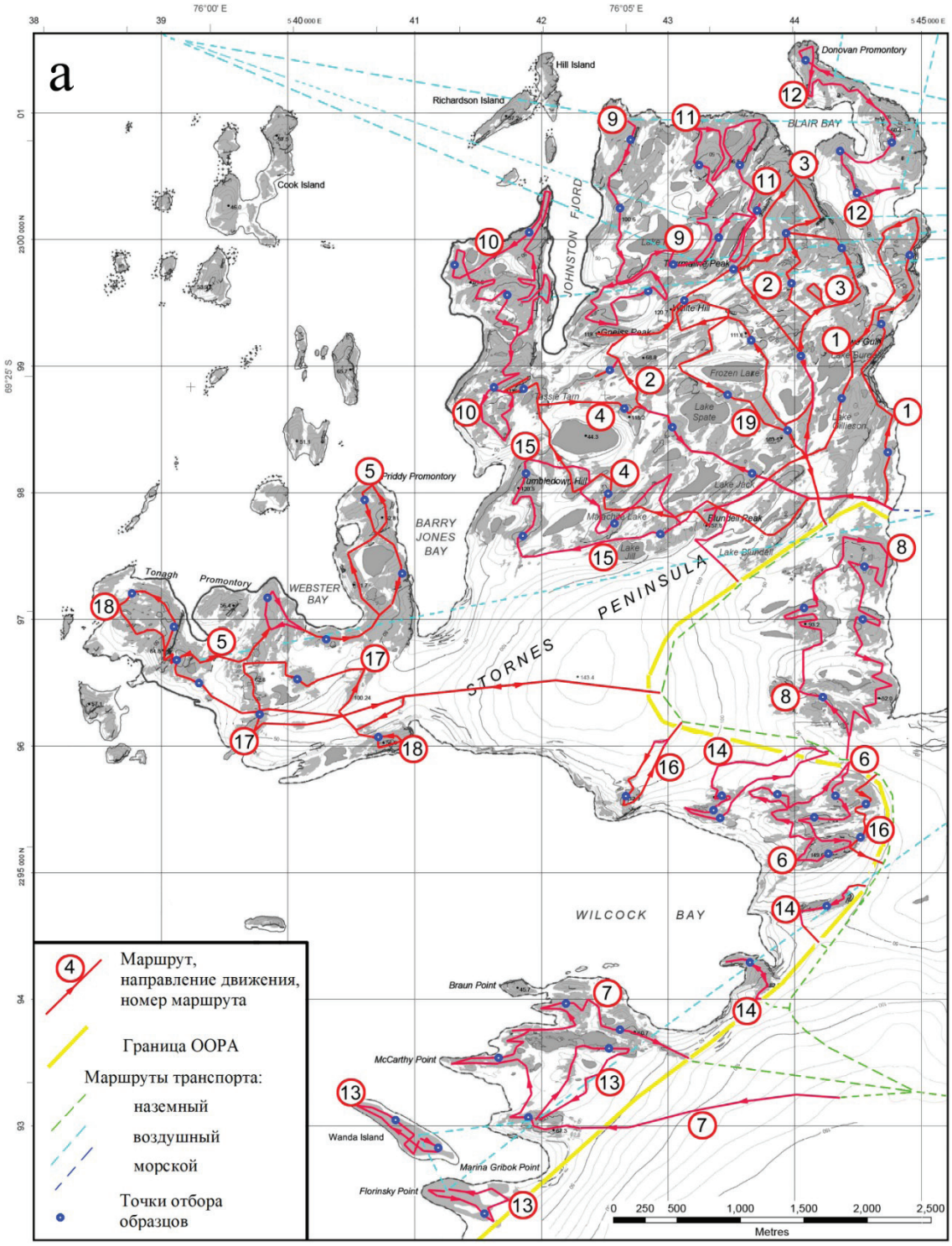
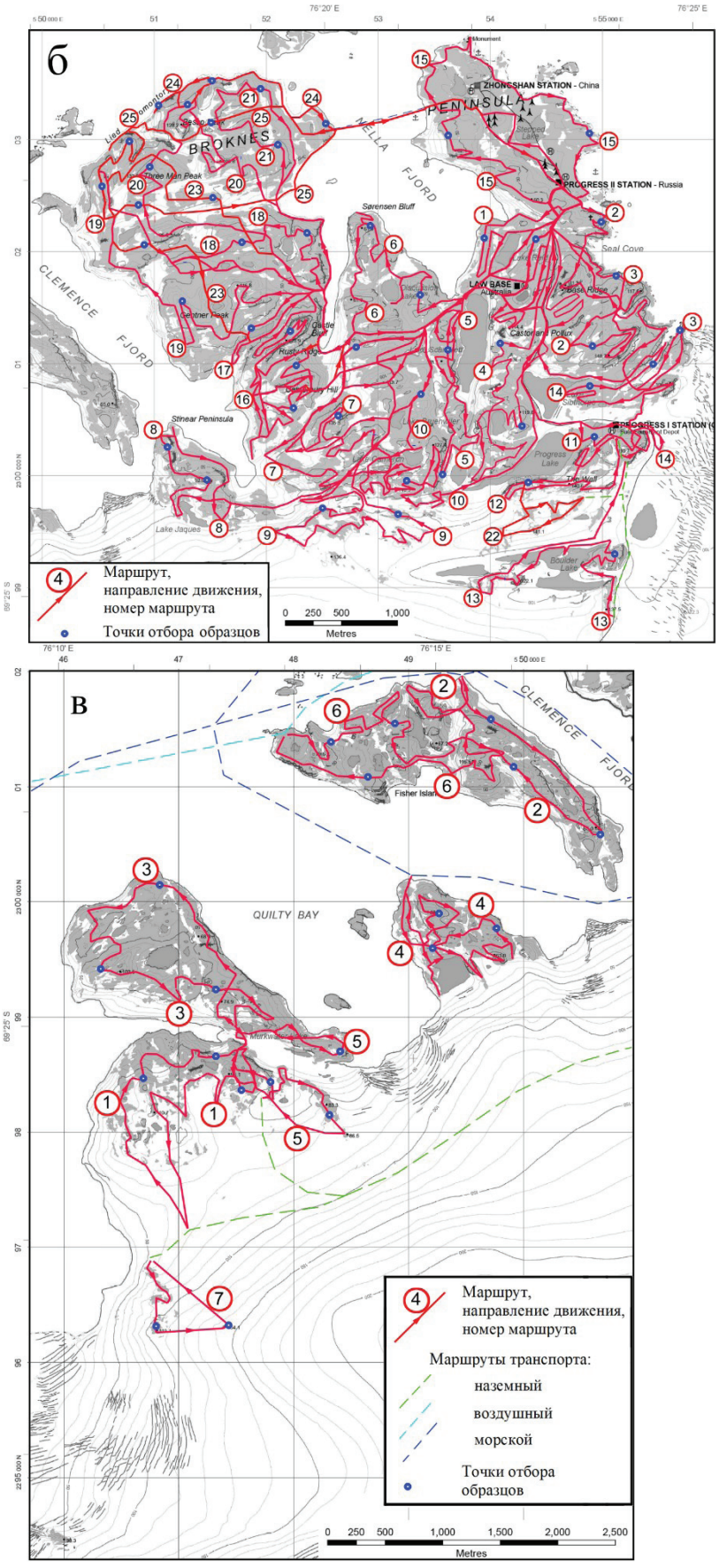


Рис. 9. Холмы Ларсеманн, топографический индекс, логарифмическая шкала. Вверху — п-ов Брокнес, внизу — п-ов Стурнес
Fig. 9. Larsemann Hills, topographic index, logarithmic scale. Above is the Broknes Peninsula, below — the Stornes Peninsula


a
76°00' E
76°05' E
Hill Island
Richardson Island
Cook Island
Donovan Promontory
BLAIR BAY
JOHNSTON FJORD
Tourmaline Peak
White Hill
Gneiss Peak
Frozen Lake
Lake Spate
Lake Gillieson
Lake Jack
Blundell Peak
Lake Blundell
Lake Jill
Tumbledown Hill
Priddy Promontory
BARRY JONES BAY
WEBSTER BAY
Tonagh Promontory
STORNES PENINSULA
WILCOCK BAY
Braun Point
McCarthy Point
Wanda Island
Marina Gribok Point
Florinsky Point
Маршрут, направление движения, номер маршрута
Граница ООРА
Маршруты транспорта:
наземный
воздушный
морской
Точки отбора образцов
0 250 500 1,000 1,500 2,000 2,500
Metres


б
ZHONGSHAN STATION - China
PROGRESS II STATION - Russia
PROGRESS I STATION
LAW BASE
BROKNES PENINSULA
CLEMENCE FJORD
STELLA FJORD
Sørensen Bluff
Seal Cove
Stinear Peninsula
Lake Jaques
Progress Lake
Boulder Lake
Маршрут, направление движения, номер маршрута
Точки отбора образцов
0 250 500 1,000
Metres
В
CLEMENCE FJORD
Fisher Island
QUILTY BAY
Маршрут, направление движения, номер маршрута
Маршруты транспорта:
наземный
воздушный
морской
Точки отбора образцов
0 250 500 1,000 1,500 2,000 2,500
Metres

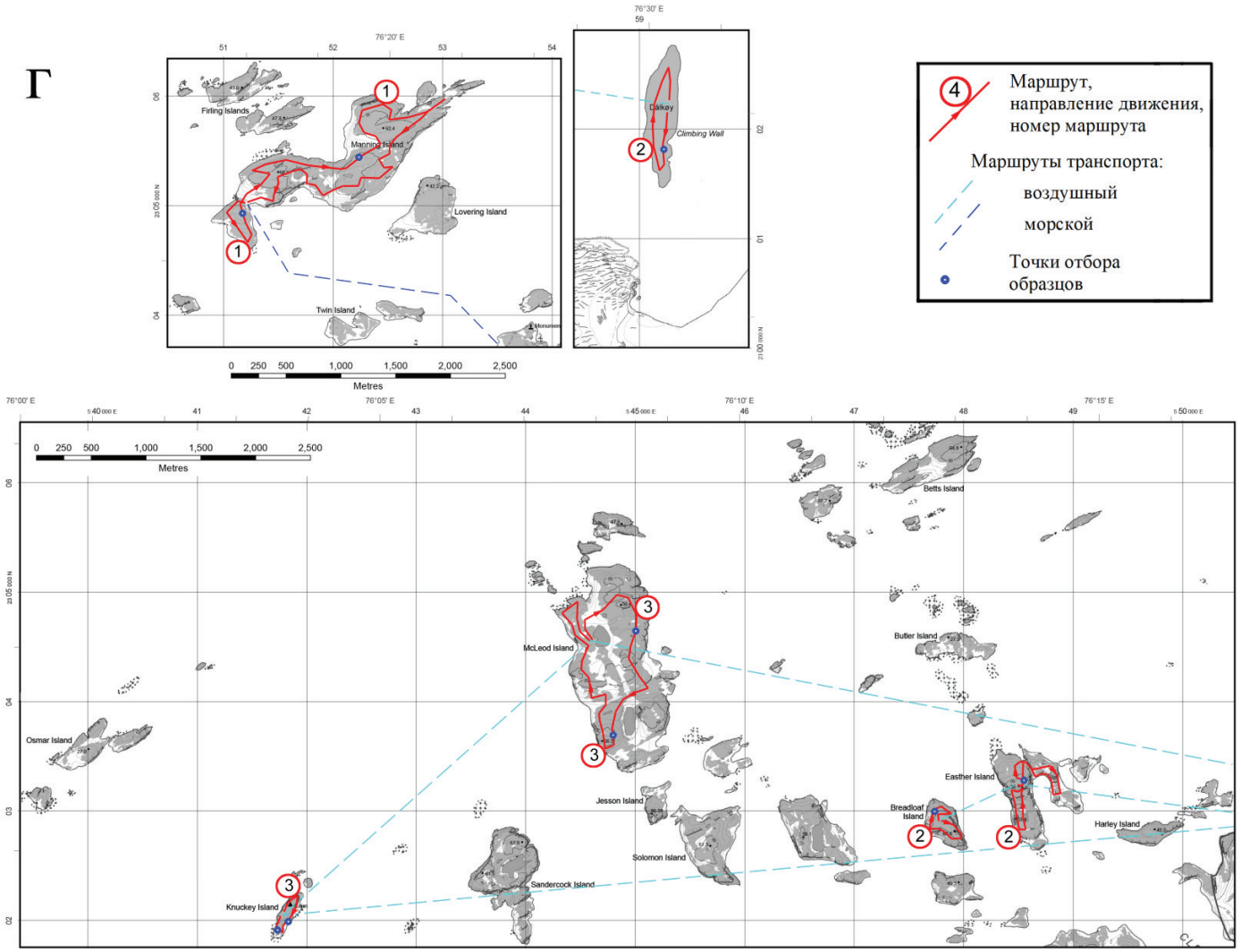


Рис. 10. Полевые маршруты: а — п-ов Стурнес; б — п-ов Брокнес; в — п-ов Гровнес; г — острова. Основа — карта [Larsemann Hills, 2005], проекция UTM, зона 43S. Нумерация маршрутов дана хронологически, раздельно для каждого из 4-х основных районов
Fig. 10. Field routes: a — Stornes Peninsula; b — Broknes Peninsula; c — Grovnes Peninsula; d — Islands. The background is the map [Larsemann Hills, 2005], UTM projection, 43S zone. Route numbering is chronological, separately for each of the four major regions

Табл. 1. Характеристика пеших маршрутов геоморфометрического дешифрирования (рис. 10)
Table 1. Characteristics of foot routes of geomorphometric interpretation (fig. 10)

№	Дата	Район маршрута	Способ заброски и вывоза с маршрута	Длина, км	Горные породы*
П-ов Стурнес и прилегающие территории (рис. 10а):					
1	06.01	Холмы вдоль западного берега фьорда Тала, от балка Витязь до п-ова Донован	Пешком по припаю с/на НЭС «Академик Федоров»	7,59	*bgo, tdq, sp*
2	07.01	Пик Гнейс, холм Уайт, пик Турмалин и прилегающие территории	"	7,60	*bgo, sg, sp, whg, lfp*
3	08.01	Холмы между оз. Бургесс и Фрозен, пиком Турмалин и бухтой Блейр	"	8,75	*bgo, sp, tq, tdq, whg, sg*
4	09.01	Холмы между пиком Бланделл, оз. Тасси и Спейт	"	8,14	*bgo, tq, sg*
5	10.01	Северная часть п-ова Тонах и п-ов Придди	Вертолет Ка-32С с/на НЭС «Академик Федоров»	6,50	*gp, bpg*
6	30.01	Холмы на северо-востоке бухты Уилкок	Квадроцикл Stels Leopard и снегоход Bombardier Ski-Doo со/на ст. Прогресс	4,01	*epg, qfg, bqf, wbp, ttq*
7	31.01	Скальные массивы мысов Маккарти, Браун и безымянного	"	6,93	*pg, sp, bpg*
8	01.02	Три массива холмов вдоль юго-западного побережья фьорда Тала	"	6,54	*bqf, bpg, bgo*
9	07.02	Район между фьордом Джонстон, оз. Феррис, и пиками Гнейс и Турмалин	Вертолет Ка-32С со/на ст. Прогресс	4,13	*bgo, lfp, gp*
10	08.02	Безымянный п-ов между фьордом Джонстон, холмом Тамблдаун и бухтой Барри Джонс	"	7,42	*bgo, jgo, qfg, lfp, sp, sg, lpg, tq*
11	11.02	Район между оз. Феррис, бухтой Блэйр и пиком Турмалин	"	5,37	*gp, bgo, whg, sg*
12	12.02	П-ов Донован	"	3,09	*bgo, jgo*
13	15.02	Мыс МакКарти, остров Ванда и мыс Флоринского [*Флоринский*, 2023] (три сегмента)	То же (и между сегментами)	5,24	*pg, sp, gp, bpg*
14	16.03	Массивы холмов на северо-восточном и восточном побережье бухты Уилкок (три сегмента)	Ратрак Kässbohrer PistenBully Polar 300 со/на ст. Прогресс (и между сегментами)	5,21	*bgq, qfg, sg, wbp, ttq, bpg, sp*
15	20.03	Район холма Тамблдаун	"	7,21	*bgo, tdq*

№	Дата	Район маршрута	Способ заброски и вывоза с маршрута	Длина, км	Горные породы*
16	22.03	Два сегмента: массивы холмов на северном и северо-восточном побережье бухты Уилкок	"	2,84	*bpg, qfg, tdq*
17	30.03	Холмы южной части п-ова Тонах	"	7,88	*bpg, gp*
18	31.03	Запад п-ова Тонах и скалы севере бухты Уилкок	"	10,99	*gp, bpg*
19	06.04	Район оз. Фрозен	"	5,42	*bgo, sp, whg, tq, lfp, tdq*
П-ов Брокнес и прилегающие территории (рис. 10б):					
1	13.01	Район оз. Рейд и базы Лоу	—	6,34	*bpg, lfp*
2	14.01	Район бухты Тюленьей и хребта Бейз	—	5,89	*lfp, bpg*
3	15.01	Район между хребтом Бейз и бухтой Долкой	—	9,40	*bpg*
4	16.01	Район между хребтом Бейз и оз. Сибторп, Прогресс и Скандретт	—	9,29	*bpg, gp*
5	17.01	Холмы вдоль западного берега оз. Скандретт	—	8,27	*bpg, gp*
6	22.01	Район между оз. Дискашн и утесом Соренсен	—	8,01	*bpg, whg, lfp*
7	23.01	Холмистый район к югу от холма Кантербери	—	11,95	*bpg, gp*
8	27.01	П-ов Стинеар	—	14,54	*bpg, lfp*
9	28.01	Нунатаки между оз. Камерон и аэродромом	—	12,23	*bpg, gp*
10	29.01	Холмистый район вокруг оз. Камерон	—	11,26	*bpg, gp*
11	04.02	Район между ст. Прогресс I и базой Лоу	—	7,54	*bpg*
12	06.02	Горный массив Стена	Вездеход ГАЗ-34039 со ст. Прогресс; квадроцикл Stels Leopard на ст. Прогресс	3,24	*bpg*
13	10.02	Нунатаки вокруг оз. Боулдер	Квадроцикл Stels Leopard и снегоход Bombardier Ski-Doo со ст. Прогресс; вездеход ГАЗ-34039 на ст. Прогресс	4,98	*bpg*
14	13.02	Зона провала 2017 г. на леднике Долк, каньон между ст. Прогресс I и бухтой Долкой, холмы к востоку от оз. Сибторп	Квадроцикл Stels Leopard со/на ст. Прогресс	8,24	*bpg*
15	14.02	П-ов Миррор	—	8,25	*pg, lfp, pmd, bpg, nmg, zsg*
16	20.02	Район холма Кантербери	—	11,47	*gp, bpg*

№	Дата	Район маршрута	Способ заброски и вывоза с маршрута	Длина, км	Горные породы*
17	21.02	Район хребта Расти, утеса Кастл и межгорной долины к северу от них	—	12,23	*bpg, gp*
18	02.03	Холмы к востоку и цепочка холмов к северу от пика Гентнер	—	10,86	*bpg, whg*
19	04.03	Пик Гентнер и холмы вдоль фьорда Клеменс до п-ова Лайд	—	14,15	*bpg, gp*
20	07.03	Район пиков Три Мен, Бессо и безымянный холмистый массив к юго-востоку от них	—	14,63	*bpg, whg, lfp*
21	12.03	Холмы к востоку от пиков Три Мен и Бессо	—	12,54	*bpg*
22	05.04	Нунатаки между оз. Боулдер и горным массивом Стена	Ратрак Kässbohrer PistenBully Polar 300 со/на ст. Прогресс	2,33	*bpg*
23	09.04	П-ов Лайд	—	15,74	*bpg, gp, whg, pmd*
24	20.04	Северо-восточное побережье западного Брокнеса	Вездеход Argo Avenger 800 через фьорд Нелла (туда)	8,25	*bpg, gp*
25	21.04	П-ов Лайд	—	11,33	*bpg, gp, lfp, whg*
П-ова Гровнес и прилегающие территории (рис. 10в):					
1	18.01	П-ов Гровнес	Вездеход ГАЗ-34039 со/на ст. Прогресс	6,35	*bgo, gt, bpg*
2	20.01	Восточная часть о. Фишер	Вездеход Argo Avenger 800 со/на ст. Прогресс	5,31	*gp, lfp, sp, bpg, pmd*
3	21.01	Западная часть п-ова Бхарати	Квадроцикл Stels Leopard и снегоход Bombardier Ski-Doo со/на ст. Прогресс	7,49	*bgo, bpg, sp, lfp*
4	24.01	П-ов Браттневет	"	6,64	*bgo, bpg, sp, lfp*
5	03.02	Восточная часть п-ова Бхарати	"	5,82	*bgo, gt, bpg*
6	18.02	Западная часть о. Фишер	Вертолет Ка-32С со/на ст. Прогресс	6,75	*bgo, lfp, sp, bpg*
7	06.03	Нунатаки к юго-востоку от южной оконечности фьорда Тала	Ратрак Kässbohrer PistenBully Polar 300 со/на ст. Прогресс	2,33	*gp*
Острова (рис. 10г):					
1	25.01	О. Мэннинг	Вездеход Argo Avenger 800 со/на ст. Прогресс	6,82	*so, gp, pg*
2	16.02	О-ва Долкой, Истер и Бредлоф	Вертолет Ка-32С со/на ст. Прогресс и между островами	5,34	*dg, bpg, epg, sp, jgo, lfp*
3	17.02	О-ва МакЛеод и Кнаки	"	5,19	*so, gp, pg*

* Краткое описание горных пород, преобладающих вдоль маршрутов [*Carson*, *Grew*, 2007]:

bgo: мезопротерозойский кремовый, гранатсодержащий кислый ортогнейс Бланделл;
bpg: неопротерозойский гранатсодержащий кварц-полевошпатовый парагнейс Брокнес с силлиманитом, шпинелью и магнетитом;
bqf: неопротерозойский биотитовый кварц-полевошпатовый парагнейс пика Бангера;
dg: кембрийский среднезернистый биотитовый серый гранит Долкой с магнетитом, апатитом, монацитом и цирконом;
epg: неопротерозойский биотит-плагиоклазовый серый гнейс острова Истер с крупными порфиробластами граната и кордиерита;
gp: неопротерозойский кварц-полевошпатовый метапсаммит Гентнер с гранатом и биотитом;
gt: мезопротерозойский (~990 млн лет) среднезернистый ортопироксеновый гранат- и биотитсодержащий ортогнейс Гровнес;
jgo: мезопротерозойский лейкократовый светло-серый кислый гранат-, кордиерит- и биотитсодержащий ортогнейс Джонстон;
lfp: неопротерозойский темногранатовый, силлиманитовый и биотитовый метапелит озера Феррис со шпинелью и магнетитом;
lpg: неопротерозойский лейкократовый призматин- и турмалинсодержащий кварцевый гнейс Донован;
nmg: мезопротерозойский (~1100 млн лет) ортопироксен-клинопироксен-плагиоклазовый основной гранулит Нелла;
pg: кембрийский (~515 млн лет) биотитовый оранжевый гранит Прогресс с гранатом, магнетитом, шпинелью и цирконом;
pmd: кембрийская мелко- и среднезернистая биотитовая сиеногранитная дайка Прогресс с апатитом, цирконом и силлиманитом;
qfg: неопротерозойский биотитовый кварц-полевошпатовый гнейс Эллисон с силлиманитом и кордиеритом;
sg: неопротерозойский биотит-плагиоклазовый гнейс Стурнес со слоями призматина (B-корнерупина), кордиерита и биотита;
so: мезопротерозойский (~1125 млн лет) желтовато-коричневый кварц-плагиоклазовый кислый ортогнейс Состреn;
sp: неопротерозойский метапелит Стюве с преобладанием силлиманита и кордиерита;
tdq: неопротерозойский ржаво-красный метакварцит Тамблдаун-Хилл с малахитовыми пятнами на поверхности;
ttq: неопротерозойский темный зернистый турмалиновый метакварцит Тала;
tq: неопротерозойский голубой среднезернистый метакварцит Тасси Тарн;
wbp: неопротерозойский кварц-полевошпатовый гнейс Уилкок со слоями силлиманита и грандидиерита и сгустками призматина;
whg: неопротерозойский светло-серый лейкократовый гнейс Уайт-Хилл с биотитом, кварцем и плагиоклазом;
zsg: мезопротерозойский (~940 млн лет) лейкократовый кварц-полевошпатовый гнейс Зонгсан.

В сезон 68 РАЭ автор не смог провести полевое геоморфометрическое дешифрирование нескольких островов среднего размера (о-ва Осмар, Кук, Ричардсон, Хилл, Сандеркок, Соломон, Беттс, Батлер, Фирлинг и Лаверинг) (рис. 10г). В будущем их полевое обследование может быть осуществлено путем заброски на острова либо на вертолете в периоды стоянки и разгрузки научно-экспедиционных судов (НЭС) во фьорде Тала, либо на вездеходе-амфибии со станции Прогресс в период устойчивого припая (конец весны — начало лета). Учитывая шаг сетки ЦМР (8 м), автор не рассматривает десятки мелких островов как объекты геоморфометрического дешифрирования.

Представленные результаты продолжают исследования автора на территориях холмов Тала (оазис Молодежный) и полуострова Файлдс (о. Кинг-Джордж, Южные Шетландские острова), которые проводились в сезон 67 РАЭ [*Флоринский*, 2022]. Работы ведутся в рамках многолетнего проекта по геоморфометрическому моделированию оазисов и других свободных от оледенения территорий Антарктики [*Florinsky*, 2023]. Конечная цель проекта — создание геоморфометрического атласа свободных от оледенения территорий, в пределах которых:

а) расположены отечественные круглогодичные станции и сезонные базы;

б) в прежние годы отечественными учеными проводились исследования.

Помимо холмов Ларсеманн, Тала (оазисы Молодежный и Вечерний) и п-ова Файлдс, в атласе должны быть представлены оазисы Ширмахера, Бангера, Беркс, нунатаки Холладей, о. Хасуэлл, холмы Файф, оазисы Терешковой, Полканова, Коновалова, Обручева, Джетти и Унтерзее, геоморфометрическое изучение которых планируется провести в следующие сезоны РАЭ.

ВЫВОДЫ

В рамках 68 РАЭ впервые проведено геоморфометрическое моделирование и картографирование территории холмов Ларсеманн — одного из наиболее популярных у исследователей и важных с логистической точки зрения антарктических оазисов. В ходе работ по ЦМР REMA рассчитаны цифровые модели и карты 17 морфометрических величин, включая 12 кривизн, входящих в полную систему кривизн.

Впервые проведены работы по полевому геоморфометрическому дешифрированию рассчитанных морфометрических карт. Для этого в пределах холмов Ларсеманн было пройдено 54 пеших маршрута общей длиной около 422 км, в ходе которых производился сравнительный анализ элементов реального рельефа местности и их отображение на морфометрических картах, а также было отобрано 150 образцов горных пород.

Геоморфометрическое моделирование, картографирование и полевое дешифрирование антарктических оазисов ранее не проводилось. Описанные в статье работы и полученные результаты имеют мировую научную новизну и закрепляют российский приоритет в данном направлении исследований.

Работы ведутся в рамках многолетнего проекта по геоморфометрическому моделированию оазисов и других свободных от оледенения территорий Антарктики, конечной целью которого является создание их геоморфометрического атласа. Особенностью разрабатываемого атласа должно стать включение в его состав созданных фотограмметрическим способом цифровых 3D моделей геологических образцов, отобранных при прохождении полевых маршрутов.

Рассчитанные морфометрические карты могут быть полезны для геологических, геоморфологических, почвенных, биологических, климатических, гидрологических и гляциологических исследований оазиса холмы Ларсеманн.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор признателен А.В. Клепикову и В.Л. Мартьянову (РАЭ) за предоставленную возможность участвовать в сезонных работах на территории оазиса холмы Ларсеманн в рамках 68 РАЭ. Постоянную поддержку автору оказывали А.Н. Николаев (68 РАЭ), Д.А. Мамадалиев (67 РАЭ) и Д.В. Шепелёв (68 РАЭ). Логистическую и техническую помощь оказали И.А. Абдрахманов (ВНИИОкеангеология), И.В. Ногайцев (68 РАЭ), А.Ю. Квашин (67 РАЭ), А.А. Краснов, В.Н. Остроумов, А.Ф. Сажин, И.В. Левченко, А.Ю. Кочетков и Д.В. Тарасов (68 РАЭ). Особая благодарность Т.Н. Скрыпицыной (МИИГАиК), Т.Ю. Петровой (ИМПБ РАН), М.В. Грибок (МГУ) и А.Ю. Пшеничному (68 РАЭ) за моральную поддержку.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author is grateful to A.V. Klepikov and V.L. Martyanov (Russian Antarctic Expedition) for the possibility to participate in the seasonal works in the Larsemann Hills oasis within the frames of the 68th RAE. Constant support were provided by A.N. Nikolaev (68th RAE), D.A. Mamadaliev (67th RAE), and D.V. Shepelev (68th RAE). Logistical and technical assistance was provided by I.A. Abdrakhmanov (VNIIOkeangeologia), I.V. Nogaitsev (68th RAE), A.Yu. Kvashin (67th RAE), A.A. Krasnov, V.N. Ostroumov, A.F. Sazhin, I.V. Levchenko, A.Yu. Kochetkov, and D.V. Tarasov (68th RAE). Special thanks to T.N. Skrypitsyna (Moscow State University of Geodesy and Cartography), T.Yu. Petrova (Institute of Mathematical Problems of Biology, Russian Academy of Sciences), M.V. Gribok (Lomonosov Moscow State University), and A.Yu. Pshenichnyj (68th RAE) for moral support.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Большиянов Д.Ю. Геоморфологическое строение холмов Ларсеманн. Антарктика. Геоморфологический атлас. СПб.: Карта, 2011. С. 222–225.

Боронина А.С. Крупные прорывы озер антарктических оазисов: обобщение современных знаний. Лед и снег, 2022. Т. 62. № 1. С. 141–160. DOI: 10.31857/S2076673422010122.

Дрыга Д.О. К методике создания трехмерных моделей объектов культурного наследия экспонатов музейных коллекций. Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2019. Т. 63. № 5. С. 512–523. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-5-512-523.

Мергелов Н.С. Почвы влажных долин в оазисах Ларсеманн и Вестфолль (Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида). Почвоведение, 2014. № 9. С. 1027–1045. DOI: 10.7868/S0032180X14090093.

План управления Особо охраняемым районом Антарктики (ООРА) № 174 «Стурнес» (Холмы Ларсеманн, Земля Принцессы Елизаветы). Заключительный отчет XXXVII Консультативного совещания по Договору об Антарктике, Мера 12, Приложение. Буэнос-Айрес: Секретариат Договора об Антарктике, 2014. 16 с.

План управления Особо управляемым районом Антарктики № 6 «Холмы Ларсеманн» (Восточная Антарктика). Заключительный отчет XLIII Консультативного совещания по Договору об Антарктике, Мера 1. Буэнос-Айрес: Секретариат Договора об Антарктике, 2021. 41 с.

Симонов И.А. Оазисы Восточной Антарктиды. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 176 с.

Сократова И.Н. Антарктические оазисы: история и результаты исследований. СПб.: ААНИИ, 2010. 274 с.

Флоринский И.В. Геоморфометрия сегодня. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции.

М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 2. С. 394–448. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448.

Флоринский И.В. Беспилотная аэрофотосъемка в летний сезон 67-й Российской антарктической экспедиции. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 284–304. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-284-304.

Флоринский И.В. О присвоении новых географических названий в оазисе холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида). Геодезия и картография, 2023. № 4. С. 60–64. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-994-4-60-64.

Burgess J.S., Spate A.P., Shevlin J. The onset of deglaciation in the Larsemann Hills, Eastern Antarctica. Antarctic Science, 1994. V. 6. No. 4. P. 491–495. DOI: 10.1017/S095410209400074X.

Carson C.J., Grew E.S. Geology of the Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica. 1: 25 000 scale Map. Canberra: Geoscience Australia, 2007. 1 p.

Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Boehner J. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4. Geoscientific Model Development, 2015. V. 8. P. 1991–2007. DOI: 10.5194/gmd-8-1991-2015.

Evans I.S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. Spatial Analysis in Geomorphology. London: Methuen, 1972. P. 17–90. DOI: 10.4324/9780429273346-2.

Florinsky I.V. Digital terrain analysis in soil science and geology. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press, 2016. 486 p.

Florinsky I.V. An illustrated introduction to general geomorphometry. Progress in Physical Geography, 2017. V. 41. No. 6. P. 723–752. DOI: 10.1177/0309133317733667.

Florinsky I.V. Geomorphometric modeling and mapping of Antarctic oases. ArXiv Preprints, 2023. No. 2305.07523. 84 p. DOI: 10.48550/arXiv.2305.07523.

Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Amsterdam: Elsevier, 2009. 765 p.

Gupta P. Biodiversity of Larsemann Hills, Antarctica. Climate Change, 2015. V. 1. No. 3. P. 174–183.

Howat I.M., Porter C., Smith B.E., Noh M.-J., Morin P. The Reference Elevation Model of Antarctica. Cryosphere, 2019. V. 13. No. 2. P. 665–674. DOI: 10.5194/tc-13-665-2019.

Kiernan K., Gore D.B., Fink D., White D.A., McConnell A., Sigurdsson I.A. Deglaciation and weathering of Larsemann Hills, East Antarctica. Antarctic Science, 2009. V. 21. No. 4. P. 373–382. DOI: 10.1017/S0954102009002028.

Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica. Environmental Management Map, 1: 25 000 scale. Kingston: Australian Antarctic Division, 2005. 1 p.

Shary P.A. Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures. Mathematical Geology, 1995. V. 27. No. 3. P. 373–390. DOI: 10.1007/BF02084608.

Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. Geoderma, 2002. V. 107. Iss. 1–2. P. 1–32. DOI: 10.1016/S0016-7061(01)00136-7.

Stüwe K., Braun H.-M., Peer H. Geology and structure of the Larsemann Hills area, Prydz Bay, East Antarctica. Australian Journal of Earth Sciences, 1989. V. 36. P. 219–241. DOI: 10.1080/08120098908729483.

Terrain Analysis: Principles and Applications. New York: Wiley, 2000. 479 p.

Wilson J.P. Environmental applications of digital terrain modeling. Chichester: Wiley-Blackwell, 2018. 360 p.

REFERENCES

Bolshiyanov D.Yu. Geomorphic structure of the Larsemann Hills. Antarctica. Geomorphological Atlas. St. Petersburg: Karta, 2011. P. 222–225 (in Russian).

Boronina A.S. Large-scale outbursts of lakes in the Antarctic oases: current knowledge. Ice and Snow, 2022. V. 62. No. 1. P. 141–160 (in Russian). DOI: 10.31857/S2076673422010122.

Burgess J.S., Spate A.P., Shevlin J. The onset of deglaciation in the Larsemann Hills, Eastern Antarctica. Antarctic Science, 1994. V. 6. No. 4. P. 491–495. DOI: 10.1017/S095410209400074X.

Carson C.J., Grew E.S. Geology of the Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica. 1: 25 000 scale Map. Canberra: Geoscience Australia, 2007. 1 p.

Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Boehner J. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4. Geoscientific Model Development, 2015. V. 8. P. 1991–2007. DOI: 10.5194/gmd-8-1991-2015.

Dryga D.O. The technique of creating three-dimensional models of cultural heritage exhibits of museum collections. Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying, 2019. V. 63. No. 5. P. 512–523 (in Russian). DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-5-512-523.

Evans I.S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. Spatial Analysis in Geomorphology. London: Methuen, 1972. P. 17–90. DOI: 10.4324/9780429273346-2.

Florinsky I.V. Geomorphometry today. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2021. V. 27. Part 2. P. 394–448 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448.

Florinsky I.V. Unmanned aerial survey in the summer season of the 67th Russian Antarctic Expedition. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2022. V. 28. Part 1. P. 284–304 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-284-304.

Florinsky I.V. On the assignment of new geographic names in the Larsemann Hills oasis (East Antarctica). Geodesy and Cartography, 2023. No. 4. P. 60–64 (in Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2023-994-4-60-64.

Florinsky I.V. Digital terrain analysis in soil science and geology. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press, 2016. 486 p.

Florinsky I.V. An illustrated introduction to general geomorphometry. Progress in Physical Geography, 2017. V. 41. No. 6. P. 723–752. DOI: 10.1177/0309133317733667.

Florinsky I.V. Geomorphometric modeling and mapping of Antarctic oases. ArXiv Preprints, 2023. No. 2305.07523. 84 p. DOI: 10.48550/arXiv.2305.07523.

Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Amsterdam: Elsevier, 2009. 765 p.

Gupta P. Biodiversity of Larsemann Hills, Antarctica. Climate Change, 2015. V. 1. No. 3. P. 174–183.

Howat I.M., Porter C., Smith B.E., Noh M.-J., Morin P. The Reference Elevation Model of Antarctica. Cryosphere, 2019. V. 13. No. 2. P. 665–674. DOI: 10.5194/tc-13-665-2019.

Kiernan K., Gore D.B., Fink D., White D.A., McConnell A., Sigurdsson I.A. Deglaciation and weathering of Larsemann Hills, East Antarctica. Antarctic Science, 2009. V. 21. No. 4. P. 373–382. DOI: 10.1017/S0954102009002028.

Larsemann Hills, East Antarctica Antarctic Specially Managed Area No. 6 Management Plan. Antarctic Treaty Consultative Meeting (ATCM) XLIII Final Report. Measure 1. Buenos Aires: Secretariat of the Antarctic Treaty, 2021. 35 p.

Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica. Environmental Management Map, 1: 25 000 scale. Kingston: Australian Antarctic Division, 2005. 1 p.

Management plan for Antarctic Specially Protected Area No. 174 Stornes, Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land. Antarctic Treaty Consultative Meeting (ATCM) XXXVII Final Report, Measure 12 Annex. Buenos Aires: Secretariat of the Antarctic Treaty, 2014. 13 p.

Mergelov N.S. Soils of wet valleys in the Larsemann Hills and Vestfold Hills Oases (Princess Elizabeth Land, East Antarctica). Eurasian Soil Science, 2014. V. 47. No. 9. P. 845–862. DOI: 10.1134/S1064229314090099.

Shary P.A. Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures. Mathematical Geology, 1995. V. 27. No. 3. P. 373–390. DOI: 10.1007/BF02084608.

Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. Geoderma, 2002. V. 107. No. 1–2. P. 1–32. DOI: 10.1016/S0016-7061(01)00136-7.

Simonov I.A. Oases of East Antarctica. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1971. 176 p. (in Russian).

Sokratova I.N. Antarctic Oases: History and Research Results. St. Petersburg: AARI, 2010. 274 p. (in Russian).

Stüwe K., Braun H.-M., Peer H. Geology and structure of the Larsemann Hills area, Prydz Bay, East Antarctica. Australian Journal of Earth Sciences, 1989. V. 36. P. 219–241. DOI: 10.1080/08120098908729483.

Terrain Analysis: Principles and Applications. New York: Wiley, 2000. 479 p.

Wilson J.P. Environmental applications of Digital Terrain Modeling. Chichester: Wiley-Blackwell, 2018. 360 p.

УДК: 551.5+004.67 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-511-520**

Т.Н. Осипова[1], **Е.П. Самойлова**[2]

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИНТЕРПОЛЯЦИИ МЕТОДОМ ВЗВЕШЕННЫХ УГЛОВЫХ РАССТОЯНИЙ СРЕДНЕМЕСЯЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

АННОТАЦИЯ

В данной работе проведена оценка точности пространственной интерполяции среднемесячной температуры воздуха января и июля методом взвешенных угловых расстояний (ADW). Оценка проведена для двух районов, расположенных на территории Дальневосточного федерального округа. Первый район расположен в пределах Центральноякутской равнины, Приленского плато и северных склонов Алданского нагорья, отметки абсолютных высот в пределах района не превышают 500 м. Второй район расположен в Забайкалье. Рельеф района представлен плоскогорьями и сильно расчлененными хребтами с высотой более 2 500 м. В обоих районах метеорологические станции распределены по территории неравномерно. Картографирование производилось с помощью свободной кроссплатформенной геоинформационной системы QGIS. В качестве первичной метеорологической информации использованы данные наблюдений 497 метеорологических станций. Анализ ошибок, проведенный для 74 станций, показал, что точность интерполяции зависит от количества станций, расположенных на территории, и от характера рельефа. При достаточном количестве станций в горных районах фактические и полученные в результате интерполяции температуры хорошо согласуются даже в зимний период. Однако если исключить при интерполяции данные станций, расположенных на участках с большими относительными высотами, то точность интерполяции резко снижается из-за недоучета особенностей пространственной корреляции температуры между станциями. В методе ADW при расчете весов учитываются угловое расстояние и расстояние затухания корреляции между температурой на станциях. Оба параметра рассчитываются с учетом широты, но анизотропия поля температуры при этом учтена частично. Поскольку анизотропия полей гидрометеорологических характеристик зависит от характера рельефа и от сезона, то и ошибки восстановления полей будут различаться. Таким образом, при применении метода ADW необходимо дополнительно уточнять характер изменения расстояния затухания корреляции для конкретного региона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГИС, карты температуры воздуха, метод взвешенных угловых расстояний, Дальневосточный федеральный округ

[1] Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, 10-я линия Васильевского острова, д. 31-33, Санкт-Петербург, Россия, 199178,
e-mail: **t.osipova@spbu.ru**

[2] Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, ул. Карбышева, д. 7, Санкт-Петербург, Россия, 194021,
e-mail: **e.samoylova@spbu.ru**

Tatiana N. Osipova[1], **Elizaveta P. Samoylova**[2]

EVALUATION OF THE ADW INTERPOLATION FOR THE AVERAGE MONTHLY AIR TEMPERATURE

ABSTRACT

Article describes the quality analysis of climate maps for the Far Eastern Federal District. Observed station data from 497 meteorological stations are used as meteorological information. Monthly air temperature maps in January and July for two regions are obtained by angular distance weighting interpolation (ADW). The first region is located within the Central Yakut Plain, the Prilenskoe Plateau and the northern slopes of the Aldan Highlands, the absolute heights within the region do not exceed 500 m. The second region is located in Transbaikalia. The relief of the region is represented by plateaus and strongly dissected ridges with a height of more than 2 500 m. Meteorological stations are unevenly distributed over the territory in both regions. Mapping was performed using the free cross-platform geographic information system QGIS. The analysis of the errors carried out for 74 stations, showed that the accuracy of interpolation depends on the number of stations located on the territory and on the land forms. The quality analysis showed that the errors for the winter periods are larger than in the summer period. However, if the data of stations located in areas with high relative elevations are excluded, then the interpolation accuracy decreases sharply due to the underestimation of the features of the spatial temperature correlation between stations. The ADW method requires an understanding of the spatial correlation structure of the station data. The spatial relationships between stations can vary with season. Since the anisotropy of the fields of hydrometeorological characteristics depends on the nature of the relief of the territory and on the season, the errors in the reconstruction of the fields will also differ. The regional variations of the correlation decay distance (CDD) should be taken into account.

KEYWORDS: GIS, temperature maps, distance weighting interpolation (ADW), Far Eastern Federal District

ВВЕДЕНИЕ

По данным Третьего оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации в течение 1976–2020 гг. продолжало наблюдаться повышение температуры воздуха. На региональном уровне потепление отмечается во всех физико-географических районах и федеральных округах. Так, на всей территории Дальневосточного федерального округа температура повышается и в теплый, и в холодный сезоны. В период с 1960 по 2020 гг. средняя годовая температура воздуха во Владивостоке возросла примерно на 2 °С, в Анадыре — на 3 °С, а в Якутске — на 4 °С[3]. По данным того же доклада к середине XXI в. температура воздуха летнего сезона на территории округа может повыситься на 1–3 °С, а зимнего сезона — на 3–7 °С. Такое неравномерное изменение температуры обусловлено большой протяженностью территории округа в меридиональном и широтном направлениях, неоднородностью рельефа и сложным сочетанием климатообразующих факторов. На фоне роста температуры также наблюдается

1 St. Petersburg State University, Institute for Earth Sciences, 31-33, 10th line of Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russia, *e-mail:* **t.osipova@spbu.ru**

2 Voeikov Main Geophysical Observatory, 7, Karbysheva str., St. Petersburg, 194021, Russia, *e-mail:* **e.samoylova@spbu.ru**

3 Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Росгидромет. СПб: Наукоемкие технологии, 2022. 676 с.

ее значительная межгодовая изменчивость, вызванная циркуляционными и радиационными факторами [*Ипполитов* и др., 2012].

Поскольку климатические факторы оказывают значительное воздействие на отрасли экономики, необходим учет характера климатических изменений на территории регионов для разработки плана адаптационных мероприятий. При переходе на уровень федерального округа формирование и реализация адаптационных мер требуют значительной корректировки с учетом климатических условий. Стержнем адаптационной стратегии для отраслей технической сферы является актуализация соответствующих нормативных документов по проектированию, строительству и эксплуатации инфраструктурных объектов (СП, ГОСТ и др.), которые включали бы информацию о наблюдаемых и ожидаемых в будущем климатических изменениях [*Школьник* и др., 2022]. Специализированная информация и продукция для климатологического обслуживания хозяйственной деятельности постоянно пересматривается с учетом изменений климатических параметров. В технической документации климатические параметры представляют в виде таблиц и схематических карт. Несмотря на большое количество различных методик, применяемых в ГИС-технологиях, вопрос о точности геоинформационного картографирования отдельных метеоэлементов остается актуальным. Изолинейные карты дают наглядное представление об основных пространственных закономерностях характеристик, однако реальное пространственное распределение величин может отличаться от изображения. Точность картографирования зависит от таких факторов, как точность исходных данных, характер рельефа территории, количество и взаимное расположение пунктов наблюдений. Влияние этих факторов особенно усиливается в горных районах [*Тебуев* и др., 2017]. Выбор метода пространственной интерполяции во многом определяет точность результатов, в независимости от выбора программного пакета [*Новикова* и др., 2016; *Крюкова*, *Симакина*, 2018].

Целью данной работы является оценка точности пространственной интерполяции методом взвешенных угловых расстояний среднемесячной температуры воздуха на территории Дальневосточного федерального округа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве первичной метеорологической информации использованы данные наблюдений 497 метеорологических станций, расположенных на территории Дальневосточного федерального округа, предоставленных Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Эти данные являются результатами стандартных наблюдений на метеостанциях в период с 1966 по 2021 гг. В работе использованы следующие климатические показатели: средняя месячная температура воздуха в январе, средняя месячная температура в июле. В итоге была создана база данных климатических параметров для каждой метеостанции.

Картографирование производилось с помощью свободной кроссплатформенной геоинформационной системы QGIS. Основой для разработки картографического материала послужила электронная карта Дальневосточного федерального округа (ДФО) м-ба 1: 100 000 в проекции Меркатора. Данная проекция была выбрана с помощью инструмента Projection Wizard. На основу был наложен точечный векторный слой месторасположения метеостанций. В атрибутивную таблицу данного слоя вносился номер метеостанции, соответствующий номеру в исходной таблице, которая была составлена в MS Excel, и данные рассчитанных значений климатических параметров. После этого происходило преобразование и импорт атрибутивных данных, т. е. привязка созданной таблицы к слою в GIS. Таким образом был получен слой с атрибутивной таблицей, содержащей название

метеостанции и рассчитанные значения климатических параметров. Также для наглядности была создана маска ДФО.

По каждому из климатических полей создавались слои путем интерполяции в растр методом взвешенных угловых расстояний (Angular Distance Weighting Interpolation (ADW)) по неравномерно распределенным точкам с помощью SAGA GIS. Следующим шагом было создание изотерм путем преобразования фигуры в линию. ADW-метод позволяет интерполировать среднемесячные значения температуры воздуха для территорий с неравномерным размещением станций, при этом точность интерполяции сравнима с точностью альтернативных методов [*Hulme* et al., 2000; *Caesar* et al., 2006].

Для оценки точности интерполяции на территории Дальневосточного федерального округа были выделены два района (рис. 1). Первый район расположен в пределах Центральноякутской равнины, Приленского плато и северных склонов Алданского нагорья, отметки абсолютных высот в пределах района не превышают 500 м. Второй район расположен в Забайкалье. Рельеф района представлен плоскогорьями и сильно расчлененными хребтами с высотой более 2 500 м. В обоих районах метеорологические станции распределены по территории неравномерно.

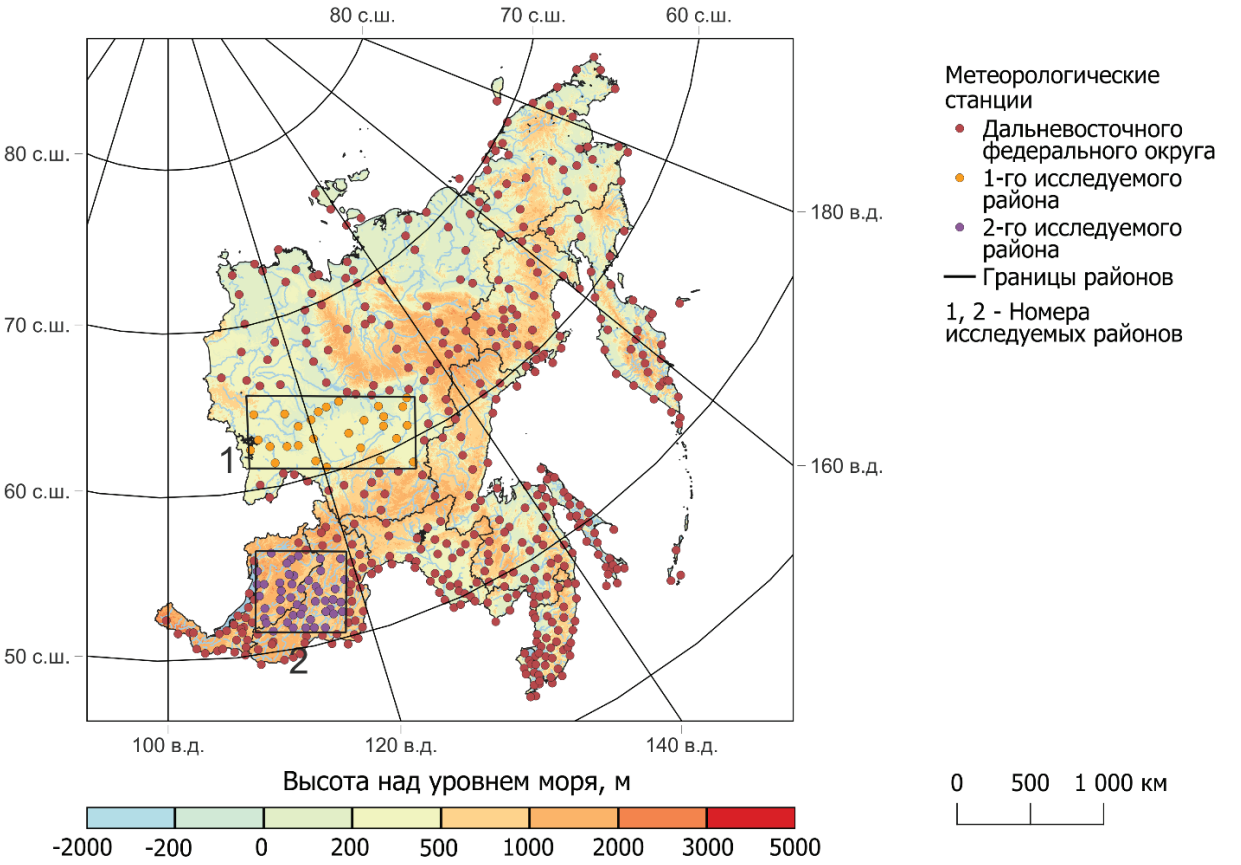


Рис. 1. Районы исследования
Fig. 1. Study areas

Для 27-ми станций 1-го района и для 47-ми станций 2-го района были рассчитаны невязки ΔX_i (1):

$$\Delta X_i = X_i - X_i^* \quad (1),$$

где X_i — значение температуры воздуха на i-той станции, полученное в результате обработки результатов стандартных метеорологических наблюдений,
X_i^* — значение температуры, полученное в результате интерполяции на той же станции, т. е. значение, лежащее между двумя соседними изотермами.

Затем последовательно из массива данных исключалась каждая станция, и полученные в результате интерполяции значения температуры для этой станции сравнивались с измеренными значениями. Невязка Δx_i рассчитывалась по формуле (2):

$$\Delta x_i = X_i - x_i^* \quad (2),$$

где X_i — измеренное значение температуры воздуха на i-той станции, полученное в результате обработки результатов стандартных метеорологических наблюдений,
x_i^* — значение температуры, полученное в результате интерполяции после исключения
i-той станции из массива.

Для сравнения результатов была вычислена относительная ошибка δ (3) по данным каждой станции [*Крюкова, Симакина*, 2018]:

$$\delta = (\Delta x_i / X_i) * 100\ \% \quad (3),$$

где δ — относительная ошибка,
Δx_i — невязка (2),
X_i — измеренное значение температуры воздуха на i-той станции.
Для расчета ошибки среднемесячной температуры была использована формула (4):

$$\sigma_x = \sigma/\sqrt{(n-1)} \quad (4),$$

где σ_x — ошибки среднемесячной температуры,
σ — среднее квадратическое отклонение среднемесячной температуры воздуха,
n — число лет наблюдений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного анализа рассчитанных ошибок и статистических характеристик рядов среднемесячной температуры воздуха было выявлено, что точность интерполяции методом ADW зависит от многих факторов. Густота сети метеостанций и точность исходных данных являются одним из основных факторов, особенно в районах со сложным рельефом. Так, в 1-ом районе с преобладающим равнинным рельефом, но с более разреженной сетью станций, зимой разница между реальной температурой на станции и расчетным значением может превышать $2\sigma_x$ (табл. 1).

В связи с этим значения температуры на карте могут попасть в интервал между изотермами, которые не соответствуют реальным значениям. Во 2-ом районе с более сложным рельефом, но с более плотной сетью станций разница в значениях зимой значительно меньше и редко превышает $2\sigma_x$ (табл. 2).

В летний период разница между реальной температурой на станциях и расчетными значениями в 1-ом районе не достигает $2\sigma_x$, во 2-м районе может превышать $2\sigma_x$, но не превышает 1 °C.

Табл. 1. Значения ошибок и невязок интерполяции для 1-го района
Table 1. Interpolation errors for the 1st region

Станция	Январь					Июль				
	X_i	σ_x	ΔX_i	Δx_i	δ (%)	X_i	σ_x	ΔX_i	Δx_i	δ (%)
Хабардино	−39,8	0,7	−1,8	−5,8	−14,6	15,9	0,2	−0,3	−1,6	−10,1
Чумпурук	−37,9	0,5	−1,9	−3,9	−10,3	16,8	0,2	−0,3	−0,6	−3,6
Хатырык-Хомо	−39,2	0,5	−1,2	−3,2	−8,2	17,8	0,2	0,1	0,4	2,2
Верхневилюйск, АМСГ	−36,0	0,6	−2,0	−2,0	−5,6	17,6	0,2	0,2	0,2	1,1
Туой-Хая	−31,6	0,6	−1,6	0,4	1,3	17,0	0,2	0,2	0,2	1,2
Крестях	−34,3	0,6	−2,3	−2,3	−6,7	17,2	0,2	0,1	0,1	0,6
Чаингда	−33,3	0,6	−1,3	0,7	2,1	16,7	0,2	−0,1	−0,7	−4,2
Ытык-Кюель, АМСГ	−44,0	0,4	−2,0	−3,0	−6,8	17,7	0,2	0,0	−0,6	−3,4
Покровск	−39,9	0,4	−1,9	−1,9	−4,8	18,3	0,2	0,0	0,3	1,6
Амга, АМСГ	−41,6	0,4	−1,6	−1,6	−6,3	18,3	0,2	0,3	0,3	1,6
Тонгулах	−37,0	0,6	−1,0	−1,0	−2,7	16,5	0,2	0,0	−1,2	−7,3
Учур	−32,2	0,5	−0,2	5,8	18,0	18,9	0,2	0,3	1,2	6,3

Табл. 2. Значения ошибок и невязок интерполяции для 2-го района
Table 2. Values of errors and residuals of the Interpolation for the 2nd region

Станция	Январь					Июль				
	X_i	σ_x	ΔX_i	Δx_i	δ (%)	X_i	σ_x	ΔX_i	Δx_i	δ (%)
Уоян	−29,9	0,3	−0,9	−3,9	−13,0	18,1	0,2	0,6	3,4	18,8
Ую	−33,4	0,3	−0,4	−5,4	−16,2	14,7	0,1	0,0	−0,7	−4,8
Баргузинский заповедник	−22,6	0,4	−0,6	3,4	15,0	12,9	0,2	0,3	−3,9	−30,2
Курумкан	−29,6	0,4	−0,6	−6,6	−22,3	19,5	0,2	0,6	5,5	28,2
Баргузин	−27,1	0,3	−0,1	−4,1	−15,1	18,6	0,1	0,4	3,9	21,0
Зилово	−24,3	0,3	−0,3	6,7	27,6	17,5	0,1	0,0	−0,7	−4,0
Замакта	−21,1	0,3	−0,1	3,9	18,5	15,0	0,2	0,7	−3,2	−21,3
Нерчинск, АМСГ	−30,5	0,3	−1,5	−4,5	−14,8	19,9	0,1	0,3	1,7	8,5
Могзон	−25,3	0,3	−0,3	−4,3	−17,0	16,4	0,1	0,3	1,1	−6,7
Улеты	−20,1	0,3	−0,1	3,9	−19,4	18,3	0,1	0,1	2,2	12,0

Однако после исключения из массива данных одной станции пространственное распределение температуры изменяется. После исключения данных по станции Учур значение температуры января изменилось на 5,8 °C, что составляет 18 % от реального значения (рис. 2).

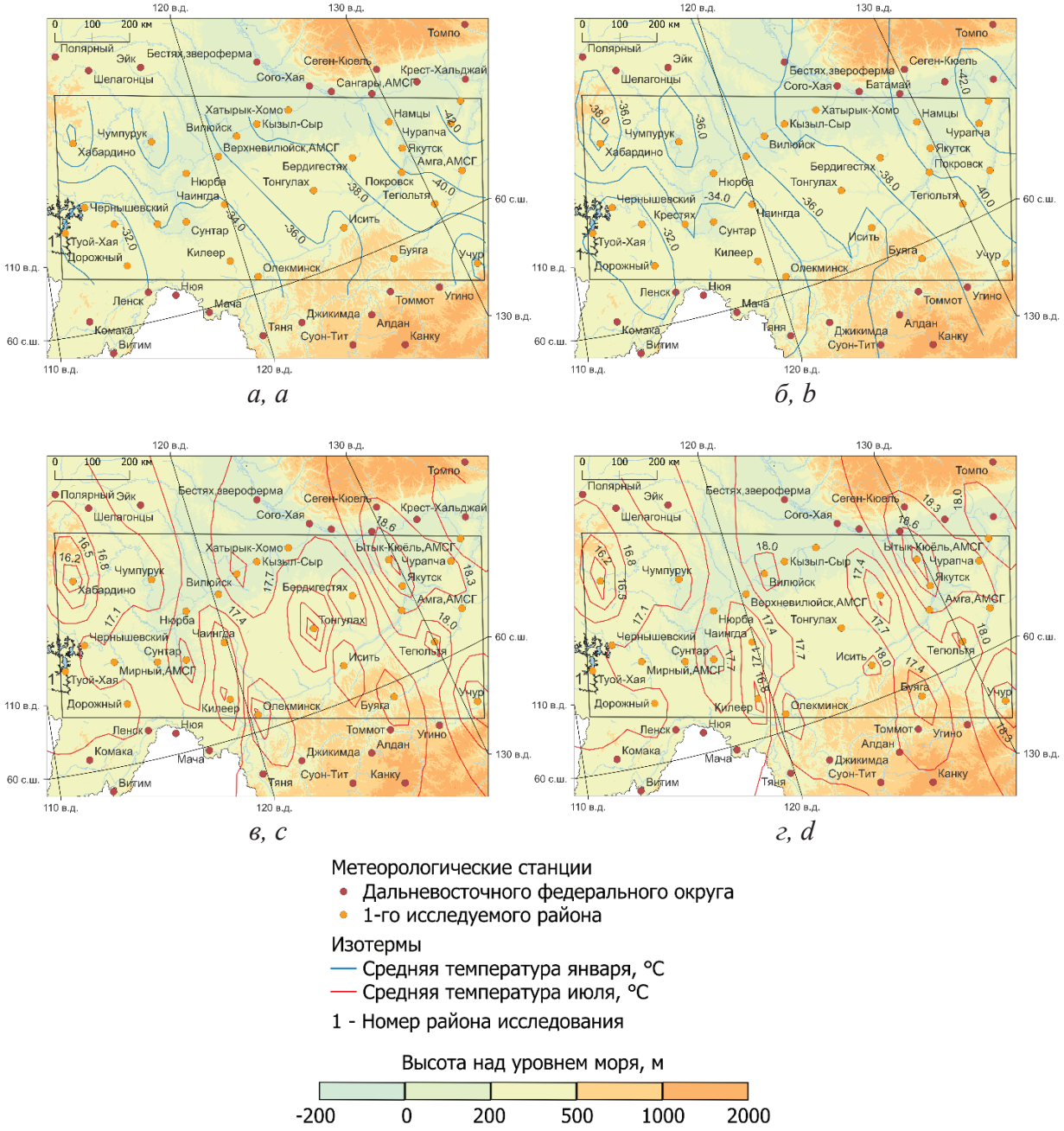


Рис. 2. Фрагменты карт 1-го района:
а — среднемесячная температура января; б — среднемесячная температура января без данных станции Учур; в — среднемесячная температура июля; г — среднемесячная температура июля без данных станции Тонгулах
Fig. 2. Map fragment 1st region:
a — mean temperature for January; b — mean temperature for January without Uchur station data; c — mean temperature for July; d — mean temperature for July without Tongulakh station data

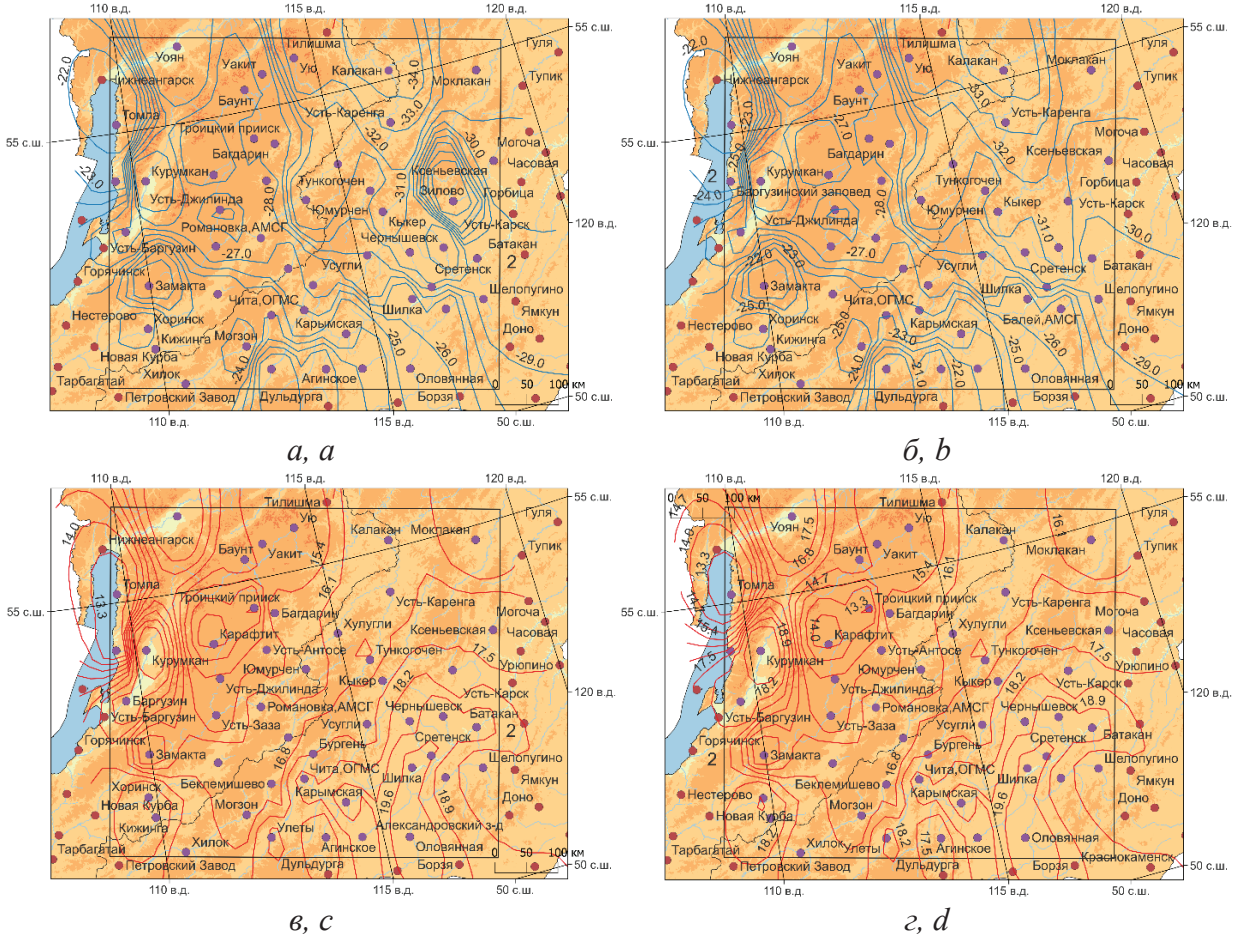


Рис. 3. Фрагменты карт 2-го района:
а — среднемесячная температура января; б — среднемесячная температура января без данных станции Зилово; в — среднемесячная температура июля; г — среднемесячная температура июля без данных станции Баргузинский заповедник
Fig. 3. Map fragment of 2nd region:
a — mean temperature for January; b — mean temperature for January without Zilovo station data; c — mean temperature for July; d — mean temperature for July without Barguzinsky zapovednik station data

Для температуры июля после исключения данных станции Тонгулах изменения составили 7,3 % от реального значения. Для 2-го района исследования были отмечены аналогичные изменения. После исключения данных станции Зилово значение температуры января изменилось на 6,7 °С, что составляет 27,6 % от реального значения (рис. 3). На карте среднемесячной температуры июля после исключения данных станции Баргузинский

заповедник изменения составили −3,9 °С, более 30 % от реального значения. Сравнивая относительные ошибки температуры двух районов, можно сказать, что во 2-ом районе они выше и достигают 30 % даже в июле, в то время как в 1-ом районе они не превышают 18 % зимой и 10 % летом. Такие значительные расхождения могут быть связаны как с характером рельефа территории, так и с параметрами, которые используются при интерполяции. Известно, что выделение влияния различных факторов, вносящих вклад в погрешности, представляет значительные трудности при интерполяции [*Каган*, 1979]. В методе ADW при расчете весов учитываются угловое расстояние и расстояние затухания корреляции между температурой на станциях [*Hulme* et al., 2000; *Caesar* et al., 2006]. Оба параметра рассчитываются с учетом широты, но анизотропия поля температуры при этом учтена частично. Поскольку анизотропия полей гидрометеорологических характеристик зависит от сезона, то и ошибки восстановления полей будут различаться [*Polonskii*, *Shokurova*, 2008]. Наличие инверсий в замкнутых котловинах зимой и неравномерное изменение вертикального градиента температуры на склонах разной экспозиции вносят существенный вклад в пространственное распределение температуры. Даже для среднемесячной температуры расстояние, на котором межстанционная корреляция больше не является значимой на уровне 95 %, зависит не только от широты, но и от долготы и рельефа.

ВЫВОДЫ

На основе карт среднемесячной температуры воздуха за январь и июль, построенных для территории Дальневосточного федерального округа методом интерполяции сетки, взвешенной по угловому расстоянию (ADW), была проведена оценка точности интерполяции. Анализ ошибок, рассчитанных для двух районов, показал, что точность интерполяции зависит от количества станций, расположенных на территории и от характера рельефа. При достаточном количестве станций в горных районах и расчетные, и фактические температуры хорошо согласуются даже в зимний период. Для территорий с равнинным рельефом при недостаточном количестве станций расхождения между расчетными и фактическими температурами могут быть значительны. Однако если исключить при расчетах данные станций, расположенных на участках с большими относительными высотами, то точность интерполяции резко снижается из-за недоучета особенностей пространственной корреляции температуры. Таким образом, применение метода ADW требует предварительного изучения статистической структуры поля. Учет характера изменений расстояния затухания межстанционной корреляции температуры воздуха на участках со сложным рельефом может повысить точность интерполяции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В., Поднебесных Н.В., Харюткина Е.В. Изменчивость температурного режима на азиатской территории России в период глобального потепления. Оптика атмосферы и океана, 2012. Т. 25. № 2. С. 122–131.

Каган Р.Л. Осреднение метеорологических полей. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 212 с.

Крюкова С.В., Симакина Т.Е. Оценка методов пространственной интерполяции метеорологических данных. Общество. Среда. Развитие, 2018. № 1. С. 144–151.

Новикова А.М., Полонский А.Б., Новиков А.А. Сравнение возможностей интерполяционных модулей QGIS для морских климатических исследований при работе с массивом данных малой обеспеченности. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Международной конференции, 2016. Т. 22. Ч. 1. С. 76–88.

Тебуев Х.Х., Кундетов А.О., Тутаев А.А. Метод интерполяции полей температуры в условиях вертикальной зональности КБР. Известия Кабардино-Балкарского государствен-

ного аграрного университета им. В.М. Кокова. Технические науки, 2017. № 2 (16). С. 73–77.

Школьник И.М., Акентьева Е.М., Клюева М.В., Стадник В.В., Хлебникова Е.И., Фасолько Д.В., Разова Е.Н., Рудакова Ю.Л., Павлова В.Н. Федеральные округа России: изменения климата и экономика. Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, 2022. Вып. 604. С. 55–201.

Caesar J., Alexander L., Vose R. Large-scale changes in observed daily maximum and minimum temperatures: Creation and analysis of a new gridded data set. Journal of Geophysical Research, 2006. V. 111. P. 1–10. DOI: 10.1029/2005JD006280.

New M., Hulme M., Jones P. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901–1996 monthly grids of terrestrial surface climate. Journal of Climate, 2000. P. 2217–2238. DOI: 10.1175/1520-0442(2000)013<2217:RTCSTC>2.0.CO;2.

Polonskii A.B., Shokurova I.G. Statistical structure of the large-scale fields of temperature and salinity in the Black Sea. Physical Oceanography, 2008. V. 18. Iss. 1. P. 38–51.

REFERENCES

Caesar J., Alexander L., Vose R. Large-scale changes in observed daily maximum and minimum temperatures: Creation and analysis of a new gridded data set. Journal of Geophysical Research, 2006. V. 111. P. 1–10. DOI: 10.1029/2005JD006280.

Ippolitov I.I., Kabanov M.V., Loginov S.V., Podnebesnykh N.V., Kharyutkina E.V. Variability of temperature behavior over the Asian territory of Russia in the period of global warming. Optika Atmosfery i Okeana (Atmospheric and Oceanic Optics), 2012. No. 2. P. 122–131 (in Russian).

Kagan R.L. Averaging of meteorological fields. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1979. 212 p. (in Russian).

Kryukova S.V., Simakina T.E. Evaluation of methods for spatial interpolation of meteorological data. Society. Environment. Development, 2018. No. 1. P. 144–151 (in Russian).

New M., Hulme M., Jones P. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901–96 monthly grids of terrestrial surface climate. Journal of Climte, 2000. P. 2217–2238. DOI: 10.1175/1520-0442(2000)013<2217:RTCSTC>2.0.CO;2.

Novikova A.M., Polonskii A.B., Novikov A.A. Comparison of QGIS interpolation modules capabilities for marine climate research on duty with an array of low-security data. InterCarto. InterGIS. Proceedings of International Conference, 2016. V. 22. Part 1. P. 76–88 (in Russian).

Polonskii A.B., Shokurova I.G. Statistical structure of the large-scale fields of temperature and salinity in the Black Sea. Physical Oceanography, 2008. V. 18. Iss. 1. P. 38–51.

Shkolnik I.M., Akentyeva E.M., Klueva M.V., Stadnik V.V., Khlebnikova E.I., Fasolko D.V., Razova E.N., Rudakova Yu.L., Pavlova V.N. Federal districts: Climate change and economy. Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory, 2022. Iss. 604. P. 55–201 (in Russian).

Tebuev Kh.Kh., Kundetov A.O., Tutaev A.A. Interpolation method of temperature fields in the conditions of vertical zonation KBR. Izvestiya of Kabardino-Balcarian State Agrarian University named after V.M. Kokov. Technical Sciences, 2017. No. 2 (16). P. 73–77 (in Russian).

UDC: 528.94 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-521-534**

Dmitriy S. Loginov[1]

TOPOGRAPHIC DATA IN THE CARTOGRAPHIC SUPPORT OF GEOLOGICAL EXPLORATION: CURRENT STATE AND PROSPECTS

ABSTRACT

The purpose of the current study is an attempt to characterize the scientific and practical issues of modern topographic data preparation and its use in geological exploration. The study is based on the long-term author's experience in cartographic support of field and cameral geological and geophysical works and on the analysis of modern research in topographical mapping. The specifics of providing access to modern topographic data in the Russian Federation, the Republic of India and the Republic of Colombia, where the main experimental work has been carried out, are briefly described. The content features of the topographic map sheets of these countries are shortly summarized. Practical results of solving such exploration tasks as survey network design, creation of terrain sketch, processing and interpretation of geological and geophysical data, creation of digital terrain models, and preparation of base maps for web services are presented. The prospective directions for further research in improving the use of topographic data in geological exploration are given. It has been found that topographic maps and data are increasingly being used as base layers in the creation of the modern web map services. A balanced and critical approach to the use of global topographic data resources is need for geological exploration as a state's strategic activity. The industry needs publicly available national multiscale topographic maps as well as theoretical and methodological foundations for the use of web mapping advances in mineral prospecting and exploration.

KEYWORDS: cartographic support, geological exploration, geophysical survey, topographic maps, topographical mapping

INTRODUCTION

Topographic data, including topographic maps and plans, is being used during the entire production cycle at all stages of geological exploration. Geological exploration is carried out in regional, prospecting, appraisal and exploration stages. Each stage has specific goals and objectives, spatial coverage of the object of study. Work is being performed in various physical and geographical conditions; a large number of high-precision equipment is being used, and constantly requires all objects to be spatially referenced on the ground. Topographic data is needed everywhere: from planning of the survey network and topographic and geodetic support for field work [*Gura* et al., 2017] to the cameral processing, interpretation and design of the final results.

Related normative documents on topographic and geodetic support and geophysical surveys by different methods (gravimetry, seismic surveying, magnetic surveying, etc.) go back to the experience of work in the 20th and early 21st centuries. They describe the basic principles of working with topographic maps, as well as the requirements for the accuracy of the surveys and the materials involved. Maps allow the user to explore the landscape before field survey and to provide a wide range of tasks. For example, the planning of exploration works starts from

[1] Target Horizon LLC, Department of Digital Cartography and GIS, 2, 3th Khoroshevskaya str., Moscow, 123308, Russia, *e-mail:* **loginov@geohorizon.ru**

assessment of the land passability (including preparation of surface slope maps), hydrological conditions (calculation of flood-prone land) and availability of transport and socio-economic infrastructure. All factors have an influence on the subsequent economic analysis of the feasibility and choice of methodology for performing field geophysical surveys. In this respect, the first geophysical surveys and the beginning of systematic geological mapping in early stages in the 20th century [*Albert*, 2019] were consistently based on the use of state topographic maps as the main achievement of geodesy and cartography of the countries around the world.

The creation of topographic maps relies on the scientific foundations and modern advances in cartography. The transition to electronic topographic maps is a response to the digitalization of cartography and the development of geographic information mapping. The universal classification of each content element makes it possible to move smoothly to the vectorization and coding of objects, with the subsequent creation of spatial databases with all the necessary characteristics. Thus, electronic topographic maps are now the primary means of topographic data availability. Electronic form allows for computer analysis of the data for decision making of various kinds. For example, calculation of the transport accessibility schedule, automated selection of optimal drilling rig routes to field exploitation management [*Dubrovsky, Malygina*, 2015] can be reached. New direction of the digital field and digital twin of a seismic crew, as well as the pipeline [*Eremin, Eremin,* 2018] is beginning to develop. Such solutions, which are oriented towards automating the production process of all phases of geological exploration, are based on the topographic data.

Nowadays it is becoming increasingly popular to use open topographic data from Google, Bing, Yandex, and other web services to access volunteered geographic information (VGI) such as OpenStreetMap, Wikimapia, etc. The result of enthusiasts' work is topographic data, which is no less detailed than electronic topographic maps. Moreover, this data is often the most up-to-date due to the fact that one knows that a new item has been built near his house, a forest has been planted, etc. A government system of updating electronic topographic maps might simply have no time to update the content (apart from on-duty topographic maps, where changes are made rapidly) [*Babashkin* et al., 2016].

Another important advantage of open topographic data is its ability to be used as base layers in geoportals, web-based mapping services, GIS atlases and unique interactive maps. The data exchange standards developed by Open Geospatial Consortium (OGC) allow for the immediate connection of open-source information. Data can be used both in the web interface and in the desktop GIS, where the modern cartographer's main place of work is located. In summary, the basic functions of topographic maps have expanded considerably with the development of new forms of representation and ways of providing access to data.

However, no matter how beautiful OpenStreetMap or Google Maps are, the accuracy and reliability of most objects can be questionable, especially in less populated areas, which include areas where exploration is taking place [*Al-Bakri* et al., 2016]. Moreover, despite detail, the main content of VGI resources relates more to cultural and entertainment features [*Davis, Kent*, 2022]. On the contrary, Soviet topographic maps and town plans have a greater emphasis on displaying geographical features, landscapes, and terrain characterization, which is more important for geological exploration.

As a result, the role of topographic data in cartographic support for geological exploration is changing as new forms are becoming available. But there is no change in the requirement for accuracy and the ability to provide valid orientation on the ground. In this way it is very important to highlight the practical experience of using official state topographic data and experience in creating own products with topographic functions. It can be helpful to define prospective directions of this type of mapping in the context of field and cameral geological and geophysical works.

MATERIALS AND METHODS OF RESEARCH

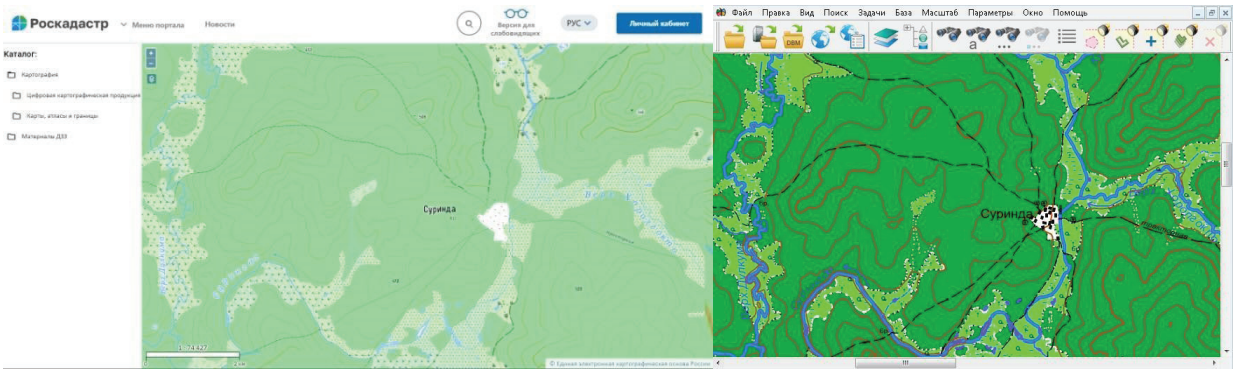
The current work is based on author's research, which was carried out during cartographic support of geological exploration in the Russian Federation, the Republic of Colombia and the Republic of India since 2014. A set of works, including digital terrain models preparation for the needs of oil and gas companies, was carried out using geo-information methods. Web mapping technologies have been used to create own web mapping services to support field and cameral projects, to provide rapid access to topographic and thematic data for a wide range of users with different specialization and qualification.

RESULTS OF RESEARCH AND THEIR DISCUSSION

Exploration by different geophysical methods begins with the questions "where is the area of interest?" and "what is located on it?" Cartographic support is supposed to answer these questions. The cartographer's or GIS specialist's journey starts with getting access to the spatial data collections of the country in which the geological and geophysical survey will be carried out. Spatial Data Infrastructure (SDI) creation and providing access to geodata (including topographic maps) are the current focus of government organizations responsible for geodesy and cartography. Of course, each country has a different history, tradition and policy on access to topographic data. Due to the national importance, the task of ensuring access and timely updating the content of electronic topographic maps using modern technologies comes to the fore [*Karimova*, 2018]. Below there is a brief overview of the current state of topographic mapping and the specifics of map delivery in the countries where the author had experience in large-scale topographic and geodetic data capture.

Russian Federation. Electronic open access topographic maps with 1: 50 000, 1: 100 000 and smaller scales can be searched and ordered through the official website of the Federal Portal of Spatial Data[1] (fig. 1, a). Data is searched by attribute (e. g. sheet name, administrative unit, map scale, survey type point), or by spatial search (by coordinates, GeoJSON download, polygon drawing). The electronic topographic map by nomenclature sheet in *.sxf format (fig. 1, b) with the classifier in *.rsc format is a result of the request.

Open access topographic maps have a simplified content in contrast to restricted-use maps. For example, elements of mathematical and geodetic basis, semantic characteristics of some objects (for example, relief, hydrography, road network, vegetation) are missing. Maps contain a simplified set of industrial, agricultural and socio-cultural objects, as well as semantic characteristics (e. g. for swamps), etc. Nevertheless, the open-use electronic topographic maps allow performing a wide range of tasks that arise for specialists during field and cameral geological and geophysical works.



a) *b)*

*Fig. 1. Reduced fragments of the electronic open-use 1: 50 000 scale topographic map: a) in Federal Fund of Spatial Data website window, b) in GIS Panorama window from *.sxf*

[1] Federal Portal of Spatial Data. Web resource: https://portal.fppd.cgkipd.ru/main (accessed 01.02.2023).

It should be noted that back in 2015, the ordering of electronic topographic maps and geodetic information was carried out by personal contact to the main and local funds. This required the completion of various bureaucratic procedures. As a result, the user received the maps after approximately one month. Now the procedure has been simplified and accelerated due to the new form of access to the data by geoportal.

Currently, the creation of a Unified Electronic Cartographic Framework (called EECO) through the efforts of the Rosreestr and subordinate organizations is in its final stage. EECO is a systematized set of spatial data on the territory of Russia. Data can be provided by means of TMS (and WMTS), WMS, WFS in state, local and international coordinate systems. The implementation of EECO will improve the quality and availability of thematic data generated from it for mapping activities in various sectors of the economy [*Tararin*, 2022].

Republic of India. The official topographic maps of the Republic of India are provided by Survey of India (SOI). SOI is the premier state mapping agency for land surveying and mapping, geodetic, geophysical surveying, etc. As per the National Mapping Policy adopted in 2005, two series of analogue and digital topographic maps in 1: 50 000 scales are being produced: "Defense Series Map" for defense and national security needs and "Open Series Map" for civil use. The Open Series Map sheets are available to Indian citizens free of charge in *.pdf format for the entire country, except for areas falling under the Restricted Area category. These topographic maps can be accessed through the official website[1] and available in *.gdb, *.shp, *.tiff formats for a charge. The required map sheets can be searched through the list of administrative units, or by directly entering the sheet nomenclature in the old Everest system (although Open Series Map sheets have a different nomenclature). Despite that the maps are available free of charge only in *.pdf, the use of data in this format makes it possible to solve many tasks of geological exploration.

Each Open Series Map sheet is published in UTM projection on WGS84 ellipsoid in English and in Hindi. Layout has a map, scheme of map sheet location, conventional symbols (fig. 2, a), notes, information about projection and datum, magnetic declination, graphic, numerical and named scales and output data. All data are presented digitally and organized by next categories: buildings, hydrography, communications, land cover, utilities, boundaries, hypsography, vital installations, map frame and text (fig. 2, b). The description for object groups, coding and semantic characteristics is given in the instructions of Survey of India.

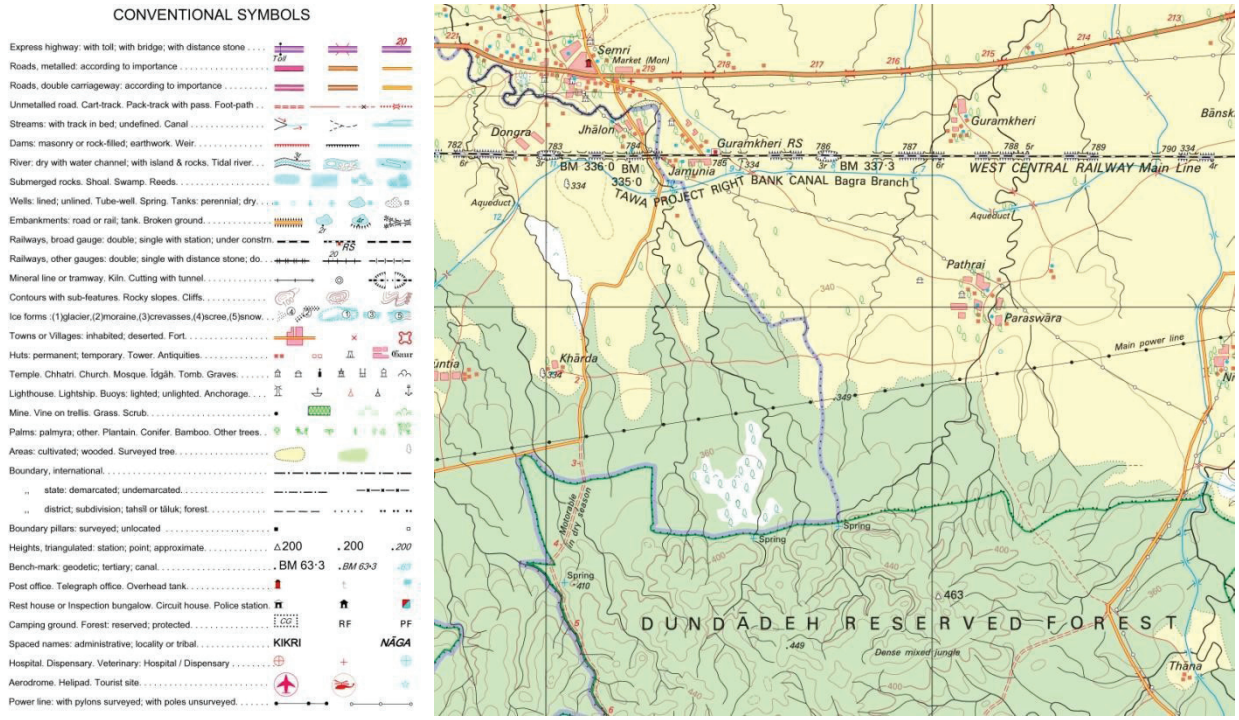
Other data are available through the website, such as the official boundary of India, administrative boundaries of states, districts and sub-districts (in Lambert Conformal Conic projection) in *.shp format. In addition to the design of the final exploration maps in GIS, they also allow for a comprehensive analysis of the study area location in relation to transport routes and natural features (reserved and restricted forests, etc.).

Republic of Colombia. The Geographic Institute Agustín Codazzi (IGAC) is the principal authority on geodesy, photogrammetry and cartography and is responsible for the production and distribution of Colombian topographic maps. Today, the "Colombia en Mapas geoportal"[2] is the main gateway for geodetic, gravimetry, cadastre and other geodata. This platform is an updated version of the Institute's previous geoportal, which the author used for geodetic data capture in 2015. Today geoportal is designed to integrate and make geographic data available via an open and easy-to-use platform for citizens and organizations. Centralized data is available on 23 topics, including historical topographic maps, cadastre, geodesy, map sheet databases, digital elevation models, orthophotomaps, geology, etc.

---

1 Survey of India. Web resource: https://surveyofindia.gov.in/ (accessed 01.02.2023).

2 Colombia en Mapas. Web resource: https://www.colombiaenmapas.gov.co (accessed 01.02.2023) (in Spanish).



a) b)

Fig. 2. Example of the 1: 50 000 scale Open Series Map sheet:
a) legend, b) reduced map fragment with typical landscape

The main topographic maps currently supported by the IGAC are the 1: 25 000 and 1: 100 000 scale series. They are available both in desktop and mobile (fig. 3, a) geoportal versions in the "Vector database per map sheets" section. The required sheets (and other data) can be searched both by the address list of the main administrative units of Colombia and by selecting an area of interest of any form directly from the geoportal interface. For example, a list of coordinates is the result of selecting geodetic information. It is important information for creating a geodetic reference network for topographical and geodetic support for field geophysical surveys.

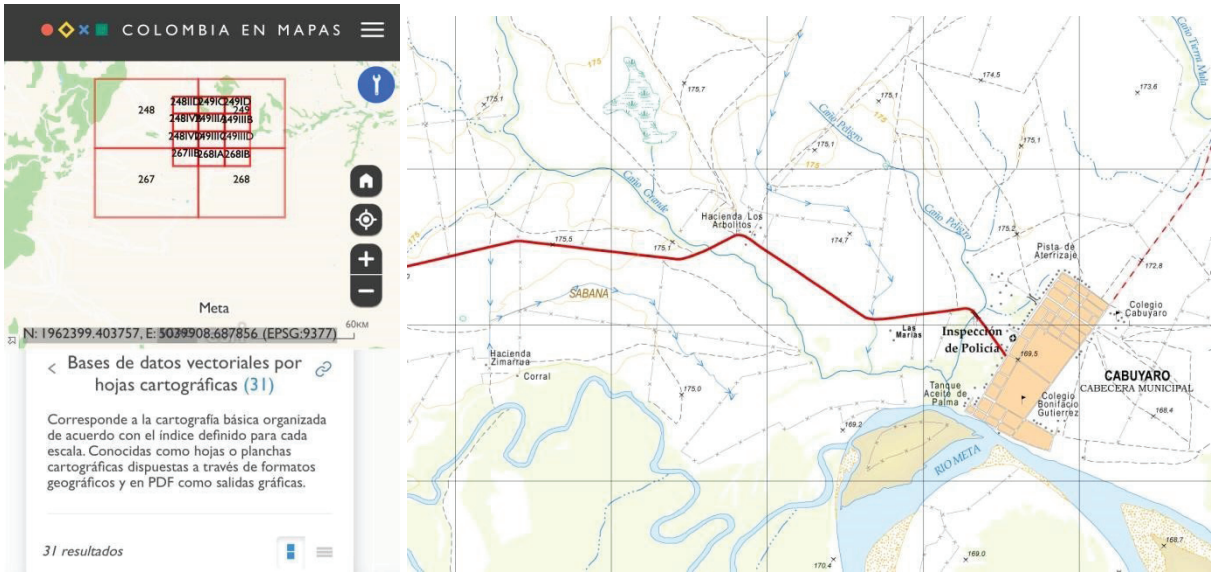
The result of a topographic map search can be downloaded depending on availability in *.pdf format, *.gdb, *.gpkg, *.shp. The topographic map sheets on scales 1: 25 000 and 1: 100 000 are presented in Spanish in Gauss-Krueger projection with Magna-Sirgas geodetic datum and GRS80 ellipsoid. The sheets contain the map itself, all kinds of scale representation, a uniform legend, a table of abbreviations, information about the projection, scheme of map sheet location, output data. The maps have the following content elements: points of the geodetic network, vegetation, structures, transport (road network and structures), hydrography, relief.

The experience of the Russian Federation, India and Colombia, briefly described, shows the relevance of the work of government agencies responsible for geodesy and mapping in providing access to topographic data through web services and geoportals. The improvement of geoportals continues and is gaining national specifics and approaches to the development of these services. The experience can be useful in the development of SDI geoportals for regions and commonwealth countries (e. g. CIS).

Totally, the information from geoportals allows a high level of cartographic and topographical support for geological exploration, including the solution of such issues as:

1) orienteering;
2) comprehensive analysis of all available remote sensing, landscape and geological-geophysical data with topographic features;

3) planning of geological exploration works;
4) studying the geological structure and oil and gas potential of sedimentary basins;
5) monitoring and collection of statistical data on the oil and gas facilities operation;
6) identification of hazardous areas and selection of optimal routes for relocation of geophysical equipment and movement of field crews;
7) managerial tasks, planning, control of field infrastructure areas, underground gas storage facilities, pipelines and other.
8) localization of accidents and emergency situations (including oil spill control, damage assessment, etc.).
9) other tasks.



a) *b)*

Fig. 3. Colombian topographic maps:
a) mobile version of the "Colombia en Mapas" geoportal,
b) reduced fragment of 1: 25 000 scale topographic map sheet

Experience of preparing and using digital topographic data for some geological exploration tasks. The following section presents the author's practical experience of preparing topographic data and using it for decision making in some exploration tasks.

Design of the survey network. The planning of the survey network for various geophysical survey methods is directly based on knowledge about terrain. It can be obtained by careful reconnaissance or by distance analysis of topographic maps or remote sensing data. Combination of these data sources makes possible the analysis of geographical features and their characteristics in the study area, such as passability [*Rylskiy* et al., 2022], terrain roughnesses, forest cover, seasonal flooding, transport accessibility, presence of settlements, communications, agricultural fields, etc. This information is necessary to minimize the influence of natural and anthropogenic factors on subsequent survey picketing and measurement of geophysical field values at each survey point. It is especially important for seismic acquisition, where the seismic field is generated and recorded using heavy and expensive equipment. Therefore, knowledge of each knoll is the key to timely execution of work and obtaining primary material on the geological structure of the study area.

The ideal seismic acquisition survey network is carried out along regular lines. Under real-world conditions, equipment and field crews will naturally be in the way of various objects (such as lakes, rivers, gullies and marshes) that need to be bypassed. As a result, a displacement of one or another seismic shot point will produce a loss in signal multiplicity and consequently the quality of survey. The greater the number of skips or noise generating objects like power lines, railways, roads, settlements, slopes (fig. 4), the worse the final result. Therefore, point shifting is performed by geophysicists in accordance with a pre-defined methodology [*Cordsen* et al., 2011], which is based on knowledge about terrain topography. For this purpose, topographic maps, remote sensing images can be connected as base layers in the geophysical survey network design software, and vector data can be loaded. After the joint analysis of the topographic data, the final choice of survey configuration and its parameters (e. g. distance between lines and their direction) is made.

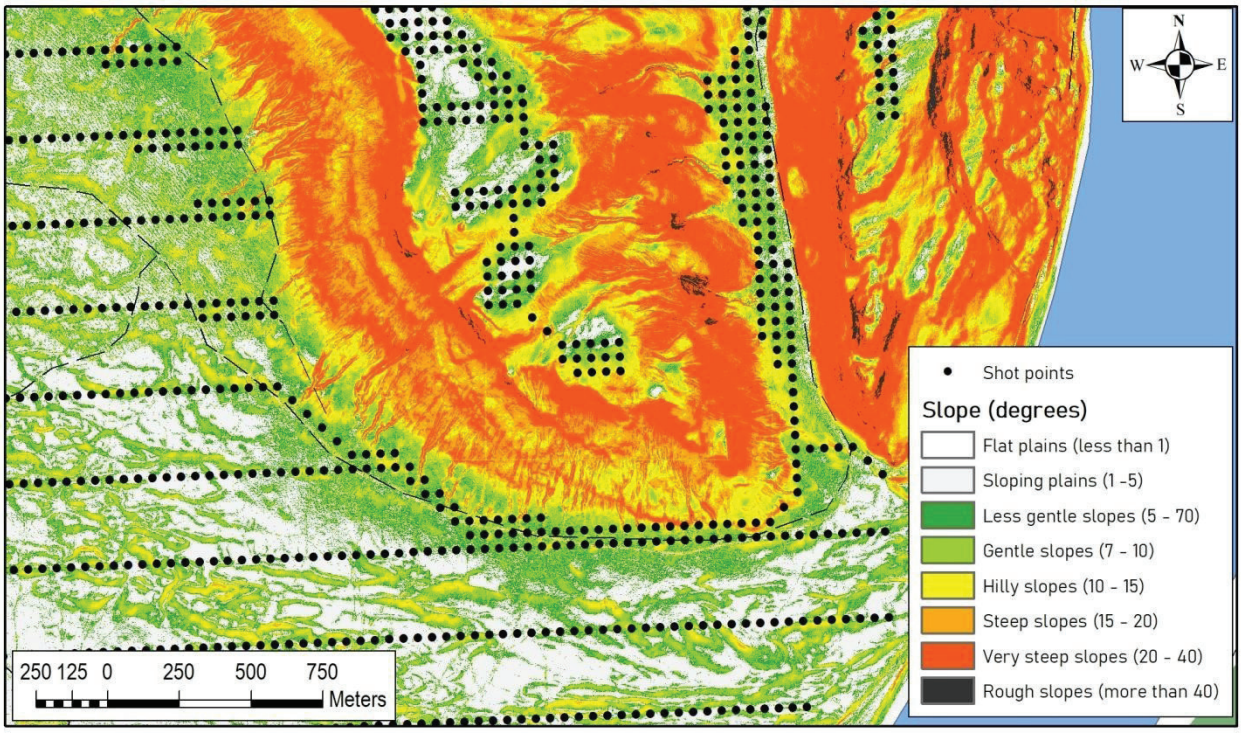


Fig. 4. Example of seismic survey points offsets due to slope calculated from topographic data (Krasnoyarsk Krai, Russian Federation)

In addition, the quality of the field survey is influenced by the cadastral situation of the study area. Not every landowner grants permission for a piece of geological and geophysical survey to be carried out on their property, especially in the midst of harvesting. To minimize the economic cost of the work and potential problems due to lack of field permits, cadastral data is used in conjunction with topographic maps. The survey is designed to minimize the number of physical observations on agricultural areas, plantations and private property, while maintaining the quality of the survey results. Thus, the analysis of the terrain topography and other geodata at the survey network design stage helps to minimize potential problems that may arise in the field.

Terrain sketch creation. The topographic and geodetic works are the first priority during the field geological and geophysical surveys. It is the responsibility of topographic teams to reconnaissance survey picketing and create catalogs of survey points coordinates. Also, one of the important tasks is creation of the terrain sketch — a large-scale map with detailed indication of potentially interfering feature location that cannot be read from topographic maps. Everything that

affects the safe transport of geophysical equipment and personnel to the survey area should be mapped on the sketch. It is information about the impassable forests, trenches, lakes, marshy meadows, areas of high risk for human life (habitats of insects and poisonous reptiles), crossings, public roads, communications (pipelines, power lines, industrial buildings and constructions) and other data.

The sketch is based on information from topographic maps as well as information obtained by surveyors during their inspection of the study area. The surveyors collect information about terrain, as they are the first ones to pass through the survey area. All information is recorded in individual field logbooks. The field cartographer compiles the data by producing a final electronic terrain sketch in GIS. The cartographer uses remote sensing data to specify the locations of the objects described into logbooks. The author directly performed this kind of work during the field 3D seismic acquisition at the Colombian license block in Meta Department in 2015.

While an electronic sketch is used in various gadgets, a paper version is also needed cause difficult terrain and work conditions. The paper version is prepared for tasks assigned to the surveyors, drilling crews and geophysicists, and the current daily work location. Automated printed layouts with thematic information were produced using the "Data Driven Pages" function in ArcMap 10.2. Since the fieldwork is carried out along seismic lines, the route map mode was used, where the survey line serves as a baseline (fig. 5). In this way, a terrain sketch allows proper planning of the survey time, considering the complexity of the individual parts of the terrain.

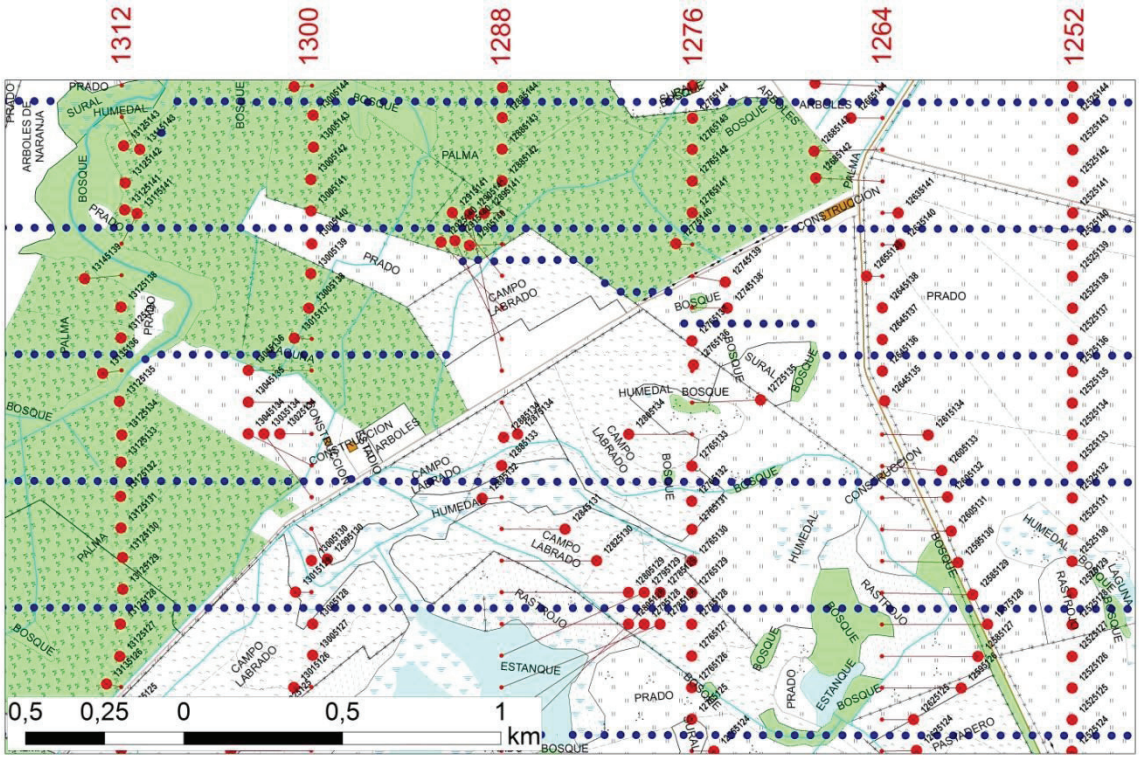


Fig. 5. Reduced fragment of the terrain sketch for cartographic support of drilling and other geophysical works (Meta Department, Colombia)

Processing and interpretation of geological and geophysical data. Next stage — geological and geophysical data processing and interpretation — is based on field geophysical survey results. This stage is the most time-consuming in terms of data analysis and interpretation, because the main objective is to study and clarify the geological structure of the study area and to identify promising oil and gas bearing zones and other challenges. A wide range of data is

involved: from archival materials and results of past surveys to modern digital models of geophysical fields, geological maps, etc. In addition, the full range of topographic data is used: from digital topographic maps, elevation and terrain models, to Earth remote sensing data with various spatial resolutions (up to ultra-precise lidar survey).

Topographic data provide an opportunity to compare the situation on the ground with observed seismic signal skips during cameral processing of initial seismograms and time sections. It is important, e.g. in identifying the causes of abnormal changes in signal-to-noise ratio and in phase tracing during seismic horizon correlation. Also, with the help of topographic data, it is possible to establish the causes of shift in the survey lines, which ignorance may have a bad influence on the subsequent data interpretation stage. The latest case of how the joint use of geodata has influenced additional 2D seismic acquisition in one of the poorly explored sedimentary basins in the Republic of India is discussed in detail in [*Loginov*, 2022].

The interpretation results are presented in report maps (isochrone, structural (depths), thicknesses maps, etc.), which should include topographical data for georeferencing in addition to the thematic content (fig. 6). This requirement for topographical data to be plotted on geophysical maps is an international practice, as confirmed by geoscientific map analysis study in [*Pal, Albert*, 2021].

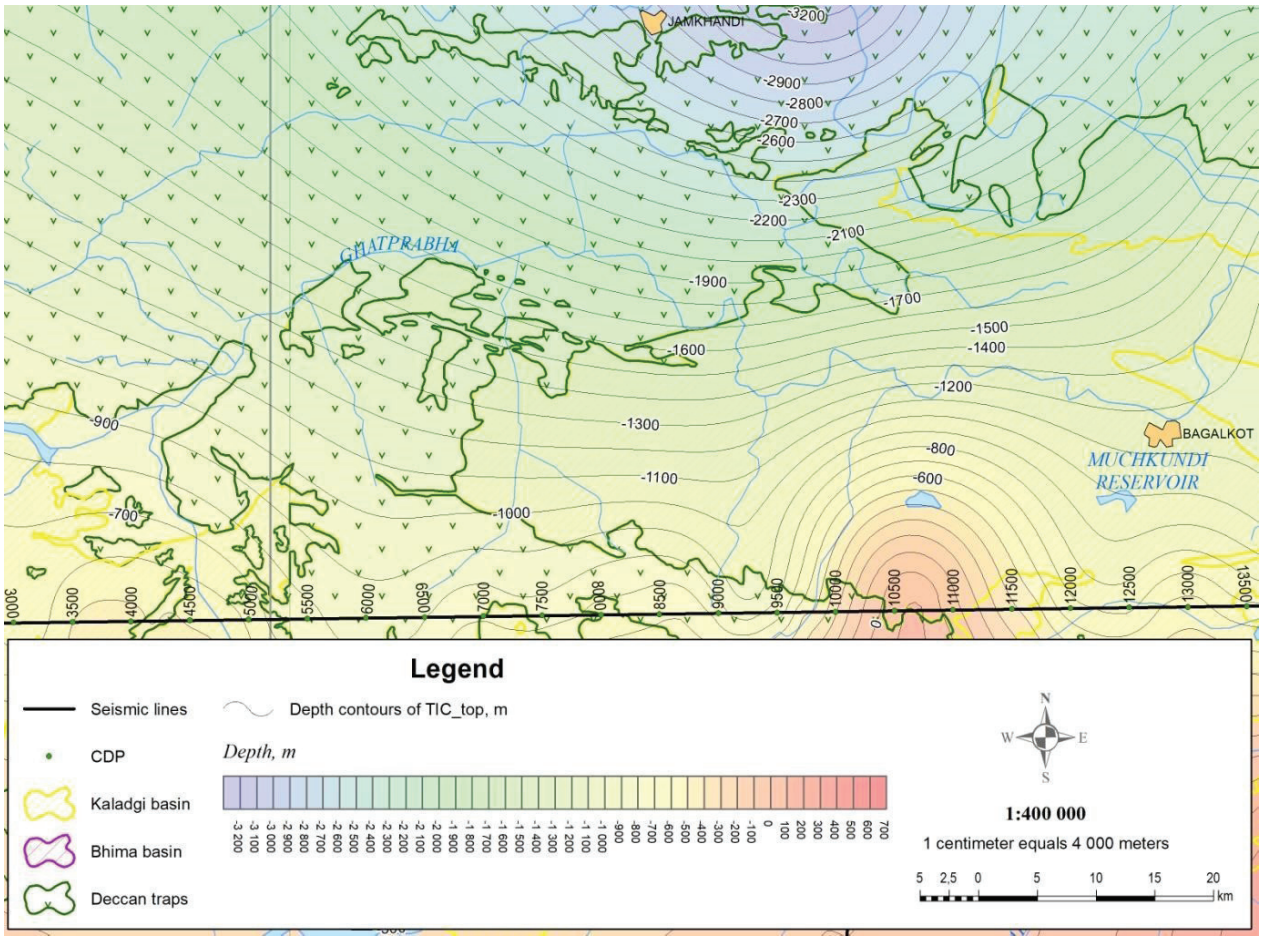


Fig. 6. Fragment of structural (depth) map with topographic elements (Kaladgi sedimentary basin, India)

Creation of digital terrain models. The results of the comprehensive processing and interpretation of geological and geophysical data (including the results of mineral resource

estimation) are important for further decisions of exploration. If geological conditions are favorable, the well drilling will be carried out. In case of success, the subsequent exploitation of the identified deposit will be done. These activities rely on detailed information about the topography of the study area, which can be presented with a large-scale digital terrain model (DTM) for license blocks. Major Russian oil and gas companies order such works with mandatory use of up-to-date remote sensing data and airborne laser scanning data. The update of existing DTMs provides up-to-date topographical data for various activities, such as infrastructure and facilities monitoring in the oil and gas industry.

The author has developed and tested a methodology for creating DTM for cartographic support of underground gas storage facility construction in the license area in the Amur Oblast, Russian Federation. Methodology is based on using the initial data frame from 1: 25 000 and 1: 50 000 scale open-use digital topographic maps described earlier. Further updating of metric and semantic characteristics of objects by means of high spatial resolution remote sensing data interpretation was done. The structure of DTM is specified and designed according to the classifier accepted in topographic-geodetic service of the Customer's organization. The results are the geodatabase (*.gdb) and GIS-projects (*.mxd) for each nomenclature sheet (fig. 7), digital elevation models and hard copies of maps with object content that corresponds to the list adopted for open publication.

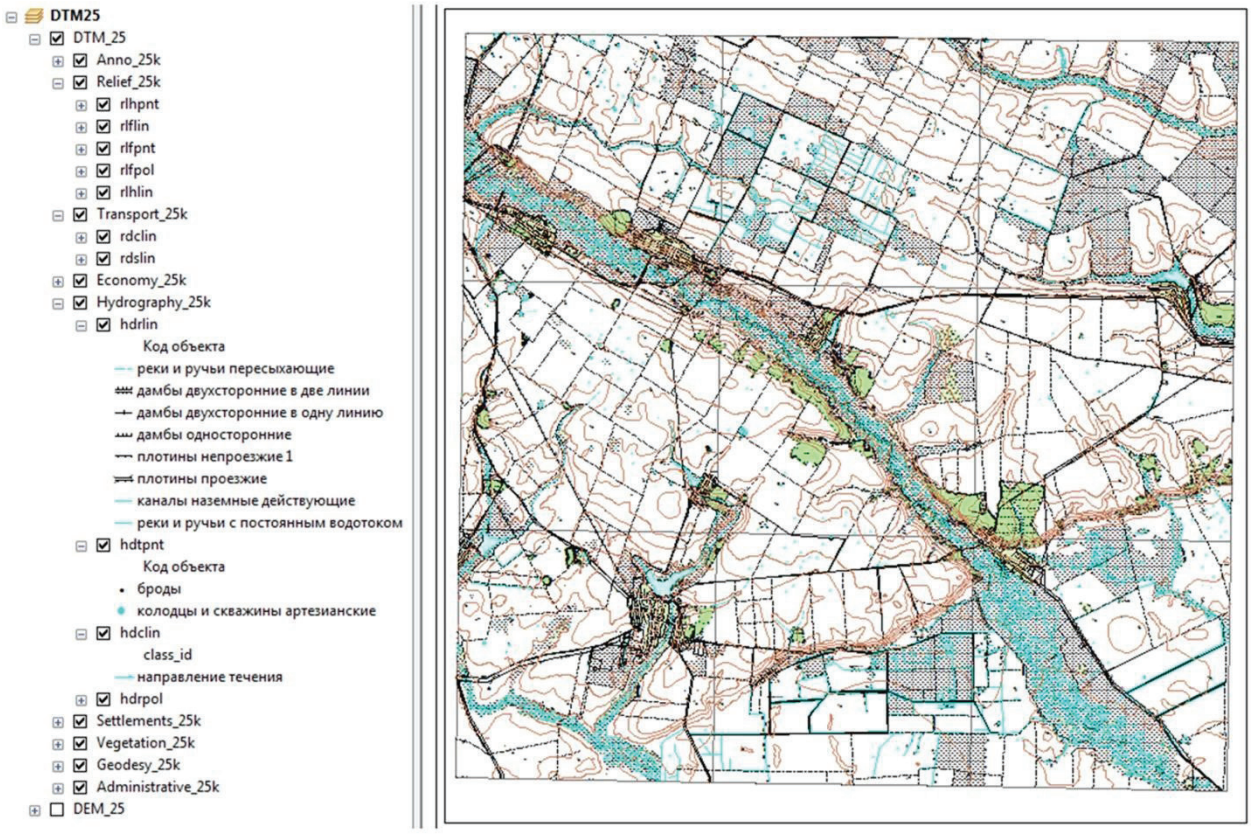


Fig. 7. ArcMap 10.4 window with digital terrain model layout (Amur Oblast, Russian Federation)

The experience of using open electronic topographic maps as a base source for this kind of work showed the need to update state electronic topographic map sheets used as a frame. This is because the contents of the map sheets are dated 2011. So, there have been updates of semantic characteristics and coding of objects (e. g. changing the area code from "under construction" to

"built-up"), editing of metrics for road network, hydrography and objects of economic activity, up to and including the vectorization of newly appeared terrain objects. The updated DTM is now used to create thematic maps, documents and materials required to develop project documentation. Also, DTM is used in the additional geological study of the previously identified structures and assess their suitability for the construction of underground gas storage facilities.

Preparation of base maps for web services. The development of own web services is an actual direction for cartographic support of the field and cameral geological and geophysical research for exploration [*Loginov*, 2021]. Topographical data retains the basic functions discussed earlier in these kinds of products. At the same time, global web services and VGI from OpenStreetMap, Google Maps, Bing, ESRI and others are widely used as base maps. However, the accessibility generates contradictions and many solutions to the single question "what is here?" It is a fact that the detail, accuracy, and even more so the design, have major differences on the available base maps. Web application developers for the oil, gas and mining industry should therefore be careful in their choice of base maps, depending on the goals they have in mind when creating their own web resource.

Here is a practical example. The author used the 1: 50 000 scale Open Series Map (fig. 8a) and Google Maps (fig. 8b) as a topographic data when was preparing a web service for 3D seismic acquisition monitoring in Odisha state (formerly Orissa), India. With the same scale level, there is a minimal graphical load (density of mapped objects and their conventional signs) of the open Google data, even though the Open Series Map sheets for this area were published in 2009 and 2011, and major details were updated in 2005−2006. This case confirms the need to use government topographic maps as base maps, especially in rural and low population areas.

However, global topographic data should not be discounted when it comes to preparing web maps with medium and small-scale coverage. Global maps help geologists and geophysicists to deal with the spatial orientation during cameral processing and interpretation, especially in cases when national multi-scale topographic base maps are not available.

Prospects. The delivery of topographic data through web services and geoportals is a promising trend not only for web mapping, but also for topographic mapping in general. Many branches of the earth sciences are interested in this data, including geophysics and geology, as has been shown in previous sections of this article.

Research on the use of databases for multi-scale web mapping is relevant, e. g. [*Krylov, Mosolov*, 2022]. The reason for this is that increasingly web-based resources are being used to provide access to topographic data, including in the form of base maps in various thematic web resources. In this case, another promising direction is the development of technical issues of preparing raster topographic maps for publication by WTMS services. The spatial resolution of images and map scale should be taken into account in order to provide access to data without time delays and in high-demand conditions.

In addition to purely topographic geoportals, it is important to develop web mapping of individual terrain elements, e. g. geoportals and datasets on protected areas [*Alekseenko* et al., 2019], seasonal roads [*Nokelaynen*, 2021], etc. These data separately contain specialized information, which is updated by specialized departments and research institutes more frequently here than on topographic maps. Such sources of topographic data are useful both at the planning stages of the survey (e. g. in accounting for exclusive zones) and during the actual process. Also, these geoportals can be helpful in making recommendations for drilling new wells in promising zones identified at the cameral processing and interpretation stage of geological exploration.

The timely updating of electronic topographic maps by the responsible agencies is also an important issue. The "why do we need maps when we have OpenStreetMap" approach, if it helps in other branches of science, is unacceptable in geological exploration. Especially in most cases

where surveys are conducted for example in low-populated areas of the Russian Far North and taiga, Colombian densely forested jungles or in deserts, forests and highlands of India.

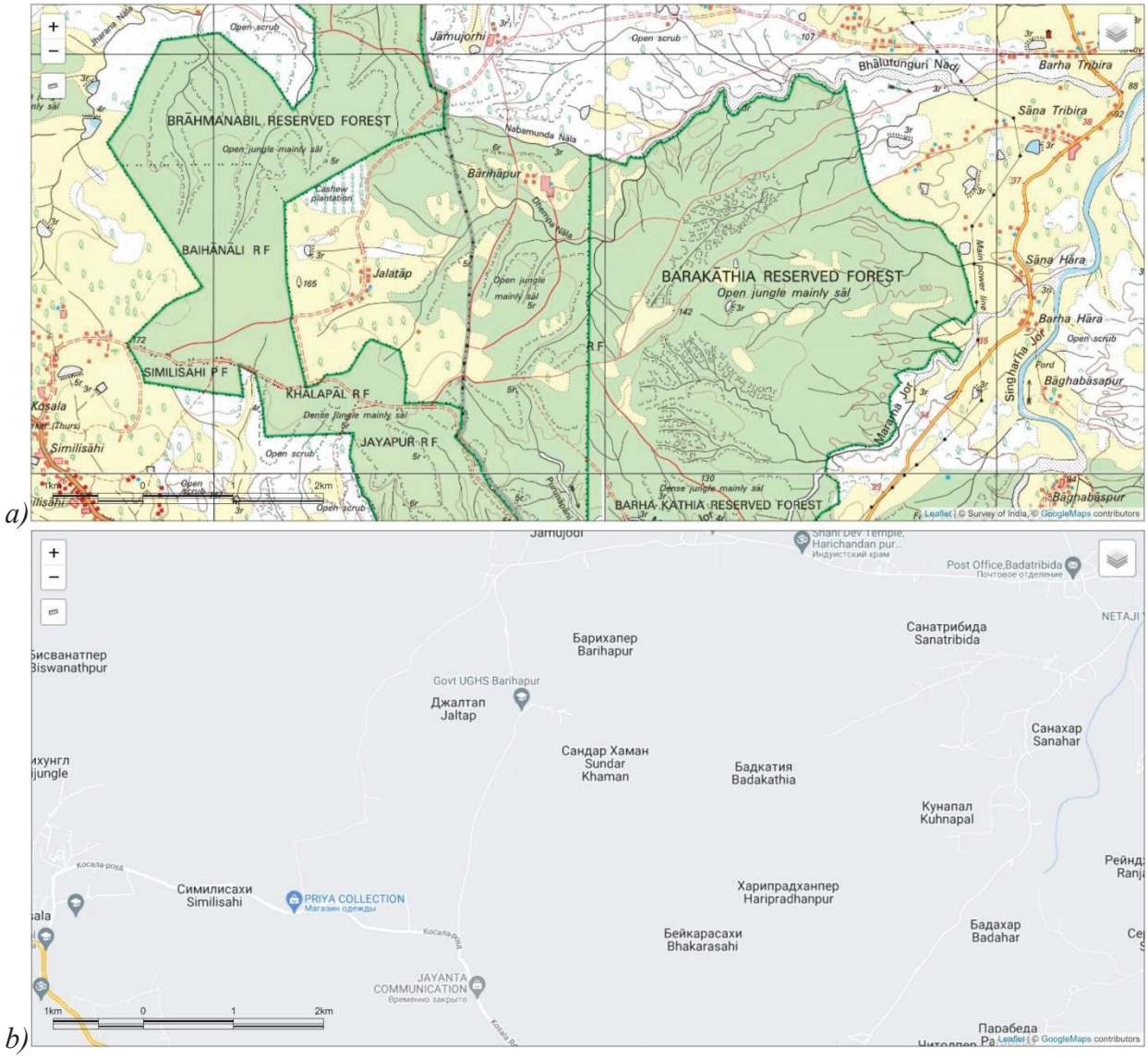


Fig. 8. Density of topographical objects for study area (Odisha state, India): a) on the 1: 50 000 scale Open Series Map; b) on the Google Maps base map

CONCLUSION

A large part of today's mineral, oil and gas industry is directly linked to the use of accurate spatial information. Topographic maps and other geospatial data are actively used for tasks of different scales, spatial coverage and areas of activity.

The examples of topographic maps preparation and use discussed in the article allow evaluating the variety of forms of modern topographic data representation: from paper and electronic maps, to GIS-projects and web applications. Modern methods of access allow topographic data to be involved in the work of public companies, service organizations, and research institutes. This allows cartographic support of such tasks as creation of geoinformation databases, own web services, digital twins of objects and enterprises of the oil and gas industry, etc.

The reviewed experience of cartographic support of various stages of geological exploration shows that a balanced and critical approach to the use of global topographic data resources in such a strategic activity as exploration is required. The industry needs public multiscale topographic maps as well as theoretical and methodological foundations for the use of web mapping advances in mineral prospecting and exploration.

REFERENCES

Al-Bakri M., Fairbairn D., Hameed M. Comparing opensource map data in areas lacking authoritative mapping. Proc. GIS Research UK 24th Annual Conference, GISRUK, 2016. 5 p.

Albert G. The changing use-cases of medium and large-scale geological maps in Hungary. Proceedings of the International Cartographic Association, 2019. No. 2. 8 p. DOI: 10.5194/ica-proc-2-4-2019.

Alekseenko N.A., Koshkarev A.V., Kuramagomedov B.M., Medvedev A.A. Geoportals of Russian nature's protected areas. Geodesy and Cartography, 2019. No. 5. P. 34–46 (in Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2019-947-5-34-46.

Babashkin N.M., Kadnichanskiy S.A., Nekhin S.S., Yablonskiy L.I. The main trends in the national mapping development in the Russian Federation. InterExpo Geo-Sibir', 2016. No. n/a. P. 3–8 (in Russian).

Cordsen A., Galbraith M., Peirce J.W. Planning Land 3-D Seismic Surveys. SEG, 2011. 217 p. DOI: 10.1190/1.9781560801801.

Davis M., Kent A.J. Soviet City Plans and OpenStreetMap: a comparative analysis. International Journal of Cartography, 2022. P. 1–14. DOI: 10.1080/23729333.2022.2047396.

Dubrovsky A.V., Malygina O.I. Topographic monitoring on oil-and-gas fields. 2nd International workshop on "Integration of Point- and Area-wise Geodetic Monitoring for Structures and Natural Objects". Stuttgart, Germany, March 23−24, 2015. P. 38–43.

Eremin N.A., Eremin A.N. Digital twin in oil and gas production. Oil. Gas. Innovations, 2018. V. 217. No. 12. P. 14–17 (in Russian).

Gura D.A., Shevchenko G.G., Polennikov Y.P., Amarina E.D. Land surveying and navigational support of exploration work. Sciences of Europe, 2017. V. 1. No. 12. P. 78–87 (in Russian).

Karimova A.A. Up-to-date approaches towards the technology of creation and updating state and topographic maps and plans. Geodesy and Cartography, 2018. V. 79. No. 5. P. 27–36 (in Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2018-935-5-27-36.

Krylov S.A., Mosolov D.A. Organization of spatial databases for multi-scale web mapping. 8th International Conference on Cartography and GIS, Nessebar, Bulgaria, 20–25 June, 2022. P. 143–147.

Loginov D.S. Integrated analysis of geodata to determine the prospects oil and gas bearing capacity: a case of study Bhima sedimentary basin, Republic of India. Vestnik SSUGT, 2022. V. 27. No. 5. P. 110–123 (in Russian). DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-5-110-123.

Loginov D.S. Web technologies in cartographic support of geological exploration. 30th International Cartographic Conference, Florence, Italy, 14–18 December, 2021. 6 p. DOI: 10.5194/ica-proc-4-68-2021.

Nokelaynen T.S. Mapping of seasonal road transport accessibility in the Arctic region of Russia InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2021. V. 27. Part 2. P. 102–113 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-102-113.

Pal M., Albert G. Inspecting map compilation in earth sciences for better communication. Hungarian Geographical Bulletin, 2021. V. 70. No. 3. P. 267–280. DOI: 10.15201/hungeobull.70.3.5.

Rylskiy I.A., Nokelaynen T.S., Kotova T.V., Panin A.N. Calculation of vegetation passability categories for vehicles based on laser scanning data. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2022. V. 28. Part 1. P. 314–324 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-314-324.

Tararin A.M. Concept and implementation of basic spatial data sets in the national spatial data system of the Russian Federation. Vestnik of the SSUGT, 2022. V. 27. No. 2. P. 44–58 (in Russian). DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-2-44-58.

УДК: 528.06

DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-535-545

М.Д. Махмудов[1], **Д.Ш. Фазилова**[2,3,4]

ПОСТРОЕНИЕ РЕГУЛЯРНОГО ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ТАШКЕНТСКОГО РЕГИОНА НА ОСНОВЕ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ДАННЫХ ГНСС ПУНКТОВ

АННОТАЦИЯ

В Республике Узбекистан активно развивается сеть станций Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), которая является неотъемлемой частью национальной инфраструктуры пространственных данных страны. Особое внимание в республике в последнее время уделяется вопросам практического использования результатов измерения ГНСС и геоинформационного обеспечения безопасности в зонах с повышенной сейсмической опасностью, особенно рядом с объектами техногенной нагрузки. В работе рассмотрена территория Ташкентского региона — одного из наиболее сейсмически активных регионов республики. ГНСС измерения зачастую разрежены и распределены неравномерно, а для уточнения «блочной» или «непрерывной» тектонических моделей и выявления закономерностей современных движений данной области необходима пространственная модель скоростей, которая может быть получена на основе интерполяции дискретных точек на оставшуюся не охваченную измерениями территорию. В работе были использованы измерения на 14 ГНСС пунктах за период с 2018 по 2020 гг. Скорости пунктов, или т. н. модель скоростей, полученная в программе GAMIT/GLOBK, позволила выполнить оценку горизонтальных скоростей пунктов, диапазон которых варьирует от 21 мм/г до 33 мм/г. Относительно «стабильной» Евразийской тектонической плиты были вычислены также значения локальных смещений области, которые могут быть как следствием движения микроблоков, так и влиянием техногенных факторов (горнодобывающие работы в районе пунктов Ангрен и Алмалык). Для получения непрерывного поля распределения горизонтальных скоростей региона был использован метод связанной интерполяции двумерных векторов поля скоростей, реализованный в программе GMT (Generic Mapping Tools). Получено, что согласно геологическим данным области метод интерполяции позволяет достаточно точно определить основные тенденции движений земной коры региона. Выявлено вращательное движение вдоль Каржантаусской, Кумбельской и Чаткальской тектонических плит. Значения горизонтальных смещений точек достигли минимального значения 3 мм в равнинной части, а максимальные величины до 10 мм отмечались в горных областях региона. Средняя скорость станций региона составила 4 мм/г.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сеть ГНСС, поле скоростей, GMT, интерполяция векторных данных

1 Ташкентский университет информационных технологий, пр-т. Амира Темура, д. 108, Ташкент, Республика Узбекистан, 100084, *e-mail:* **makhmudov0907@gmail.com**

2 Национальный университет Республики Узбекистан им. Мирзо Улугбека, ул. Университетская, д. 4, Ташкент, Республика Узбекистан, 1000174, *e-mail:* **dil_faz@yahoo.com**

3 Астрономический институт имени Улугбека Академии наук Республики Узбекистан, ул. Астрономическая, д. 33, Ташкент, Республика Узбекистан, 100052.

4 Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, ул. Университетская, д. 2, Ташкент, Республика Узбекистан, 100095.

Mirshodjon D. Makhmudov[1], **Dilbarkhon Sh. Fazilova**[2,3,4]

CONSTRUCTION THE VELOCITY FIELD IN A REGULAR GRID IN THE TASHKENT REGION ON THE BASIS INTERPOLATION OF GNSS PERMANENT STATIONS DATA

ABSTRACT

The Republic of Uzbekistan is actively developing a network of stations of the Global Navigation Satellite System (GNSS), which is an integral part of the country's national spatial data infrastructure. Particular attention in the republic has recently been paid to the practical use of the results of GNSS measurements and geoinformation security in areas with increased seismic hazard, especially near man-caused objects. The paper considers the territory of the Tashkent region — one of the most seismically active regions of the republic. GNSS measurements are often sparse and unevenly distributed, and to refine the "block" or "continuous" tectonic models and identify patterns of modern movements in this area, a spatial velocity model is needed, which can be obtained by interpolating discrete points to the remaining area not covered by measurements. The work used measurements at 14 GNSS points for the period from 2018 to 2020. Point velocities or the so-called velocity model obtained in the GAMIT/GLOBK program made it possible to estimate horizontal point velocities, the range of which varies from 21 mm/yr to 33 mm/yr. With respect to the "stable" Eurasian tectonic plate, the values of local displacements of the area were also calculated, which can be both a consequence of the movement of microblocks and the influence of technogenic factors (mining in the area of the Angren and Almalyk points). To obtain a continuous distribution field of the horizontal velocities of the region, the method of coupled interpolation of two-dimensional vectors of the velocity field was used, implemented in the GMT (Generic Mapping Tools) program. It was found that according to the geological data of the region, the interpolation method quite accurately allows to determine the main trends in the movements of the earth's crust in the region. A rotational movement along the Karzhantau, Kumbel and Chatkal tectonic plates has been revealed. The values of horizontal displacements of points reached a minimum value of 3 mm in the plain part, and maximum values of up to 10 mm were noted in the mountainous areas of the region. The average velocity of stations in the region was 4 mm/year.

KEYWORDS: GNSS network, velocity field, GMT, interpolation of vector data

ВВЕДЕНИЕ

Территория Узбекистана расположена в области перехода от горных массивов Тянь-Шаня к Туранской платформе, в зоне взаимодействия нескольких крупных литосферных плит — Европейской, Азиатской, Иранской, Индийской и Китайской и имеет уникальную пространственную картину распределения землетрясений в регионе [*Артиков* и др., 2018]. Особое внимание в республике в последнее время уделяется вопросам геоинформационного обеспечения безопасности в зонах с повышенной сейсмической опасностью, особенно рядом с объектами техногенной нагрузки. Актуальной задачей является

1 Tashkent information technology university, 108, Amira Temura ave., Tashkent, 100084, Republic of Uzbekistan, *e-mail:* **makhmudov0907@gmail.com**

2 National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, 4, Universitetskaya str., Tashkent, 1000174, Republic of Uzbekistan, *e-mail:* **dil_faz@yahoo.com**

3 Ulugh Beg Astronomical Institute of Uzbek Academy of Sciences, 33, Astronomicheskaya str., Tashkent, 100052, Republic of Uzbekistan.

4 Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, 2, Universitetskaya str., Tashkent, 100095, Republic of Uzbekistan.

«проведение картографического мониторинга с использованием данных и материалов аэрокосмической съемки, топографических, геодезических и картографических изысканий и исследований, а также дистанционного зондирования земли и геодинамических исследований»[1]. Одной из таких наиболее сейсмически активных территорий республики является Ташкентский регион [*Giardini* et al., 2003]. Характерными объектами данной территории являются Ташкентский геодинамический полигон, расположенный рядом с водохранилищем Чарвак. Ангрено-Алмалыкский горнорудный район — один из самых известных и развитых промышленных регионов страны. Для него характерна высокая концентрация предприятий угледобывающей и горнодобывающей промышленности, строительной индустрии и электроэнергетики, объектов промышленного и гражданского строительства, ирригационных систем (Ангренский угольный разрез, Джигиристанский карьер, Наугарзанский и Апартакский угольные карьеры). Всего в 50 км к юго-востоку от столицы Ташкента находится Алмалыкский горно-металлургический комбинат, который является базой производства цветных металлов. Территория относится к зоне максимальной отрицательной дилатации (сжатия), которая также усиливается за счет повышенной обводненности территории [*Rebetsky* et al., 2020*; Fazilova, Sichugova,* 2021].

Наблюдения с помощью сети пунктов Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), высокая точность и разрешение которых позволяют определять самые малые изменения в геоцентрических координатах наземных пунктов на коротких интервалах времени, являются основой для развития национальной инфраструктуры пространственных данных Республики Узбекистан[2]. В стране создана геодезическая сеть ГНСС, измерения которой используются для решения таких задач, как построение национальной системы координат, исследования деформаций земной коры и определения геоида [*Фазилова и Магдиев,* 2021*; Fazilova,* 2022]. Измерения на более чем 50 постояннодействующих пунктах в республике становятся также базой для наблюдений в области геонаук, в частности построения пространственной модели скоростей Евразийской плиты в регионе и получения информации о геодинамических деструктивных явлениях в кратчайшие сроки в режиме реального времени [*Hofmann-Wellenhof, Moritz,* 2006]. Отдельные исследования были ранее выполнены для определения поля скоростей в регионе [*Уломов,* 2004*; Хамидов,* 2016; *Abdrakhmatov* et al., 1996*; Zubovich* et al., 2010]. Но для уточнения «блочной» или «непрерывной» тектонических моделей необходимо иметь более плотную сеть измерений. В этом случае интерполяция дискретных точек на оставшуюся территорию, не охваченную измерениями, для получения непрерывной скоростной модели является важной задачей. В данной работе рассмотрен метод связанной интерполяции двумерных векторов поля скоростей постоянных пунктов Ташкентского региона за период 2018 по 2020 гг.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа в работе были выбраны измерения спутниковой государственной сети (СГС) на 14 пунктах ГНСС, выполненные с 2018 по 2020 гг. (рис. 1). Всего за данный период были выполнены 6 измерительных кампаний. Продолжительность каждого варьируется от одного до четырех месяцев (табл. 1). Программный комплекс GAMIT/GLOBK версии 10.71 использован для вычисления координат пунктов [*Herring* et al., 2018]. Вычисление координат и скоростей пунктов выполнялось в три этапа согласно [*Dong* et al., 1998] с

[1] О мерах по кардинальному совершенствованию системы ведения учета земли и государственных кадастров. Указ Президента Республики Узбекистан. № УП-6061. 7.09.2020 г. Электронный ресурс: https://lex.uz/docs/-4985026 (дата обращения 02.02.2023).

[2] О пространственных данных. Закон Республики Узбекистан. № ЗРУ-702. 23.07.2021 г. Электронный ресурс: https://lex.uz/ru/docs/5522838 (дата обращения 02.02.2023).

использованием моделей и стандартов международной службы вращения Земли IERS2010 [*IERS*, 2010]. Результаты приведены на эпоху опорной системы координат ITRF2014 [*Altamimi* et al., 2016]. Ошибка повторяемости горизонтальных координат составила 1.0–3.2 мм и 3.2–6.5 мм для высоты. Средняя ошибка горизонтальной скорости составляет около 0.2~0.6 мм/г.

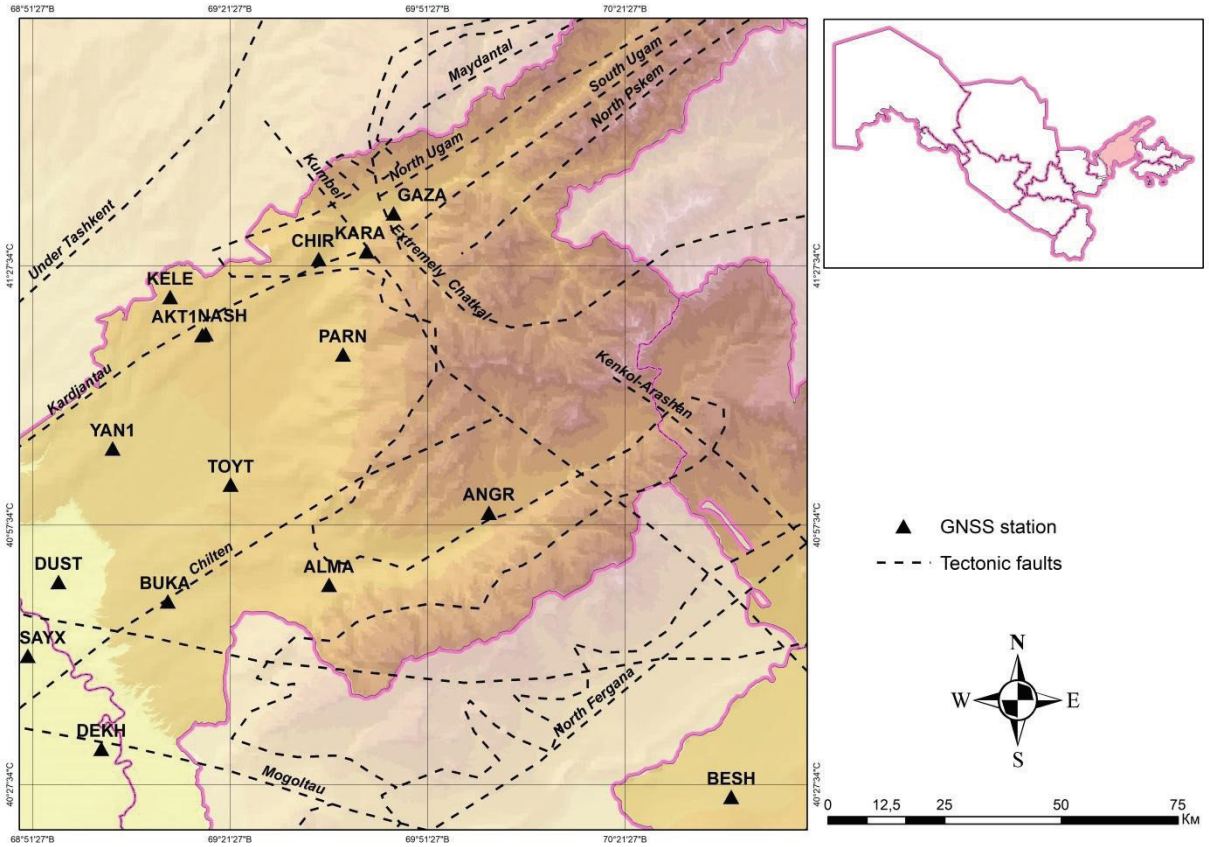


Рис. 1. Сеть ГНСС Ташкентского региона
Fig. 1. GNSS network in the territory of the Tashkent region

Табл. 1. Периоды (дни месяцев) наблюдений, использованные для анализа
Table 1. Periods (days of months) of observations used for analysis

	январь	**февраль**	**март**	**апрель**	**июль**	**август**	**сентябрь**	**октябрь**
2018	–	–	–	–	–	–	–	1–26
2019	10–31	1–28	1–31	1–30	–	–	29–30	1–26
2020	1–31	–	–	1–30	1–31	1–31	1–30	1–31

Скорости пунктов или т. наз. модель скоростей, полученная в программе GAMIT/GLOBK, позволяет описать движение Евразийской плиты в районе исследования. Путем «фиксирования Евразийской плиты» в программе можно вычислить смещения, определяющие характеристики движения локальных разломов области или действие техногенных нагрузок. Но для получения более информационной модели кинематики региона необходимо построить непрерывную скоростную модель путем интерполяции полученных дискретных значений на всю оставшуюся область. Различные авторы

использовали такие методы интерполяции как метод наименьших квадратов, использующий ковариационную функцию [*Kahle* et al., 2000], метод ближайшего соседа, метод взвешенных обратных расстояний [*Allmendinger* et al., 2007], метод минимальной кривизны [*Smith, Wessel,* 1990], кригинг [*Bogusz* et al., 2014] и др. Однако эти методы интерполяции требуют много времени, а сам процесс относительно сложен. Универсальный картографический инструмент GMT (Generic Mapping Tools) — одна из наиболее широко используемых бесплатных картографических программ с открытым исходным кодом в науках о Земле с мощными функциями картирования и обработки данных. Для обработки данных в GMT реализованы функции скрининга данных, повторной выборки, фильтрации временных рядов, фильтрации двумерной сетки, интерполяции трехмерной сетки, полиномиальной аппроксимации, регрессионный анализ и т. д. Кроме того, GMT можно использовать для быстрой и удобной интерполяции и расчета скорости деформации [*Wessel* et al., 2019]. В данной работе был использован метод связанной интерполяции двумерных векторов поля скоростей, использующий функцию Грина и реализованный в GMT с помощью алгоритма *gpsgridd*er [*Sandwell, Wessel,* 2016]. Интерполяция двумерных векторных данных с использованием ограничений упругости — это метод, позволяющий создавать гладкое представление разреженных векторных данных. Метод основан на физических принципах упругости, где деформация материала определяется действующими на него силами. Он заключается в построении матрицы уравнений, которая связывает наблюдаемые точки данных с неизвестными точками данных с ограничениями уравнения упругости. Затем матрица решается с использованием линейного или нелинейного оптимизационного алгоритма для поиска наилучшей оценки пропущенных точек данных, которая удовлетворяет ограничениям. Ограничения упругости, используемые в этом методе, обычно выводятся из уравнений Навье-Стокса, которые описывают движение жидкости и действующие на нее силы. Эти уравнения используются для расчета тензора деформации, который описывает деформацию жидкости в каждой точке сетки. Тензор деформации затем используется для расчета действующих на жидкость напряжений, которые уравновешиваются действующими на нее силами. Ограничения упругости используются для интерполяции векторных данных на регулярной сетке. Это делается путем подгонки гладкой функции к данным, которая удовлетворяет ограничениям. Затем гладкая функция применяется для оценки пропущенных точек данных. Метод использует двумерную упругую модель для обеспечения связи между двумя компонентами горизонтальной скорости ГНСС пунктов: широтным (N) и долготным (E). Предполагается, что в каждой точке действует векторная сила. Эти силы приводят к деформации упругого тела, в результате которого возникает поле векторной деформации. Для любой точки области вычисляется вектор скорости, а величина и направление действующей силы корректируются до тех пор, пока они не будут равны заданному значению вектора скорости. Связная интерполяция реализует реакцию эластичного тела в двумерном пространстве на действующую деформацию на основе анализа функции Грина. Различные состояния эластичности (от упругости до полного сжатия) регулируются с помощью коэффициента Пуассона. Размер сетки выбирается таким образом, чтобы в каждой ячейке был хотя бы один пункт наблюдения [*Hackl* et al., 2009]. Расстояние между пунктами — 30–50 км, поэтому была выбрана сетка с размером ячейки 1° для интерполяции компонентов поля скоростей. Коэффициент Пуассона был принят 0.5, соответствующий типичной эластичности [*Bian* et al., 2020].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунках представлено распределение скоростей региона как относительно Евразийской плиты (рис. 2), так и локальные смещения, полученные путем «стабилизации

плиты» (рис. 3). В пределах изучаемой территории все пункты указывают на значительные горизонтальные перемещения с доверительной вероятностью 95 %. По северо-восточному направлению, соответствующему движению Евразии, тектонические смещения находятся в диапазоне от 21 мм/г до 33 мм/г (рис. 2). Локальные подвижки, очевидно, имеют зональные характеристики, обусловленные тектоническими разломами области, и достигают значений от 1.82 мм/г до 6.04 мм. Средняя скорость станций региона составляет примерно 4 мм/г для рассмотренного в работе периода с 2018 по 2020 гг. (рис. 3). Результаты метода связанной интерполяции для построения модели горизонтальных скоростей региона представлены на рис. 4. Согласно геологическим данным территория Ташкентского региона относится к орогенической области, подвижной и активной в тектоническом отношении. Серия северо-восточных разломов палеозойского основания г. Ташкента (Ташкентский, Каракамышский, Чирчикский и др.) составляет основную часть Каржантаусского разлома. Последний со своей флексурно-разрывной зоной располагается на границе участков различного движения поднятий и Ташкентско-голодностепского прогиба, посередине которой пролегает р. Чирчик (рис. 1). Анализ пространственного распределения измеренного поля скоростей горизонтального движения земной коры в Ташкентском регионе, несмотря на разреженную плотность пунктов, выявил тенденции неравномерного распределения скорости, которая подтверждается геологическим строением области. В зоне пересечения тектонических плит Каржантауской, Кумбельской и Чаткальской видна тенденция к вращательному движению. Установлено, что диапазон значений горизонтальных смещений точек колеблется от 3 мм в равнинной части до 10 мм в горной части района.

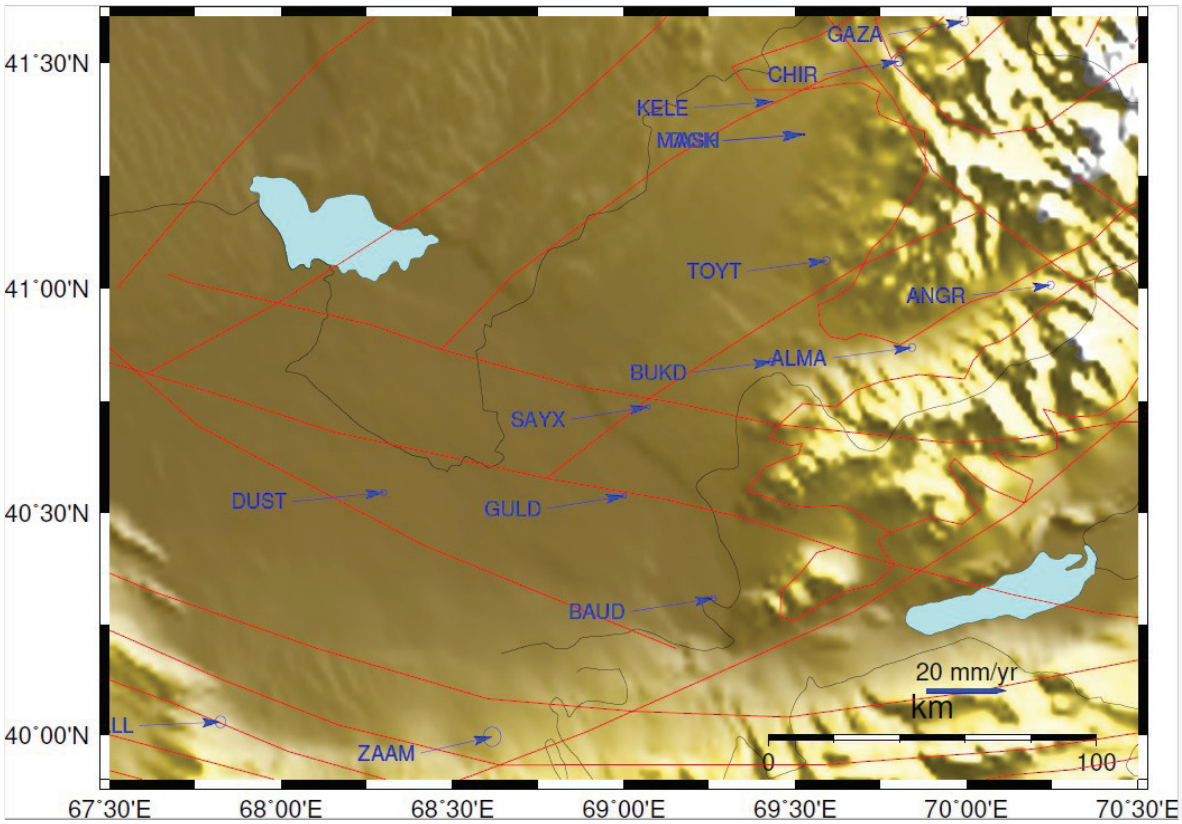


Рис. 2. Горизонтальное поле скоростей региона относительно Евразийской плиты
Fig. 2. Horizontal velocity field of the region relative to the Eurasian plate

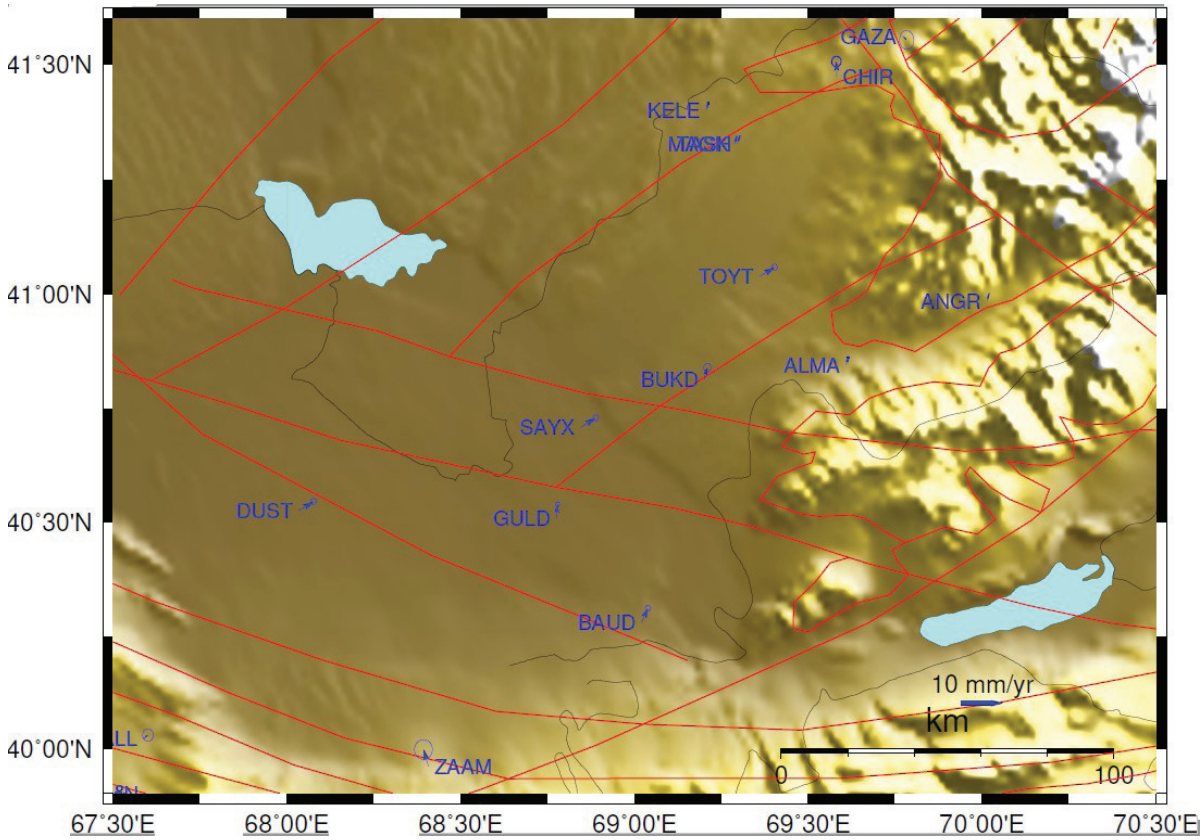


Рис. 3. Горизонтальное поле локальных смещений при «фиксированной Евразии»
Fig. 3. Horizontal velocity field of the local displacements with "fixed Eurasia"

Оценка измеренных и интерполированных числовых значений скоростей подтверждает, что значение скоростей на востоке области больше, чем в западной части. Общая тенденция направления вращательного движения исследуемой области определяется поворотом по часовой стрелке с запада на восток. Поле скоростей на западе увеличивается с юга на север. В восточном же поле скоростей численные значения принимают максимальные значения до 10 мм/г. С другой стороны, с точки зрения анализа направления движения, на востоке наблюдается постоянное движение с юга на северо-восток, а на западе движение чередуется с вращательными блоками.

ВЫВОДЫ

В данной работе выполнено исследование пространственного поля скоростей пунктов ГНСС Ташкентского региона по наблюдениям с 2018 по 2020 г. Скорости пунктов или так называемая модель скоростей, полученная в программе GAMIT/GLOBK, позволила выполнить оценку горизонтальных скоростей 14 пунктов, расположенных в данной области, диапазон которых варьирует от 21 мм/г до 33 мм/г. Относительно «стабильной» Евразийской тектонической плиты были вычислены значения локальных смещений области, которые могут быть как следствием движения микроблоков, так и влиянием техногенных факторов (горнодобывающие работы в районе пунктов Ангрен и Алмалык). Для получения непрерывного поля распределения горизонтальных скоростей региона был использован метод связанной интерполяции двумерных векторов поля скоростей, базированный на функции Грина и реализованный в картографической программе GMT. При этом отмечается общая тенденция неравномерного распределения скорости. Были выявлены вращательные движения вдоль Каржантауской, Кумбельской и Чаткальской

тектонических плит. Направление движения при этом имеет тенденцию по часовой стрелке с запада на восток. Установлено, что диапазон значений горизонтальных смещений точек при этом достиг минимального значения 3 мм в равнинной части, а максимальные величины до 10 мм отмечались в горных областях региона. Средняя скорость станций региона составляет примерно 4 мм/г. Методы и результаты данного исследования могут быть использованы как для оценки техногенных факторов, оказывающих влияние на смещения земной поверхности при горнодобывающих работах региона и являющихся следствием высокой наведенной сейсмичности области, так и для реализации динамического опорного датума новой национальной геоцентрической системы координат республики.

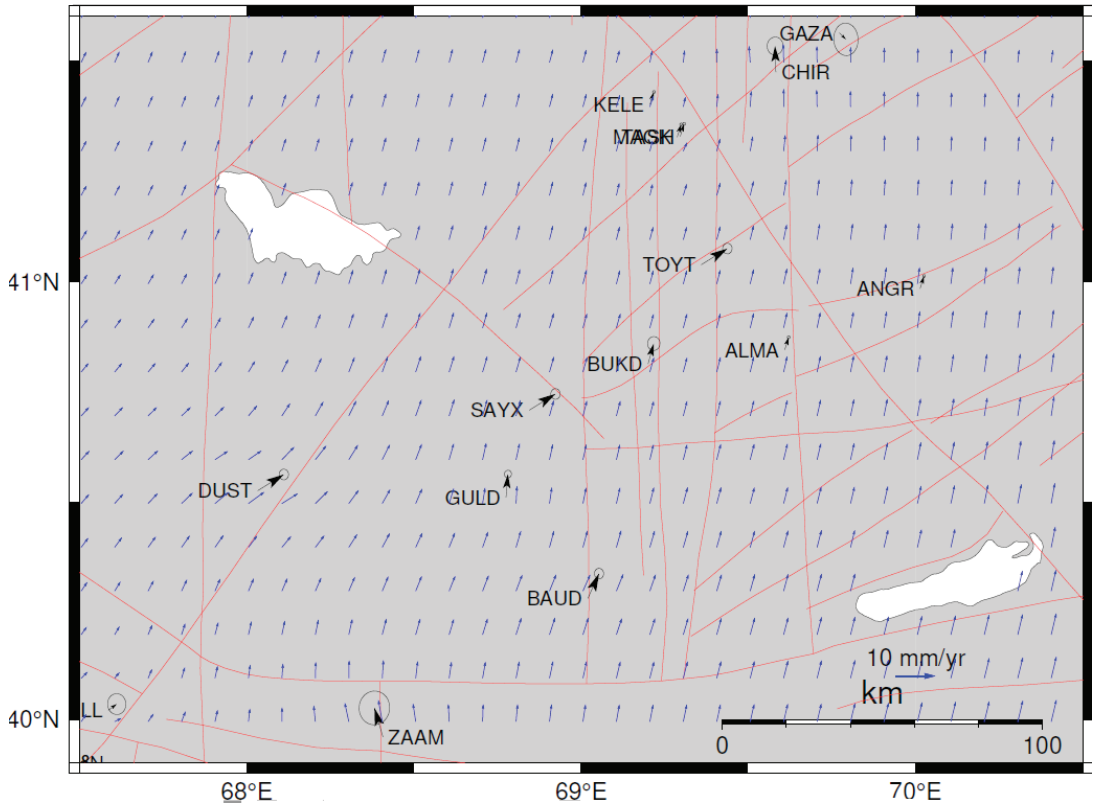


Рис. 4. Пространственное распределение поля горизонтальных скоростей региона (черные стрелки представляют исходное поле скоростей, синие — результаты интерполяции)
Fig. 4. Spatial distribution of the field of horizontal velocities of the region (black arrows represent the original velocity field, blue — results of the interpolation)

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного бюджетного финансирования Академии наук Республики Узбекистан. Авторы благодарят рецензентов за их многочисленные конструктивные комментарии и предложения.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the State Budget Foundation of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan. We would also like to thank reviewers for their many constructive comments and suggestions.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Кучкаров К.И., Мирзаев М.А. Количественные характеристики сейсмической опасности территории Узбекистана в максимальных значениях скоростей колебаний грунта и в их спектральных амплитудах. Геодинамика и тектонофизика, 2018. Т. 9. № 4. С. 1173–1188. DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0389.

Уломов В.И. О роли горизонтальных тектонических движений в сейсмогеодинамике и прогнозе сейсмической опасности. Физика Земли, 2004. № 9. С. 14–30.

Фазилова Д.Ш., Магдиев Х.Н. Создание и обновление высотной основы топографических карт в национальной пространственной системе координат: на примере Ферганской долины ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 2. С. 155–164. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-155-164.

Хамидов Х.Л. Сейсмодислокации на поверхности земли в результате сильных землетрясений на западном Тянь-Шане. Геодинамика, 2016. № 1 (20). С. 119–132.

Abdrakhmatov K., Aldazhanov S.A., Hager B.H., Hamburger M.W., Herring T., Kalabaev K.B., Makarov V.I., Molnar P.H., Panasyuk S.V., Prilepin M.T., Reilinger R., Sadybakasov I.S., Souter B.J., Trapeznikov Y.A., Tsurkov V., Zubovich A. Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates. Nature, 1996. V. 384. P. 450–453. DOI: 10.1038/384450A0.

Allmendinger R. Reilinger R., Loveless J. Strain and rotation rate from GPS in Tibet, Anatolia, and the Altiplano. Tectonics, 2007. V. 26. Iss. 3. TC3013. DOI: 10.1029/2006TC002030.

Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016. V. 121. No. 8. P. 6109–31. DOI: 10.1002/2016jb013098.

Bian W., Wu J., Wu W. Recent crustal deformation based on interpolation of GNSS velocity in continental China. Remote Sensing, 2020. V. 12. P. 3753. DOI: 10.3390/rs12223753.

Bogusz J., Kłos A., Grzempowski P., Kontny B. Modelling the velocity field in a regular grid in the area of Poland on the basis of the velocities of European permanent stations. Pure Appl. Geophys., 2014. 171. P. 809–833. DOI: 10.1007/s00024-013-0645-2.

Dong D., Herring T.A., King R.W. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data. J. Geod, 1998. V. 72. P. 200–214. DOI: 10.1007/s001900050161.

Fazilova D. Uzbekistan coordinate system transformation from CS42 to WGS84 using deformation grid model. Geodesy and Geodynamics, 2022. V. 13. Iss. 1. P. 24–30. DOI: 10.1016/j.geog.2021.10.001.

Fazilova D., Sichugova L. Deformation analysis based on GNSS measurements in Tashkent region. E3S Web Conf. 227 04002, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202122704002.

Giardini D., Grünthal G., Shedlock K.M., Zhang P. The GSHAP Global Seismic Hazard Map. International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology. International Geophysics Series 81 B. Amsterdam: Academic Press, 2003. P. 1223–1239.

Hackl M., Malservisi R., Wdowinski S. Strain rate patterns from dense GPS networks. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2009. No. 9. P. 1177–1187. DOI: 10.5194/nhess-9-1177-2009.

Herring T.A., King R.W., Floyd M., McClusky S.C. Introduction to GAMIT/GLOBK. Release 10.7. Technical report. Massachusetts Institute of Technology, 2018. Web resource: http://geoweb.mit.edu/gg/Intro_GG.pdf (accessed 10.09.2022).

Hofmann-Wellenhof B., Moritz H. Physical Geodesy. 2nd edition. Wien: Springer, 2006. 403 p. DOI: 10.1007/978-3-211-33545-1.

IERS Conventions (2010). IERS Technical Note 36. Gérard Petit and Brian Luzum (eds.). Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.

Kahle H.G., Cocard M., Peter Y., Geiger A., Reilinger R., Barka A., Veis G. GPS-derived strain rate field within the boundary zones of the Eurasian, African, and Arabian Plates. Journal of Geophysical Research, 2000. 105(B10): 23. P. 23353–23370. DOI: 10.1029/2000JB900238.

Rebetsky Yu.L., Ibragimova T.L., Ibragimov R.S., Mirzaev M.A. Stress state of Uzbekistan's seismoactive areas. Seismic Instruments, 2020, V. 56, No. 6, P. 679–700. DOI: 10.3103/S0747923920060079.

Sandwell D.T., Wessel P. Interpolation of 2-D vector data using constraints from elasticity. Geophys. Research Letters, 2016. No. 43. P. 10703–10709. DOI: 10.1002/2016GL070340.

Smith W.H.F., Wessel P. Gridding with continuous curvature splines intension. Geophysics, 1990. No. 55 (3). P. 293–305. DOI: 10.1190/1.1442837.

Wessel P., Luis J.F., Uieda L., Scharroo R., Wobbe F., Smith W.H.F., Tian D. The Generic Mapping Tools version 6. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2019. V. 20. P. 5556–5564. DOI: 10.1029/2019GC008515.

Zubovich A.V., Wang X.Q., Scherba Y.G., Schelochkov G.G., Reilinger R., Reigber C., Mosienko O.I., Molnar P., Michajljow W., Makarov V.I., Li J., Kuzikov S.I., Herring T.A., Hamburger M.W., Hager B.H., Dang Y., Bragin V.D., Beisenbaev R. GPS velocity field for the Tienshan and surrounding regions. Tectonics, 2010. V. 29. TC6014. P. 23. DOI: 10.1029/2010TC002772.

REFERENCES

Abdrakhmatov K., Aldazhanov S.A., Hager B.H., Hamburger M.W., Herring T., Kalabaev K.B., Makarov V.I., Molnar P.H., Panasyuk S.V., Prilepin M.T., Reilinger R., Sadybakasov I.S., Souter B.J., Trapeznikov Y.A., Tsurkov V., Zubovich A. Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates. Nature, 1996. V. 384. P. 450–453. DOI: 10.1038/384450A0.

Allmendinger R. Reilinger R., Loveless J. Strain and rotation rate from GPS in Tibet, Anatolia, and the Altiplano. Tectonics, 2007. V. 26. Iss. 3. TC3013. DOI: 10.1029/2006TC002030.

Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016. V. 121. No. 8. P. 6109–31. DOI: 10.1002/2016jb013098.

Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Kuchkarov K.I., Mirzaev M.A. Quantitative assessment of seismic hazard for the territory of Uzbekistan according to the estimated maximum ground oscillation rates and their spectral amplitudes. Geodynamics & Tectonophysics, 2018. V. 9. No. 4. P. 1173–1188 (in Russian). DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0389.

Bian W., Wu J., Wu W. Recent crustal deformation based on interpolation of GNSS velocity in continental China. Remote Sensing, 2020. V. 12. P. 3753. DOI: 10.3390/rs12223753.

Bogusz J., Kłos A., Grzempowski P., Kontny B. Modelling the velocity field in a regular grid in the area of Poland on the basis of the velocities of European permanent stations. Pure Appl. Geophys., 2014. 171. P. 809–833. DOI: 10.1007/s00024-013-0645-2.

Dong D., Herring T. A., King R. W. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data. J. Geod, 1998. V. 72. P. 200–214. DOI: 10.1007/s001900050161.

Fazilova D. Uzbekistan coordinate system transformation from CS42 to WGS84 using deformation grid model. Geodesy and Geodynamics, 2022. V. 13. Iss. 1. P. 24–30. DOI: 10.1016/j.geog.2021.10.001.

Fazilova D.Sh., Magdiev Kh.N. Creating and updating of topographic maps height base in the new national spatial coordinate system: case Fergana valley. InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2021. V. 27. Part 2. P. 155–164 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-155-164.

Fazilova D., Sichugova L. Deformation analysis based on GNSS measurements in Tashkent region. E3S Web Conf. 227 04002, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202122704002.

Giardini D., Grünthal G., Shedlock K.M., Zhang P. The GSHAP Global Seismic Hazard Map. International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology. International Geophysics Series 81 B. Amsterdam: Academic Press, 2003. P. 1223–1239.

Hackl M., Malservisi R., Wdowinski S. Strain rate patterns from dense GPS networks. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2009. No. 9. P. 1177–1187. DOI: 10.5194/nhess-9-1177-2009.

Herring T.A., King R.W., Floyd M., McClusky S.C. Introduction to GAMIT/GLOBK. Release 10.7. Technical report. Massachusetts Institute of Technology, 2018. Web resource: http://geoweb.mit.edu/gg/Intro_GG.pdf (accessed 10.09.2022).

Hofmann-Wellenhof B., Moritz H. Physical Geodesy. 2nd edition. Wien: Springer, 2006. 403 p. DOI: 10.1007/978-3-211-33545-1.

IERS Conventions (2010). IERS Technical Note 36. Gérard Petit and Brian Luzum (eds.). Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.

Kahle H.G., Cocard M., Peter Y., Geiger A., Reilinger R., Barka A., Veis G. GPS-derived strain rate field within the boundary zones of the Eurasian, African, and Arabian Plates. Journal of Geophysical Research, 2000. 105(B10): 23. P. 23353–23370. DOI: 10.1029/2000JB900238.

Khamidov H.L. The dislocations on the surface of the earth as a result of the strong earthquakes in the Western Tien Shan. Geodynamics, 2016. No. 1 (20). P. 119–132 (in Russian).

Rebetsky Yu.L., Ibragimova T.L., Ibragimov R.S., Mirzaev M.A. Stress state of Uzbekistan's seismoactive areas. Seismic Instruments, 2020, V. 56, No. 6, P. 679–700. DOI: 10.3103/S0747923920060079.

Sandwell D.T., Wessel P. Interpolation of 2-D vector data using constraints from elasticity. Geophys. Research Letters, 2016. No. 43. P. 10703–10709. DOI: 10.1002/2016GL070340.

Smith W.H.F., Wessel P. Gridding with continuous curvature splines intension. Geophysics, 1990. No. 55 (3). P. 293–305. DOI: 10.1190/1.1442837.

Ulomov V.I. On the role of horizontal tectonic movements in seismogeodynamics and seismic hazard prediction. Physics of the Earth, 2004. No. 9. P. 14–30 (in Russian).

Wessel P., Luis J.F., Uieda L., Scharroo R., Wobbe F., Smith W.H.F., Tian D. The Generic Mapping Tools version 6. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2019. V. 20. P. 5556–5564. DOI: 10.1029/2019GC008515.

Zubovich A.V., Wang X.Q., Scherba Y.G., Schelochkov G.G., Reilinger R., Reigber C., Mosienko O.I., Molnar P., Michajljow W., Makarov V.I., Li J., Kuzikov S.I., Herring T.A., Hamburger M.W., Hager B.H., Dang Y., Bragin V.D., Beisenbaev R. GPS velocity field for the Tienshan and surrounding regions. Tectonics, 2010. V. 29. TC6014. P. 23. DOI: 10.1029/2010TC002772.

УДК: 504.54.05+504.54.062+551.43 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-546-559**

О.П. Ермолаев[1], **Е.А. Шынбергенов**[2], **С.С. Мухарамова**[3]

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА «РЕЧНЫЕ БАССЕЙНЫ РОССИИ»

АННОТАЦИЯ

Создана электронная карта бассейновых геосистем малых рек почти на всю материковую часть России. Форма представления — векторный слой полигональных объектов; пространственная детальность соответствует региональному уровню генерализации (м-б 1: 1 000 000). Исследования проводились в три этапа:
1) Европейская часть России (за исключением Крыма и Калининградской области);
2) Арктический водосбор Азиатской части России;
3) Тихоокеанский водосбор (Дальневосточный федеральный округ).
Всего выделено свыше 388 000 объектов (бассейнов) со средней площадью около 47,8 км^2. Использованная методика построения карты бассейнов включает: выбор базовой ЦМР и карты гидросети; выбор геометрических параметров растровой сетки для представления исходных данных и результатов модельных расчетов; коррекцию ЦМР с использованием карты гидросети; построение границ водосборных бассейнов в автоматическом режиме; оценку точности выделения границ речных бассейнов для разных типов рельефа. Сформирована специализированная геоинформационная система «Бассейны малых рек России». В ГИС интегрирована геоинформация, представляющая природные (геоморфометрия рельефа, гидроклиматические параметры, водный и твердый сток рек, почвы, ландшафты) и антропогенные (типы землепользования, население, транспортная сеть и др.) характеристики бассейнов рек. В качестве примера решения геоэкологических и географических задач представлены расчеты интенсивности эрозии почв для бассейна р. Лены с использованием модифицированной модели смыва почв. Среднее значение эрозионных потерь почвы в бассейне р. Лены с учетом типов земного покрова составляет 0,22 т/га• г. Это свидетельствует в целом об очень низкой интенсивности эрозии, большая часть территории бассейна относится к неопасной категории смыва почв.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водосбор, бассейны малых рек, ЦМР, карты, ГИС

[1] Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт экологии и природопользования, ул. Кремлевская, д. 18, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420008,
e-mail: **oyermol@gmail.com**

[2] Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Инженерно-технологический институт, ул. Айтеке Би, д. 29А, Кызылорда, Республика Казахстан, 140012,
e-mail: **shynbergenov.erlan@mail.ru**

[3] Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт экологии и природопользования, ул. Кремлевская, д. 18, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420008,
e-mail: **smukhara@gmail.com**

Oleg P. Yermolaev[1], **Yerlan A. Shynbergenov**[2], **Svetlana S. Mukharamova**[3]

GEOINFORMATION SYSTEM "RIVER BASINS OF RUSSIA"

ABSTRACT

An electronic map of basin geosystems of small rivers has been created for almost the entire mainland of Russia. The form of representation is a vector layer of polygonal objects; spatial detail corresponds to the regional level of generalization (scale 1: 1 000 000). The research was performed in three stages: 1) The European Part of Russia (with the exception of the Crimea and the Kaliningrad region); 2) The Arctic watershed area of the Asian Part of Russia; 3) The Pacific watershed area (Far Eastern Federal District). In total, over 388 000 objects (basins) have been allocated with an average area of about 47.8 km^2. The method used for constructing the basin map includes: selection of the base DEM and the hydro grid map; selection of geometric parameters of the raster grid to represent the initial data and the results of model calculations; correction of the DEM using the hydro grid map; construction of watershed basin boundaries in automatic mode; assessment of the accuracy of the allocation of river basin boundaries for different types of terrain. A specialized geoinformation system "Basins of small rivers of Russia" has been formed. GIS integrates geoinformation representing natural (geomorphometry of the relief, the hydro-climatic parameters, sediment yield and river flow, soils, landscapes) and anthropogenic (land use types, population, transport network, etc.) characteristics of river basins. As an example of solving geoecological and geographical problems, calculations of the intensity of soil erosion for the Lena River basin using a modified model of soil loss are presented. The average value of soil erosion losses in the Lena River basin, taking into account the types of land cover, is 0.22 t/ha/year. This generally indicates a very low intensity of erosion, most of the basin area belongs to the non-hazardous category of soil loss.

KEYWORDS: watershed, small river basins, DEM, maps, GIS

ВВЕДЕНИЕ

Географический и геоэкологический анализ обширных территорий, располагающихся в гумидном климате Земли повсеместно расчлененных густой сетью рек, удобнее всего осуществлять на основе бассейнового подхода [*Корытный*, 2001; *Мальцев*, *Ермолаев*, 2014; *Осипов*, *Дмитриев*, 2017; *Vogt* et al., 2003; *Golosov* et al., 2021; *Shvarev* et al., 2022]. В настоящий момент на территорию России нет единой геопространственной базы данных или геоинформационной системы (ГИС), привязанной к бассейнам малых рек [*Shynbergenov*, *Sihanova*, 2017]. Создание такой ГИС сплошного покрытия и свободного доступа с возможностью накопления больших объемов пространственной информации о природных системах, а также использования современных информационных методов пространственного анализа позволяют сформировать научную базу для принятия управленческих решений в сфере природопользования и охраны окружающей среды [*Shynbergenov* et al., 2017; *Maltsev* et al., 2019].

Цель исследования — создание электронной карты бассейнов малых рек России для формирования специализированной геоинформационной системы «Бассейны малых рек

[1] Kazan Federal University, Institute of Environmental Sciences, 18, Kremlyovskaya str., Kazan, Republic of Tatarstan, 420008, Russia, *e-mail:* **oyermol@gmail.com**

[2] Korkyt Ata Kyzylorda University, Engineering and Technology Institute, 29A, Ayteke Bi str., Kyzylorda, 140012, Republic of Kazakhstan, *e-mail:* **shynbergenov.erlan@mail.ru**

[3] Kazan Federal University, Institute of Environmental Sciences, 18, Kremlyovskaya str., Kazan, Republic of Tatarstan, 420008, Russia, *e-mail:* **smukhara@gmail.com**

России». Создаваемая карта может служить основой для решения широкого круга задач: установления зависимостей формирования и функционирования малых речных систем от ландшафтно-географических условий территории, тематического картографирования, установления закономерностей стока рек, определения степени антропогенной нагрузки на бассейны и интегральной оценки их геоэкологического состояния.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Создание векторного слоя границ речных бассейнов территории исследования;
2. Разработка структуры базы геоданных;
3. Подбор и получение тематической геоинформации, имеющейся в открытом доступе, о природных и антропогенных условиях территории исследования;
4. Наполнение базы данных ГИС тематической информацией;
5. Построение тематических электронных карт;
6. Решение геоэкологических и географических задач на примере оценки интенсивности природно-антропогенной эрозии почв в бассейне р. Лены.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Построение электронной векторной карты речных бассейнов

В наших исследованиях речной бассейн выступает как базовая операционно-территориальная единица (ОТЕ) для проведения пространственного анализа, оценки и моделирования. Разработана методика автоматизированного выделения границ речных бассейнов по глобальным ЦМР [*Ермолаев* и др., 2014]. Процесс создания модели бассейнов рек (векторного слоя) включал следующие этапы: подбор исходных данных; предварительная обработка модели рельефа; построение границ бассейнов в автоматическом режиме; постобработка — автоматическая и ручная коррекция границ бассейнов.

Выбор исходных данных необходимой детальности, сам ход реализации методики, оценки качества получаемого результата подробно описаны в [*Ермолаев* и др., 2014; *Rodriguez* et al., 2005; *Ivanov* et al., 2016]. Здесь лишь коротко изложим основные моменты. В качестве исходных данных были выбраны модель рельефа GMTED2010 (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010) 250-метрового пространственного разрешения [*Danielson*, *Gesch*, 2011] и векторная карта водных объектов РФ м-ба 1: 1 000 000. Предварительная обработка включала создание единой мозаики из 9 фрагментов GMTED2010, коррекцию модели рельефа по карте гидрографической сети, устранение локальных «западин», присутствующих в исходной модели [*O'Callaghan*, *Mark*, 1984]. Границы бассейнов рек для всей территории исследования выделялись на основе скорректированной модели рельефа и растровой модели гидрографической сети в автоматическом режиме по алгоритму, реализованному в программе WhiteboxGAT[1] [*Lindsay*, 2014]. Векторная геометрия границ, представленная после автоматического выделения с точностью до линейного размера ячейки растра, корректировалась с помощью процедур сглаживания полилиний. Топологическая согласованность геометрии рек и границ бассейнов в устьях рек («схождение» границы бассейна к конечному узлу полилинии, представляющей реку) дорабатывалась с помощью автоматических процедур и частично (около 5 %) в ручном режиме. Выделение бассейнов проведено планарно, т. е. выделялись не только бассейны малых рек (в принятом масштабе это водотоки первого порядка), но и их межприточные пространства. Верификация результатов показала хорошую точность выделения границ бассейнов в различных морфолого-генетических типах рельефа. Пространственное разрешение файлов точек (растровой сетки) с учетом

[1] Whitebox Geospatial Analysis Tools. Электронный ресурс: https://whiteboxgeospatial.wordpress.com (дата обращения 01.02.2023).

принятого в исследовании уровня генерализации, обеспечивающего сомасштабность всех данных, составляет 250 х 250 м.

Формирование геопространственной базы данных и ГИС бассейнов малых рек выполнялось в три этапа: Европейская часть России (без Крыма и Калининградской области); Арктический водосбор Азиатской части России; Тихоокеанский водосбор (Дальневосточный федеральный округ).

Полученный результат построения границ бассейнов представлен в виде векторного слоя полигональных объектов (бассейнов рек и межприточных пространств). Все объекты получили уникальный идентификатор. На территории ЕЧР выделено 53 865 бассейнов (средняя площадь 71 км^2); в Азиатской части России (Арктический и Тихоокеанский водосборы) — 334 762 бассейнов (средняя площадь бассейнов 40 км^2).

Наполнение базы данных ГИС тематической информацией

Для информационного наполнения создаваемой ГИС выполнен подбор геоинформации из различных источников. Анализировались ее качество, доступность, применимость для решения географо-геоэкологических задач. Большая часть геоданных получена из открытых источников. Часть геоданных была доступна в электронной форме, пригодной для дальнейшей обработки и анализа, часть геоданных потребовала доработки, часть оцифровывалась в ходе исследовательских работ.

Для характеристики почвенно-геологических условий использовалась электронная почвенная карта России, разработанная в Почвенном институте имени В.В. Докучаева и доступная как Единый государственный реестр почвенных ресурсов России[1].

Для описания условий рельефа использовалась цифровая модель рельефа GMTED2010, на основе которой подготовлены растровые слои морфометрических характеристик рельефа исследуемой территории: крутизна, экспозиция, профильная и плановая кривизны, длины линий тока, эрозионный потенциал рельефа, порядок водотоков и другие различные сочетания морфоструктурных и морфоскульптурных характеристик [*Burrough*, *McDonell*, 1998].

Учет геологических условий проводился для территории ЕЧР с использованием Государственной геологической карты дочетвертичных отложений м-ба 1: 1 000 000 (31 номенклатурный лист на всю изучаемую территорию за 1974−2011 гг.). В ГИС представлены состав дочетвертичных пород и их возраст.

Для включения в базу геоданных климатической информации были получены и обработаны многолетние данные ежедневных наблюдений температуры воздуха и количества осадков на метеостанциях России и бывшего СССР (ФГБУ «ВНИИГМИ — МЦД»)[2]. Для метеостанций, обеспеченных данными, рассчитывались значения 16-ти климатических показателей:

1) средняя годовая температура воздуха;
2) средняя температура воздуха в январе;
3) средняя температура в июле;
4) среднее многолетнее максимумов температуры за год;
5) среднее многолетнее минимумов температуры за год;
6) среднее многолетнее амплитуды температуры воздуха за год;
7) среднее квадратическое отклонение температуры воздуха за год;
8) среднее многолетнее число дней с температурой воздуха ниже 8°;

---

[1] Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Электронный ресурс: https://egrpr.esoil.ru/content/1DB.html (дата обращения 01.02.2023).

[2] ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных» Электронный ресурс: http://meteo.ru (дата обращения 01.02.2023).

9) повторяемость сильных морозов (-30° и ниже);
10) сумма активных температур;
11) среднее годовое количества осадков;
12) среднее количество осадков в мае-августе;
13) среднее количество осадков за холодный период года;
14) среднее количество осадков за теплый период года;
15) коэффициент вариации годового количества осадков;
16) гидротермический коэффициент.

Из 1124 метеостанций, информация о местоположении которых доступна на http://meteo.ru/, данными ежедневных наблюдений за температурой воздуха и осадками обеспечены 600 станций. Обработка проводилась за период с 1960 по 2014 гг., после чего выполнялась пространственная интерполяция каждого из показателей на всю территорию исследования (метод Multilevel B-spline Approximation). Пространственная детальность полученных растровых слоев климатических показателей — 1 км. Кроме этого, в состав ГИС включены климатические слои (bioclimaticvariables) международной общедоступной базы данных WorldClim[1].

В рамках наполнения базы геоданных тематической информацией в ее состав была включена электронная ландшафтная карта, размещенная на сайте IIASA[2]. Это цифровая версия Ландшафтной карты СССР м-ба 1: 2 500 000 под ред. И.С. Гудилина [Ландшафтная карта..., 1980]. Было проведено уточнение геопривязки этой карты, подобраны параметры проекции, обеспечивающие ее пространственное совмещение с остальной геоинформацией.

Кроме того, привлекались современные мировые и российские источники данных по типам земного покрова и типам землепользования, полученные по материалам космосъемки различного пространственного разрешения в рамках различных исследовательских программ. В результате в ГИС был включен растровый слой типов земного покрова (карта наземных экосистем TerraNorte RLC), разработанный в ИКИ РАН на основе анализа данных спутниковых наблюдений [*Барталев* и др., 2012]. На карте представлены основные типы растительного покрова:

1) лиственные леса;
2) смешанные леса;
3) смешанные леса с преобладанием лиственных;
4) смешанные леса с преобладанием хвойных;
5) темнохвойные леса;
6) светлохвойные вечнозеленые леса;
7) хвойные листопадные леса;
8) редины хвойные листопадные;
9) лиственные кустарники;
10) хвойные вечнозеленые кустарники;
11) кустарничковая растительность;
12) болота;
13) луга;
14) степи;
15) прибрежная растительность;

[1] Global climate and weather data. Электронный ресурс: https://www.worldclim.org/data/index.html (дата обращения 01.02.2023).

[2] Леса и лесное хозяйство России. Ландшафты. Электронный ресурс: http://webarchive. iiasa.ac. at/Research/ FOR/forest_cdrom/russian/for_cond_ru.html#landscapes (дата обращения 01.02.2023).

16) травянистая растительность;
17) кустарниковая тундра;
18) открытые грунты;
19) выходы горных пород;
20) урбанизированные территории;
21) регулярно возделываемые пахотные земли.

После завершения ввода и интеграции в ГИС всей запланированной тематической информации (геология, рельеф, климат, почвенный покров, ландшафты, растительный покров) выполнялось ее обобщение на операционно-территориальные единицы анализа — бассейны. Для каждого из 388 627 бассейнов были определены преобладающие тип почвы и тип почвообразующей породы, класс дочетвертичных отложений, гидроклиматические характеристики, тип и подтип ландшафта; рассчитаны значения площади бассейна, проценты площади бассейна, занятой лесом, лугом, кустарниками, болотами, пашней. Геообработка выполнялась с помощью разработанных SQL-запросов в СУБД PostgreSQL/PostGIS и с помощью программ, написанных на языке R (пакеты rgdal, raster)[1].

База гидрологических данных, созданная в ходе исследований, включает информацию по речному стоку, полученную на гидрологических постах, ведущих наблюдения за стоком воды и/или стоком наносов на реках Европейской части России. Информационное наполнение базы проводилось по двум направлениям: пространственная (координатная) привязка гидропостов и ввод значений основных характеристик гидропостов и наблюдаемых на них показателей за период действия. В базу введены значения среднегодовых расходов воды и расходов взвешенных наносов, зафиксированных на постах за весь период наблюдений. Они получены из разных источников: опубликованные материалы долгосрочных режимных наблюдений на гидрологических постах [Ресурсы…, 1970], открытые источники Лаборатории Каспийского моря Института водных проблем АН РФ[2], Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) Федерального агентства водных ресурсов[3] и др. Для пространственной привязки гидрологических постов использовались сведения об их местоположении с сайта «ВНИИГМИ — МЦД»[4]. Координатная привязка гидропостов уточнялась с использованием векторных слоев водных объектов м-ба 1: 1 000 000, слоев общегеографического содержания различных масштабов, крупномасштабных топографических карт, детальных космических снимков на «GoogleMaps»[5] и «Яндекс.Карты»[6] на основе информации о названиях реки и пункта наблюдений, о расстояниях от истока или устья до поста. Создание точечных объектов слоя гидропостов проводилась с соблюдением топологических отношений с объектами слоев гидросети м-ба 1: 1 000 000 (геометрическое совмещение точки гидропоста с вершиной полилинии для линейного объекта гидросети или с вершиной «скелетона» полигона, представляющего площадной объект гидросети). Был создан

---

1 PostgreSQL. Электронный ресурс: https://www.postgresql.org/ (дата обращения 01.02.2023).

2 Лаборатория Каспийского моря Института водных проблем АН РФ. Электронный ресурс: http://caspi.ru/ (дата обращения 01.02.2023).

3 Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) Федерального агентства водных ресурсов. Электронный ресурс: https://gmvo.skniivh.ru/ (дата обращения 01.02.2023).

4 ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» Предоставление гидрологических данных по рекам и каналам. Электронный ресурс: http://meteo.ru/services-and-products/131-hydro-data (дата обращения 01.02.2023)

5 GoogleMaps. Электронный ресурс: https://www.google.ru/maps/@70.4755573,125.6007906,8.5z (дата обращения 01.02.2023).

6 Яндекс.Карты. Электронный ресурс: https://yandex.ru/maps/ geo/posyolok_ kyusyur/53067496/?ll=127.307399 %2C70.700643&z=13.56 (дата обращения 01.02.2023).

слой бассейнов, привязанных к гидропостам. В них также определены значения всех выше указанных параметров. Проведенная верификация ряда консервативных параметров (площади водосборов, средняя высота и др.) с данными из государственного водного кадастра дала хорошую сходимость этих показателей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученная карта малых речных бассейнов и созданная для них база данных, реализованные в рамках ГИС «Речные бассейны России», позволяют изучать особенности формирования и функционирования бассейновых геосистем в разнообразных ландшафтно-географических условиях территории исследования, проводить тематическое и комплексное картографирование бассейнов по природным и антропогенным характеристикам, оценивать их современное геоэкологическое состояние (рис. 1). В частности, был создан и размещен в сети Интернет геопортал «Речные бассейны Европейской части России»[1]. На геопортале опубликована геоинформация, полученная по результатам исследований и интегрированная в ГИС-проекта. Базовый слой «Бассейны» включает более 53000 объектов — картографических моделей бассейнов малых рек и межприточных пространств с информацией о характеристиках рельефа, почвенно-геологических и климатических условиях, подтипа ландшафтов, лесистости, распаханности, залуженности, заболоченности бассейнов, стоке рек, а также антропогенной нагрузке в бассейнах. На геопортале представлены тематические карты, отображающие пространственное распределение природно-антропогенных характеристик бассейнов на исследуемой территории. Слой «Гидропосты» представляет местоположения около 2000 гидрологических постов, обеспеченных данными о стоке воды и/или стоке наносов на реках Европейской России. К ресурсу предоставлен публичный (открытый) доступ. Для каждого бассейна с использованием методов геостатистического анализа определены значения эрозионности дождей за период 1991–2019 гг., а по ДДЗЗ — фактор растительности как для пашни, так и в пределах лесопокрытых и закустаренных (залуженных) территорий. Эти данные позволили впервые для ЕЧР определить интенсивность эрозии почв от талого и дождевого стока в бассейнах малых рек.

Решение геоэкологических и географических задач на примере оценки интенсивности эрозии почв в бассейне р. Лены

В качестве примера представлены возможности использования созданной ГИС по малым рекам России для решения геоэкологических задач. Продемонстрировано это на примере бассейна р. Лены.

Река Лена по площади своего бассейна входит в десятку крупнейших рек Земли. В водосборе р. Лены выделено 52 383 бассейна со средней площадью около 47 км^2. Обзор и визуальное дешифрирование данных дистанционного зондирования Земли показывает, что территория сельскохозяйственного освоения на юге Восточной Сибири [*Голубев*, 2009; *Рыжов*, 2009] в настоящее время ушла значительно севернее, вплоть до места впадения р. Алдана в р. Лену (рис. 2). В этой связи одной из задач исследования, геоэкологической по своему содержанию, явилось определение фундаментальных закономерностей процесса эрозии почв с оценкой интенсивности их смыва в результате талого и дождевого стока и пространственных закономерностей развития эрозии на ранее не изученной в этом аспекте территории страны. Сформированная геоинформационная база данных легла в основу расчета эрозии почвы в бассейне р. Лены. Оценка интенсивности эрозионных потерь почвы за период ливневого поверхностного стока выполнялась на базе модели, даваемой

[1] Речные бассейны Европейской части России. Электронный ресурс: http://bassepr.kpfu.ru/ (дата обращения 01.02.2023).

универсальным уравнением потерь почвы (USLE/RUSLE), где смыв почвы (т/га• г.) определяется как композиция факторов эрозии: R-фактор осадков (эрозионный потенциал дождевых осадков, ЭПО); K-фактор эродируемости (смываемости) почвы; LS-фактор рельефа; C-фактор растительности (хозяйственно-агрономический); P-фактор эффективности противоэрозионных мер (нами не учитывался). Для оценки эрозионных потерь почвы от стока талых вод применялась методика НИЛЭПиРП МГУ [*Ларионов*, 1993] (значительно модифицированная методика ГГИ), где в качестве факторов задействованы характеристики рельефа (длина склона, уклон склона и экспозиции склона), K-фактор эродируемости почвы, C-фактор растительности в период снеготаяния и слой поверхностного склонового стока во время снеготаяния. Общая схема проведения модельных расчетов включала: расчет факторов почвенной эрозии, входящих в модель смыва от стока дождевых осадков и талых вод (ЭПР, ЭПО, запасы воды в снеге, смываемость почвы, хозяйственно-агрономический фактор); расчет эрозии почвы от стока дождевых осадков и талых вод; расчет годовой интенсивности почвенной эрозии как суммы интенсивностей смыва при талом и дождевом стоке.

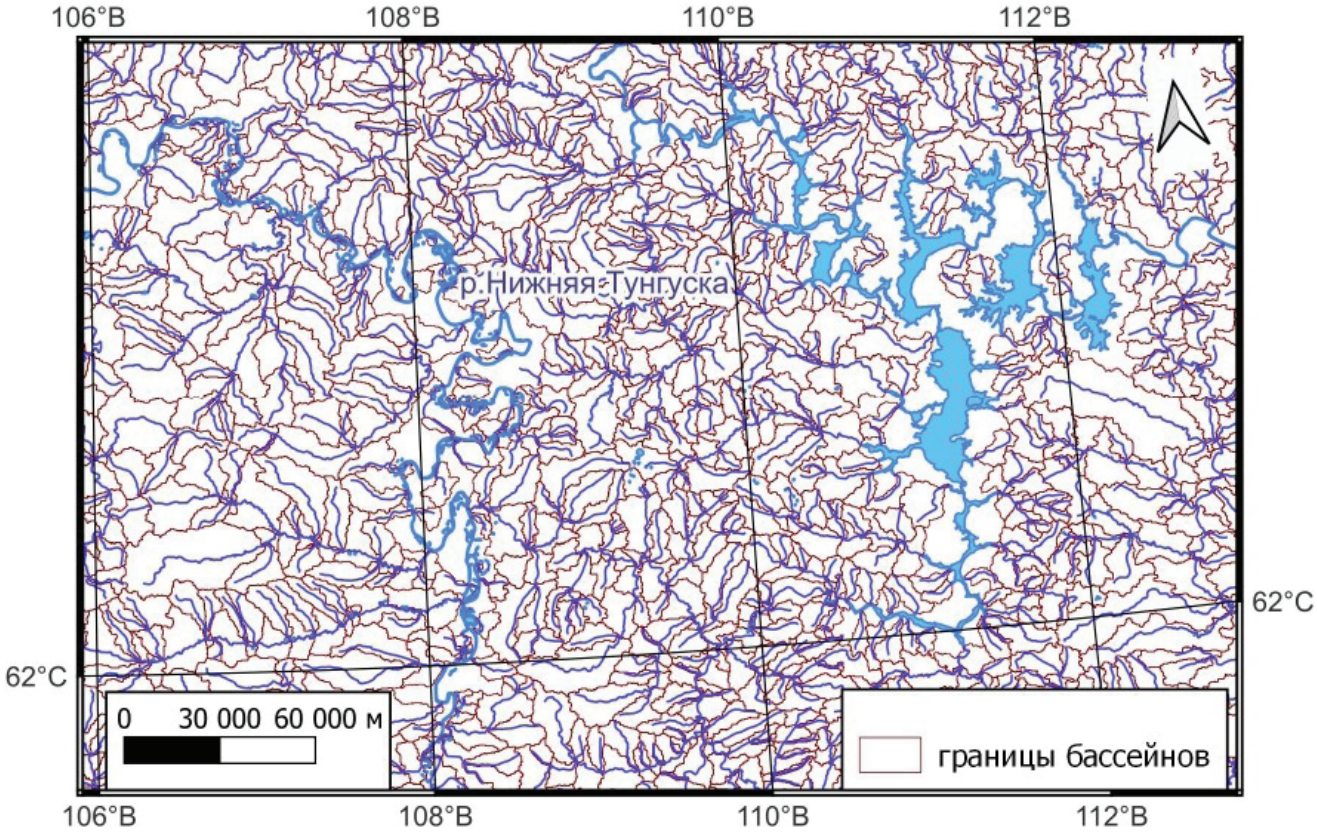


Рис. 1. Карта бассейнов малых рек России (фрагмент)
Fig. 1. Map of small river basins in Russia (fragment)

Оценка эрозии почв не проводилась в пределах территорий, где фактически почвенный покров отсутствует (скальные участки, водно-болотные пространства, урбанизированные территории). Для части почвенных контуров (с торфяными болотными, пойменными, глеевыми типами почв) с учетом их местоположения на склонах значение фактора эродируемости также принималось равным нулю, поскольку в дальнейшем при расчете эрозии почв эти участки были исключены из обработки вследствие фактического

отсутствия здесь эрозии. Для более точного определения такого рода территорий дополнительно проведено картографирование пойменных участков в соответствии с выбранным уровнем генерализации. Картографирование осуществлено с помощью визуального дешифрирования космических снимков высокого разрешения из открытых источников (Google Earth, SAS.Планета). Затем все эти участки были векторизованы и забланкованы [*Shynbergenov*, *Sihanova*, 2017].

Среднее значение суммарных потерь почвы (годовой смыв от талого и ливневого стока) без учета типов земного покрова по бассейну р. Лены достаточно высокое и составило 42,3 т/га• г. Отметим, что эти значения соответствуют максимально возможному сценарию развития эрозии при вероятностном полном сведении луговой и древесной растительности, т. е. для т. наз. условий чистого пара (табл. 1).

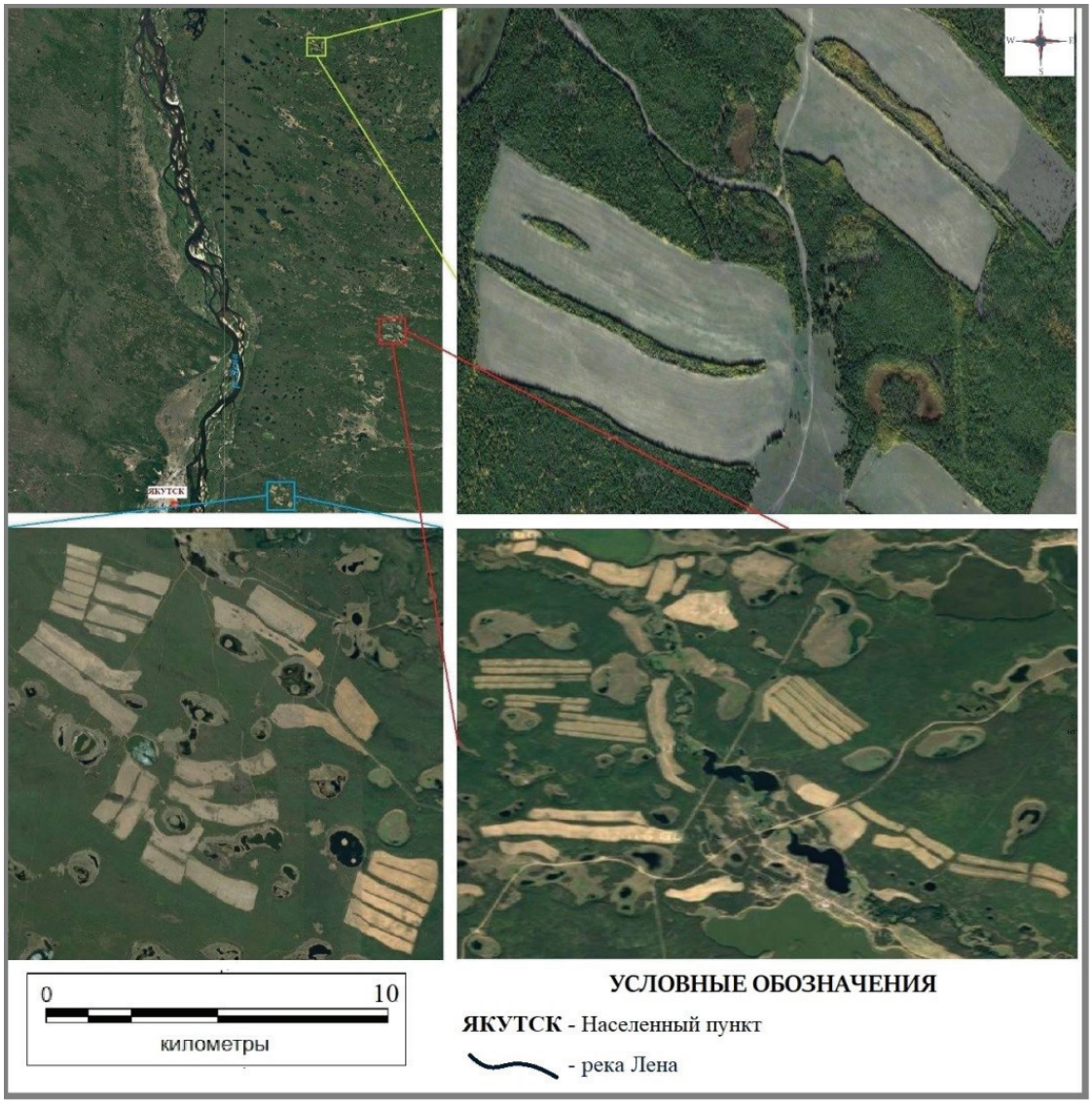


Рис. 2. Пахотные угодья в бассейне р. Лены, расположенные возле г. Якутска (снимки из ГИС SAS.Planet 160707)[1]

Fig. 2. Croplands in the river basin. Lena, located near the city of Yakutsk (images from GIS SAS.Planet 160707)

[1] SAS.Планета. Электронный ресурс: http://www.sasgis.org/sasplaneta/ (дата обращения 01.02.2023)

Табл. 1. Распределение бассейна р. Лены по градациям потенциального смыва почвы
Table 1. Distribution of the river basin Lena according to gradations of potential soil loss

Интенсивность эрозии, т/га• г.	Площади, занимаемые категорией смыва, без учета типов земного покрова		Площади, занимаемые категорией смыва, с учетом типов земного покрова	
	км^2	Доля от общей площади бассейна, %	км^2	Доля от общей площади бассейна, %
0–0,01	1 032 379,8	45	1 055 944,8	49,2
0,01–0,5	4 588,4	0,2	856 832,9	40,1
0,5–2,5	91 767,1	4	198 567,7	9,3
2,5–5	105 532,2	4,6	22 750,8	1,1
5–10	149 121,5	6,5	5 854,3	0,3
10–50	410 657,7	17,9	888,4	0 (0,04)
> 50	500 130,6	21,8	45,1	0 (0,0023)
Всего	2 294 177,3	100	2 140 884	100

Результаты показывают, что более 21 % территории находятся в зоне высокой эрозионной опасности (> 50 т/га). С целью приведения результатов расчета смыва почв к реальной картине проведена дополнительная калибровка факторов модели с применением карты типов земного покрова (Landcover). Она учитывает через поправочный коэффициент зависимость смыва почв от типов растительности. Результаты этих расчетов показывают, что среднее значение годовых потерь почвы на территории исследования уменьшилось на несколько порядков и составляет 0,04 т/га. Почти 99 % территории бассейна относится к неопасной и слабо опасной категории почвенной эрозии. Ничтожные значения эрозии обусловлены высокой долей лесистости и низменным характером рельефа левобережной части бассейна. Очень значительная интенсивность эрозии почв наблюдается менее чем на 0,05 % территории бассейна. На карте эрозии почвы в бассейне р. Лены ареалы максимально возможного смыва расположены по правому склону долины. Это участки возвышенного рельефа (Лено-Ангарское плато, Становое нагорье, Патомское нагорье, Становой хребет, Алданское нагорье, Верхоянский хребет). Здесь встречаются ареалы с высокими показателями смыва почвы (> 50 т/га• г.). В пределах левобережной части долины с низменным рельефом (Приленское плато, Центрально-Якутская равнина, понижения Среднесибирского плоскогорья, Северо-Сибирская низменность) преобладает смыв до 0,5 т/га• г. В бассейне р. Алдана (Становой хребет, Алданское нагорье), вследствие общего возвышенного характера рельефа и, соответственно, больших значений его эрозионного потенциала, смыв почв по правому склону доходит до 50 т/га• г. Далее по левому склону, где начинается Приленское плато, смыв почвы уменьшается, а максимальные значения не превышают 10 т/га• г. Ниже по течению Алдана, после впадения р. Ханды, преобладает низменный рельеф, что отражается на величинах смыва — в основном до 0,5 т/га• г. Совершенно иная морфометрия рельефа, соответствующая горным условиям, наблюдается в бассейнах притоков рр. Витима и Олекмы. Здесь, благодаря горному рельефу, смыв может достигать до 100 т/га• г., с фоновым значением 2,5–5 т/га• г. Бассейн р. Вилюя располагается в слаборасчлененном равнинном рельефе. В среднем течении он возвышенный, а в нижнем — низменный. Здесь значения смыва почв редко превышают 10 т/га• г., доминирует смыв не более 0,5 т/га• г.

ВЫВОДЫ

Фундаментальным вопросом при проведении геопространственного анализа на любом масштабном уровне остается выбор ОТЕ. Наша страна расчленена большим количеством рек. Бассейны рек являются геосистемными образованиями, а также наиболее репрезентативной и удобной ОТЕ за счет четко выраженных границ бассейнов, вещественно-энергетических потоков и иерархичности, позволяющей обоснованно переходить на разный уровень генерализации. Реализация бассейнового подхода проведена в представленном исследовании для территории материковой части России. Разработанной методикой автоматизированного ГИС-картографирования впервые создана электронная карта границ бассейновых геосистем малых рек. Общее количество бассейнов превышает 388 000. Сформирована специализированная геоинформационная система «Речные бассейны России». В состав ГИС вошло более 40 векторных и растровых картографических слоев. В сети Интернет для макрорегиона страны, в котором проживает большая часть населения, создан геопортал открытого доступа «Речные бассейны Европейской части России»[1]. Разработанный веб-ресурс также не имеет аналогов в нашей стране и ближнем зарубежье с точки зрения полноты и многообразия геоинформации, отнесенной к естественным геосистемным образованиям — бассейнам рек. Геопорталом за время его работы уже воспользовалось около 10 000 человек из 10 стран мира. По отзывам пользователей интерес представляет не только сама карта бассейнов и привязанная к ним геопространственная база данных, но и картографические представления полученных результатов исследований. В частности, это карта антропогенных нагрузок на бассейновые геосистемы, оценка фактора растительности для различного типа земель и эрозионного потенциала осадков за период 1991–2019 гг. Кроме того, на геопортале размещены результаты исследований по интенсивности эрозии почв, являющейся на пахотных землях основным фактором деградации и снижения плодородия почвенного покрова. Цифровая карта речных бассейнов дает в руки исследователей удобную и репрезентативную основу, геосистемную по своей сути, для пространственных оценок территорий различного масштабного уровня. Небольшие размеры бассейнов, соответствующие второму-третьему порядку, позволяют проводить пространственный анализ с использованием разных операционно-территориальных единиц. При необходимости это могут быть административные единицы разного масштабного уровня: муниципалитеты, области и федеральные округа. При геосистемном подходе территорию можно конструировать, начиная от «элементарного» бассейна до бассейнов крупных и Великих рек, либо интегрировать сетку бассейнов в ландшафтные зоны и районы. Реализация такого подхода с решением задачи по оценке интенсивности эрозии почв показана на примере бассейна Великой реки России — р. Лены.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 22-17-00025; https://rscf.ru/project/22-17-00025/; дата обращения 01 февраля 2023 г.).

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by the Russian Science Foundation (grant No. 22-17-00025, https://rscf.ru/project/22-17-00025/; accessed 01 February 2023).

.

[1] Речные бассейны Европейской части России. Электронный ресурс: http://bassepr.kpfu.ru/ (дата обращения 01.02.2023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барталев С.А. Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Флитман Е.В. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012. Т. 9. № 2. С. 9–27.

Голубев И.А. Проблема определения интенсивности водной эрозии почв в Сибири. Вестник КрасГАУ. Землеустройство, кадастр и мониторинг, 2009. № 1. С. 80–83.

Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Иванов М.А. Автоматизированное построение границ бассейновых геосистем для Приволжского федерального округа. География и природные ресурсы, 2014. № 3. С. 32–39.

Корытный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании: монография. Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2001. 163 с.

Ландшафтная карта СССР. Масштаб 1: 2 500 000. М.: Министерство геологии СССР, Гидроспецгеология, 1980.

Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Издательство Московского университета, 1993. 200 с.

Ларионов Г.А., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф. Методические указания по составлению крупномасштабных карт эрозионноопасных земель для обоснования почвозащитных мер при внутрихозяйственном землеустройстве. М.: Фонды Росземпроекта, 1996. 47 с.

Осипов Г.К., Дмитриев В.В. Бассейново-ландшафтный подход к территориальному планированию. Информация и космос, 2017. № 3. С. 112–117.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Мурманское управление гидрометеорол. службы. Гос. гидролог. ин-т. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1970. Т. 1. 316 с.

Рыжов Ю.В. Эрозионно-аккумулятивные процессы в бассейнах малых рек юга Восточной Сибири. География и природные ресурсы, 2009. № 3. С. 94–101.

Bosco C., de Rigo D., Dewitte O., Poesen J., Panagos P. Modelling soil erosion at European scale: Towards harmonization and reproducibility. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2015. V. 15. No. 2. P. 225–245.

Burrough P.A., McDonell R.A. Principles of Geographical Information Systems. New York: Oxford University Press, 1998. 190 p.

Danielson J.J., Gesch D.B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010). Open-File Report 2011–1073. Reston: U.S. Geol. Survey, 2011. 26 p.

Golosov V.N., Ivanov M.M., Tsyplenkov A.S., Ivanov M.A., Wakiyama Y., Konoplev A.V., Konstantinov E.A., Ivanova N.N. Erosion as a factor of transformation of soil radioactive contamination in the Basin of the Shchekino Reservoir (Tula Region). Eurasian Soil Science, 2021. V. 54 (2). P. 291–303. DOI:10.1134/S106422932102006X.

Ivanov M.A., Yermolaev O.P., Maltsev K.A., Shynbergenov Y.A. Geomorphometric analysis of river basins in East European Russia using SRTM and ASTER GDEM data. Journal of Engineering and Applied Sciences, 2016. V. 11. No. 14. P. 3080–3087.

Lindsay J. B. The Whitebox Geospatial Analysis Tools project and open-access GIS. Proceedings of the GIS Research, UK 22nd Annual Conference, The University of Glasgow, UK, 2014. P. 16–18.

Maltsev K.A., Ivanov M.A., Sharifullin A.G., Golosov V.N. Changes in the rate of soil loss in river basins within the Southern Part of European Russia. Eurasian Soil Science, 2019. No. 52 (6). P. 718–727. DOI: 10.1134/S1064229319060097.

O'Callaghan J., Mark D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. Comput. Vis. Graph. Image Process, 1984. No. 28 (3). P. 323–344.

Panagos P., Borrelli P., Poesen J., Ballabio C., Lugato E., Meusburger K., Montanarella L., Alewell C. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. Environmental Science & Policy. Elsevier Ltd, 2015. No. 54. August. P. 438–447.

Rodriguez E., Morris C.S., Belz J., Chapin E., Martin J., Daffer W., Hensley S. An assessment of the SRTM topographic products. Technical Report JPL D-31639. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2005. 143 p.

Shvarev S.V., Golosov V.N., Lebedeva E.V., Likhacheva E.A., Kharchenko S.V. Current geomorphology: Natural risk assessment and environmental and anthropogenic interaction. Herald of the Russian Academy of Sciences, 2022. V. 92 (3). P. 361–369. DOI: 10.1134/S10193316 22030145.

Shynbergenov Y.A., Maltsev K., Sihanova N. GIS-technologies application for calculation of potential soil loss of Marha River basin (Republic of Saha). IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences, 2017. V. 107 (1): 012023. DOI: 10.1088/1755-1315/107/1/012023.

Shynbergenov Y.A., Sihanova N.S. Identification of Large Rivers of Siberia (Ob, Yenisei, Lena) by using GIS technology based on remote sensing of Earth from Cosmos. Astra Salvensis, 2017. V. 5. No. 10. Supplement 1. P. 541–545.

Vogt J.V., Colombo R., Bertolo F. Deriving drainage networks and watershed boundaries. A new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics. Geomorphology, 2003. No. 53. P. 281–298.

REFERENCES

Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Lupian E.A., Stytsenko F.V., Flitman E.V. Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2012. V. 9. No. 2. P. 9–27 (in Russian).

Bosco C., de Rigo D., Dewitte O., Poesen J., Panagos P. Modelling soil erosion at European scale: Towards harmonization and reproducibility. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2015. V. 15. No. 2. P. 225–245.

Burrough P.A., McDonell R.A. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, New York, 1998. 190 p.

Danielson J.J., Gesch D.B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010). Open-File Report 2011–1073. Reston: U.S. Geol. Survey, 2011. 26 p.

Golosov V.N., Ivanov M.M., Tsyplenkov A.S., Ivanov M.A., Wakiyama Y., Konoplev A.V., Konstantinov E.A., Ivanova N.N. Erosion as a factor of transformation of soil radioactive contamination in the Basin of the Shchekino Reservoir (Tula Region). Eurasian Soil Science, 2021. V. 54 (2). P. 291–303. DOI:10.1134/S106422932102006X.

Golubev I.A. The issue of the Siberian water soil erosion intensity determination. The Bulletin of KrasGAU. Land management, cadastre and land monitoring, 2009. No. 1. P. 80–83 (in Russian).

Ivanov M.A., Yermolaev O.P., Maltsev K.A., Shynbergenov Y.A. Geomorphometric analysis of river basins in East European Russia using SRTM and ASTER GDEM data. Journal of Engineering and Applied Sciences, 2016. V. 11. No. 14. P. 3080–3087.

Korytny L.M. Basin concept in nature management: monograph. Irkutsk: Publishing House of IG SB RAS, 2001. 163 p. (in Russian).

Landsape map of USSR. Scale: 1: 2 500 000. Moscow: Ministry of Geology of the USSR, Gidrospetsgeologiya, 1987 (in Russian).

Larionov G.A. Erosion and deflation of soils: basic patterns and quantitative estimates. Moscow: Moscow University Press, 1993. 200 p. (in Russian).

Larionov G.A., Krasnov S.F., Litvin L.F. Methodological guidelines for compiling large-scale maps of erosion-prone lands to substantiate soil protection measures in on-farm land management. Moscow: Roszemproekt funds, 1996. 47 p. (in Russian).

Lindsay J. B. The Whitebox Geospatial Analysis Tools project and open-access GIS. Proceedings of the GIS Research, UK 22nd Annual Conference, The University of Glasgow, UK, 2014. P. 16–18.

Maltsev K.A., Ivanov M.A., Sharifullin A.G., Golosov V.N. Changes in the rate of soil loss in river basins within the Southern Part of European Russia. Eurasian Soil Science, 2019. No. 52 (6). P. 718–727. DOI: 10.1134/S1064229319060097.

Osipov G.K., Dmitriev V.V. Basin-landscape approach to territorial planning. Information and Space, 2017. No. 3. P. 112–117 (in Russian).

Panagos P., Borrelli P., Poesen J., Ballabio C., Lugato E., Meusburger K., Montanarella L., Alewell C. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. Environmental Science & Policy. Elsevier Ltd, 2015. No. 54. August. P. 438–447.

Rodriguez E., Morris C.S., Belz J., Chapin E., Martin J., Daffer W., Hensley S. An assessment of the SRTM topographic products. Technical Report JPL D-31639. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2005. 143 p.

Ryzhov Yu.V. Erosion-accumulative processes in the basins of small rivers in the south of Eastern Siberia. Geography and Natural Resources, 2009. No. 3. P. 94–101 (in Russian).

Surface water resources of the USSR. V. 1. Murmansk Department of Hydrometeorological Service. State Hydrological Institute. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1970. 316 p. (in Russian).

O'Callaghan J., Mark D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. Comput. Vis. Graph. Image Process, 1984. No. 28 (3). P. 323–344.

Shvarev S.V., Golosov V.N., Lebedeva E.V., Likhacheva E.A., Kharchenko S.V. Current geomorphology: Natural risk assessment and environmental and anthropogenic interaction. Herald of the Russian Academy of Sciences, 2022. V. 92 (3). P. 361–369. DOI: 10.1134/S10193316 22030145.

Shynbergenov Y.A., Maltsev K., Sihanova N. GIS-technologies application for calculation of potential soil loss of Marha River basin (Republic of Saha). IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences, 2017. V. 107 (1): 012023. DOI: 10.1088/1755-1315/107/1/012023.

Shynbergenov Y.A., Sihanova N.S. Identification of Large Rivers of Siberia (Ob, Yenisei, Lena) by using GIS technology based on remote sensing of Earth from Cosmos. Astra Salvensis, 2017. V. 5. No. 10. Supplement 1. P. 541–545.

Vogt J.V., Colombo R., Bertolo F. Deriving drainage networks and watershed boundaries. A new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics. Geomorphology, 2003. No. 53. P. 281–298.

Yermolayev O.P., Maltsev K.A., Ivanov M.A. Automated construction of the boundaries of basin geosystems for the Volga Federal District. Geography and Natural Resources, 2014. V. 35. No. 3. P. 222–228 (in Russian).

УДК: 528.88+004.94 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-560-573**

М.Г. Ерунова[1], **О.Э. Якубайлик**[2]

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ БАССЕЙНОВОГО ПОДХОДА

АННОТАЦИЯ

Бассейновый подход является эффективным инструментом для организации и управления природопользованием на региональном и межрегиональном уровнях. Статистическая обработка бассейновой информации позволяет проводить комплексную оценку окружающей среды водосборов рек разного иерархического уровня. Оценка состояния уникальных природных характеристик для каждого бассейна и выявление взаимосвязей между ними — это комплексная задача, которая требует применения различных методов и технологий геоинформационного моделирования с использованием многообразных наземных и спутниковых данных. В данной работе в качестве элементарной территориальной единицы выступают минимальные водосборные бассейны «пилотной» территории 4 водосборных бассейнов в Восточной Сибири со средней площадью около 1 га. Для каждого бассейна формируется набор атрибутов уникальных природных характеристик, которые получены на основе наземных исследований и спутниковых данных, а также климатических моделей. Такой набор атрибутов позволяет проводить оценку состояния территории на основе различных методов математического моделирования, статистического и кластерного анализа. Бассейновое моделирование территории проводилось на основе гидрологически корректной цифровой модели рельефа MERIT DEM Hydro. На основе спутниковой информации Terra/MODIS для каждого водосборного бассейна были получены данные по температуре, вегетационным индексам, растительному покрову. По данным реанализа NASA GPM и NCEP GFS для всех элементарных водосборных бассейнов были сформированы данные по накопленным осадкам. В рамках исследований был выполнен анализ сезонной динамики температуры поверхности исследуемой территории, получены статистические распределения изменения температуры поверхности в течение года для каждого водосборного бассейна, посчитана сумма активных температур воздуха выше 10 °C. Были получены статистические значения и среднегодовые характеристики трендов изменения вегетационных индексов NDVI, SAVI и LAI для каждого бассейна. Созданная геоинформационная модель является инструментом для обеспечения задач оценки состояния экосистем на основе ландшафтно-бассейнового подхода. Разработаны необходимые методы и технологии для создания, хранения и обработки данных о каждом водосборном бассейне.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГИС, моделирование, водосборный бассейн, экосистемы, дистанционное зондирование

[1] Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», ул. Академгородок, д. 50, Красноярск, Россия, 660036,
e-mail: **marina@icm.krasn.ru**

[2] Институт вычислительного моделирования СО РАН, ул. Академгородок, д. 50/44, Красноярск, Россия, 660036,
e-mail: **oleg@icm.krasn.ru**

Marina G. Erunova[1], **Oleg E. Yakubailik**[2]

GEOINFORMATION MODELING OF ECOSYSTEMS BASED ON THE BASIN APPROACH

ABSTRACT

The basin approach is an effective tool for the organization and administration of environmental management at the regional and interregional levels. Statistical processing of basin information makes it possible to comprehensively assess the ecology of river catchment areas of different hierarchical levels. Assessing the state of unique natural characteristics for each basin and identifying relationships between them is a complex task that requires the use of various methods and technologies of geoinformation modeling using a variety of ground and satellite data. The elementary territorial unit in this work is the minimum watersheds of the pilot area of four watersheds in Eastern Siberia with an average area of about 1 ha. For each basin, a set of attributes of unique natural characteristics is formed, which are obtained on the basis of ground-based research and satellite data, as well as climate models. Such a set of attributes makes it possible to assess the state of the territory based on various methods of mathematical modeling, statistical and cluster analysis. Basin modeling of the territory was performed on the basis of a hydrologically correct digital relief model MERIT DEM Hydro. Based on Terra/MODIS satellite information, data on temperature, vegetation indices, and vegetation cover were obtained for each catchment area. According to the data of the NASA GPM and NCEP GFS reanalysis, data on accumulated precipitation were generated for all elementary watersheds. An analysis of the seasonal dynamics of surface temperature in the study area was carried out, and statistical distributions of changes in surface temperature during the year were obtained for each watershed. The sum of active air temperatures above 10 °C was calculated. Statistical values and average annual characteristics of trends in the vegetation indices NDVI, SAVI and LAI for each basin were obtained. The created geoinformation model is a tool for ensuring the tasks of assessing the state of ecosystems based on the landscape-basin approach. The necessary methods and technologies for creating, storing and processing data for each watershed have been developed.

KEYWORDS: GIS, modeling, watershed, ecosystem, remote sensing

ВВЕДЕНИЕ

Бассейновый подход является эффективным инструментом для организации и управления природопользованием на региональном и межрегиональном уровнях. Водосборные бассейны объединяют в единое целое природные характеристики и являются уникальными модельными объектами исследования [*Рогов, Багайников,* 2020; *Neumann* et al., 2021]. Модели управления территорией, разработанные на основе бассейнового подхода, встречаются для многих регионов [*Браславская* и др., 2020; *Sun* et al., 2020]. Главной особенностью бассейнового подхода является масштабность: из малых водосборных бассейнов можно собрать как «мозаику» средние или крупные водосборные бассейны — в зависимости от площади исследуемой экосистемы.

С появлением алгоритмов геоинформационного моделирования границ водосборов и ландшафтов [*Ермолаев* и др., 2015; *Lindsay*, 2016; *Haag* et al., 2020] бассейновый подход приобрел новые возможности использования бассейновой сети в качестве матрицы

[1] Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, 50, Akademgorodok str., Krasnoyarsk, 660036, Russia, *e-mail:* **marina@icm.krasn.ru**

[2] Institute of Computational Modeling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 50/44, Akademgorodok str., Krasnoyarsk, 660036, Russia, *e-mail* **oleg@icm.krasn.ru**

элементарных территориальных единиц, которые можно наполнять разнообразной информацией о состоянии территории. Бассейновый подход применяется для гидрологического моделирования [*Liu* et al., 2014], управления территориями [*Жерелина*, 1999; *Neumann* et al., 2021], оценки состояния экосистемы [*Гинзбург* и др., 2022], моделирования почвоводоохранного обустройства агроландшафтов [*Кузьменко* и др., 2012], картирования территории [*Кузнецова*, 2016] и т. д.

Оценка состояния уникальных природных характеристик для каждого бассейна и выявление взаимосвязей между ними — это комплексная задача, которая требует применения различных методов и технологий геоинформационного моделирования с использованием многообразных наземных и спутниковых данных [*Лупян* и др., 2018; *Murray* et al., 2018]. Обычно используется большой набор атрибутов, включающий морфометрические характеристики рельефа, климатические показатели, тип почв и почвообразующих пород, растительный покров, антропогенную нагрузку и т. д. Многие спутниковые системы дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) сегодня предоставляют свободный доступ к поступающим с них данным [*Макарова, Владимирова*, 2020], а развитие технологий автоматизированной обработки спутниковых данных позволяет обеспечить получение необходимой информации для решения задач, связанных с рациональным природопользованием в гидрологически определенных географических районах на региональном и межрегиональном уровнях.

Настоящая работа включает тематическое исследование территории Красноярского края (центральная часть бассейна р. Енисей). Сельское хозяйство Красноярского края находится в зоне рискованного земледелия. Определение уникальных характеристик природной среды поможет лицам, принимающим решения в государственном и частном секторах на всех уровнях, определить приоритеты финансирования.

Цель данной работы — это информационно-методическое обеспечение задач оценки состояния экосистем на основе бассейнового подхода с использованием методов и технологий геоинформационного моделирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основная идея данной работы заключается в организации данных по природно-ресурсным характеристикам территории в одном географическом пространстве на основе бассейнового подхода. В качестве исходной информации используются разные по масштабу (пространственному разрешению) данные различного содержания. В частности, цифровой рельеф имеет пространственное разрешение 70 м, данные о температуре MODIS — около 1 км, данные о состоянии растительного покрова — 250 м и т. д. Бассейновый подход позволяет представить территорию в виде нескольких иерархически вложенных уровней, где верхний (первый) уровень — это уровень крупных рек, который включает в себя более детальный следующий уровень основных притоков этих рек, далее эти притоки включают мелкие речки, мелкие речки включают небольшие ручьи и т. д. В зависимости от масштаба используемых речных бассейнов на каждом уровне собираются природные характеристики соответствующего масштаба (детализации). В результате данные с низким пространственным разрешением привязываются к верхнему уровню водосборного деления, а более точные данные с высоким пространственным разрешением — к более детальному уровню. Иерархически организованная система вложенных друг в друга речных бассейнов обеспечивает возможность привязки имеющихся данных о природных ресурсах к соответствующим, оптимальным по масштабу уровням детализации.

Для организации такой многоуровневой базы данных природных характеристик территории в одном географическом пространстве использовались методы и технологии

геоинформационного моделирования, которые представлены в стандартном программном обеспечении ГИС. Технология организации многоуровневой базы данных заключалась в следующем. Сначала для выбранной территории исследования на основе цифровой модели рельефа MERIT Hydrologically Adjusted Elevations была создана модель водосборного деления. Далее выполнялось формирование многоуровневой иерархической структуры водосборного деления данной территории. Следующий этап — создание набора природных характеристик для каждого бассейна на всех масштабных уровнях в соответствии с детализацией исходных данных.

В качестве района исследования были выбраны водосборные бассейны нескольких крупных рек Красноярского края (Восточная Сибирь) — Кан, Мана, Туба и Оя общей площадью около 9 млн га, расположенные между 91–97° в. д. и широтами 52–56° с. ш. Выбранные водосборные бассейны находятся в центральной части Красноярского края Российской Федерации и включают разнообразные природные зоны: тайга, зона смешанных лесов (здесь расположен административный центр Красноярск), участки степи. На данной территории встречаются три формы рельефа: возвышенность (200–500 м), низкие горы (500–1000 м) и средние горы (1000–2000 м) (рис. 1). Среднегодовое количество осадков по статистике за 20 лет составляет около 650 мм/г. Климат на данной территории тоже разнообразен, средняя сумма активных температур (выше 10 °С) меняется от 650 до 2900 °С. На исследуемой территории представлено большое разнообразие природных и географических объектов. Среди них степные, лесостепные, таежные, смешанные и лиственные леса. Около половины территории занято сельскохозяйственными угодьями, расположенными в основном в долинах. Другая часть территории — горная тайга и тундра Саянских гор с крутыми склонами, перепадами рельефа.

Значительная часть рассматриваемой территории имеет высокое экономическое значение для Красноярского края. Здесь идет интенсивное развитие агропромышленного комплекса, горнорудной промышленности и туризма, формируется новая инфраструктура железнодорожного и автомобильного транспорта, развиваются экологически чистые производства с широким применением биотехнологий. Оценка потенциала экосистемных услуг данной территории позволит рационально управлять ее экосистемой.

Бассейновое моделирование

В рамках нашего исследования была разработана иерархическая модель классификации водосборных бассейнов исследуемой территории; которая состоит из четырех уровней. Для этого использовались геоинформационные системы (ГИС) WhiteBox GAT, QGIS с модулями GRASS и программное обеспечение ArcGIS [*Erunova, Yakubailik*, 2020]. В качестве исходных материалов использовались следующие данные:

1. (MERIT DEM) MERIT Hydrologically Adjusted Elevations DEM с пространственным разрешением 70 м [*Yamazaki* et al., 2019];
2. Векторный слой водосборных бассейнов, построенный в полуавтоматическом режиме с помощью специальных гидрологических модулей программного обеспечения WhiteBox GAT [*Lindsay*, 2016] на основе цифровой модели рельефа MERIT DEM;
3. Гидрографическая сеть с топографических карт м-ба 1: 1 000 000, 1: 2 500 000 и 1: 100 000 в векторном формате.

Технология моделирования бассейнов заключалась в следующем. На первом этапе инструментом Breach depressions была проведена предварительная обработка MERIT DEM в результате которой была сформирована цифровая модель рельефа, корректная для гидрографического анализа. Далее выполнялся этапы формирования полубассейнов и

бассейнов, на основе работы алгоритма Sub-basins. Все перечисленные этапы были реализованы в программе WhiteBox GAT. Далее в программе QGIS проводилась заключительная обработка данных, коррекция границ и топологии слоя пространственных объектов водосборных бассейнов.

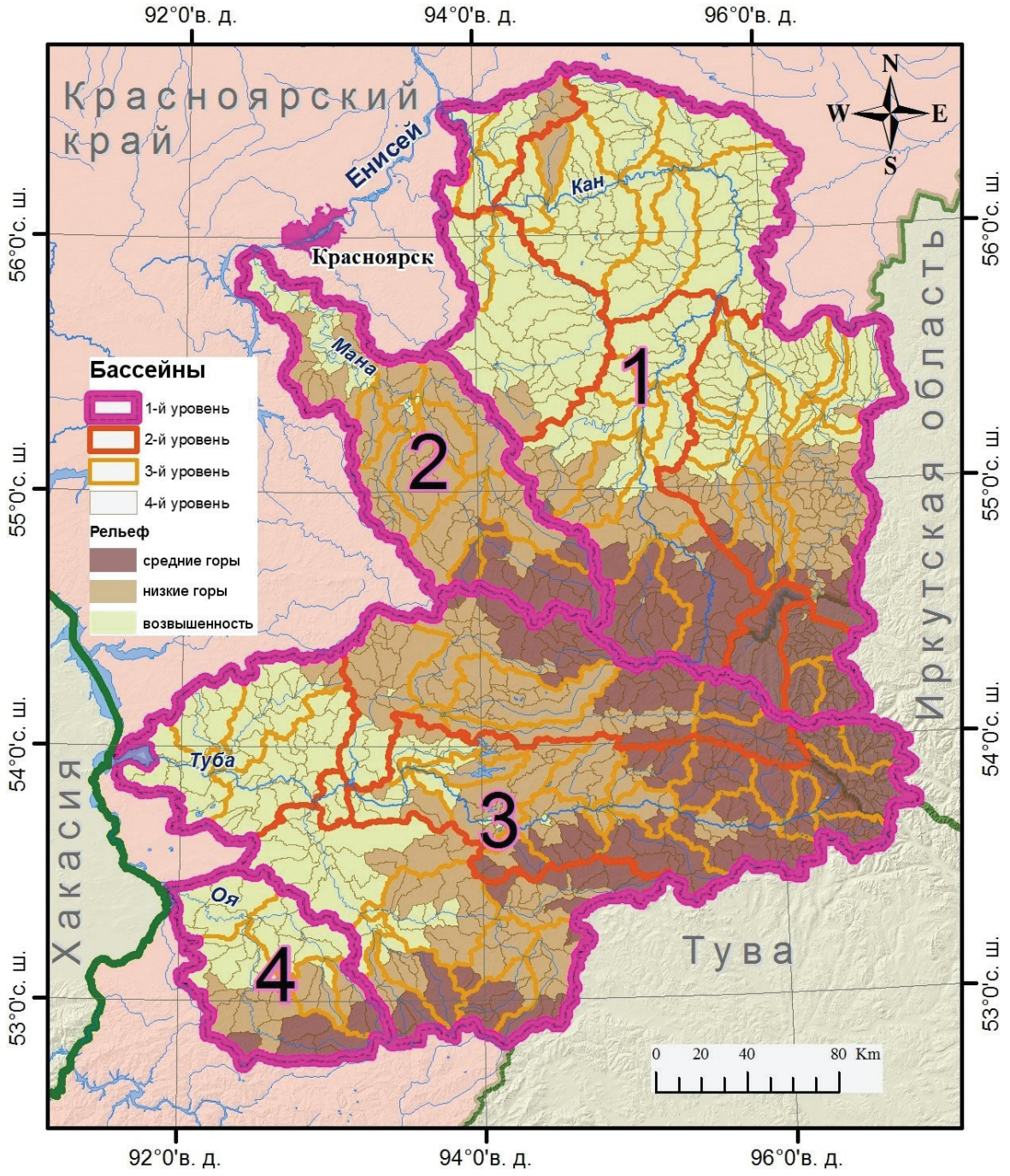


Рис. 1. Иерархические уровни водосборного деления района исследования на тематической карте рельефа: 1 — бассейн р. Кан; 2 — бассейн р. Маны; 3 — бассейн р. Тубы; 4 — бассейн р. Ои

Fig. 1. The hierarchically organized system of nested river watersheds in the study territory of thematic map of the relief: 1 — the Kan watershed; 2 — the Mana watershed; 3 — the Tuba watershed; 4 — the Oya watershed

Иерархическая структура водосборного деления

В ГИС ArcGIS формировались водосборные бассейны рек-притоков в иерархической системе 1-го, 2-го, 3-го и 4-го уровня водосборного деления. Для этого использовались векторные слои гидрографической сети разных масштабов.

1-й уровень водосборного деления составляют крупные реки Красноярского края: р. Кан имеет идентификатор 1, р. Мана — 2, р. Туба — 3, р. Оя — 4. 2-й уровень — это крупные притоки рек 1-го уровня, 3-й уровень делит бассейны 2-го уровня и т. д. (рис. 1).

Иерархические уровни водосборного деления выбирались исходя из детализации гидрографической сети и исходного набора природных характеристик по спутниковым и наземным данным разного масштаба. В целом была сформирована 4-уровневая классификация исследуемой территории. Всего создано 1105 бассейнов 4-го уровня, со средней площадью 0,008 км^2.

База данных природных характеристик

Расчет основных статистических показателей морфометрических характеристик рельефа для каждой водосборной территории осуществлялся в ГИС QGIS на основе скорректированной цифровой модели рельефа MERIT DEM. База данных морфологических характеристик состоит из следующих показателей: средняя высота, уклон и экспозиция склона. Определены основные статистические значения (минимальное, максимальное, среднее и среднее квадратичное отклонение).

Данные о температуре поверхности были подготовлены с использованием продукта Terra MODIS MOD11A2, архив которого находится в открытом доступе с 2000 г. Каждое изображение содержит информацию о дневной и ночной температуре поверхности Земли с пространственным разрешением около 1 км. Вегетационные индексы NDVI и SAVI были рассчитаны с использованием продукта MOD09Q1, где каждый пиксель имеет пространственное разрешение 250 м. Расчет вегетационного индекса LAI был основан на продукте MOD15A2H с пространственным разрешением 500 м.

Информация о растительном покрове исследуемой территории была получена из нескольких карт почвенно-растительного покрова России, карт пахотных земель России и ряда других наборов исходных данных [*Барталев* и др., 2016]. Все эти данные были созданы с использованием технологий автоматизированной обработки данных дистанционного зондирования Земли. Цифровые карты, построенные в этой работе, основаны на данных Terra MODIS и Landsat. Сгенерированный набор данных имеет пространственное разрешение 250 м.

По всем водосборным бассейнам на основе архива данных Глобального измерения осадков (GPM) были подготовлены ежедневные данные о накоплении осадков с 2001 г. по настоящее время. Данная информация может быть использована для рассмотрения и решения различных задач в пространственно-временном моделировании динамики развития экосистем. Миссия GPM, инициированная NASA и JAXA, представляет собой международную сеть спутников, которые обеспечивают глобальные наблюдения за дождем и снегом.

Почвенный покров сформирован с использованием цифровых данных Единого государственного реестра почвенных ресурсов России. Данный регистр содержит векторные данные, полигональные объекты почвенной карты России в м-бе 1: 2 500 000 под ред. В.М. Фридланда (http://egrpr.esoil.ru/). К каждому полигону были привязаны атрибуты, включая диагностику и описание почв (тип почвы, подтип и т. д.). Данные о преобладающей характеристике почвы были добавлены для каждого водосборного бассейна.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследуемой территории построена четырехуровневая иерархическая система водосборных бассейнов с учетом гидрографической сети различных масштабов. Всего было создано 1105 бассейнов 4-го уровня со средней площадью 1 га, в т. ч. 479 бассейнов 4-го уровня для р. Кан, 94 — для р. Маны, 483 — для р. Тубы и 49 — для р. Ои. Полученная иерархическая структура позволяет добавлять более детальные уровни водосборного деления (5-й уровень и далее), если есть потребность в более подробной пространственной информации. Например, такими данными 5-го уровня могут быть карты водотоков на землях сельскохозяйственного назначения — по ним можно получить сведения о засушливых и переувлажненных участках, подготовить план проведения мелиоративных мероприятий. Наиболее целесообразным источником данных о рельефе в этом случае будет съемка с беспилотного самолета или квадрокоптера.

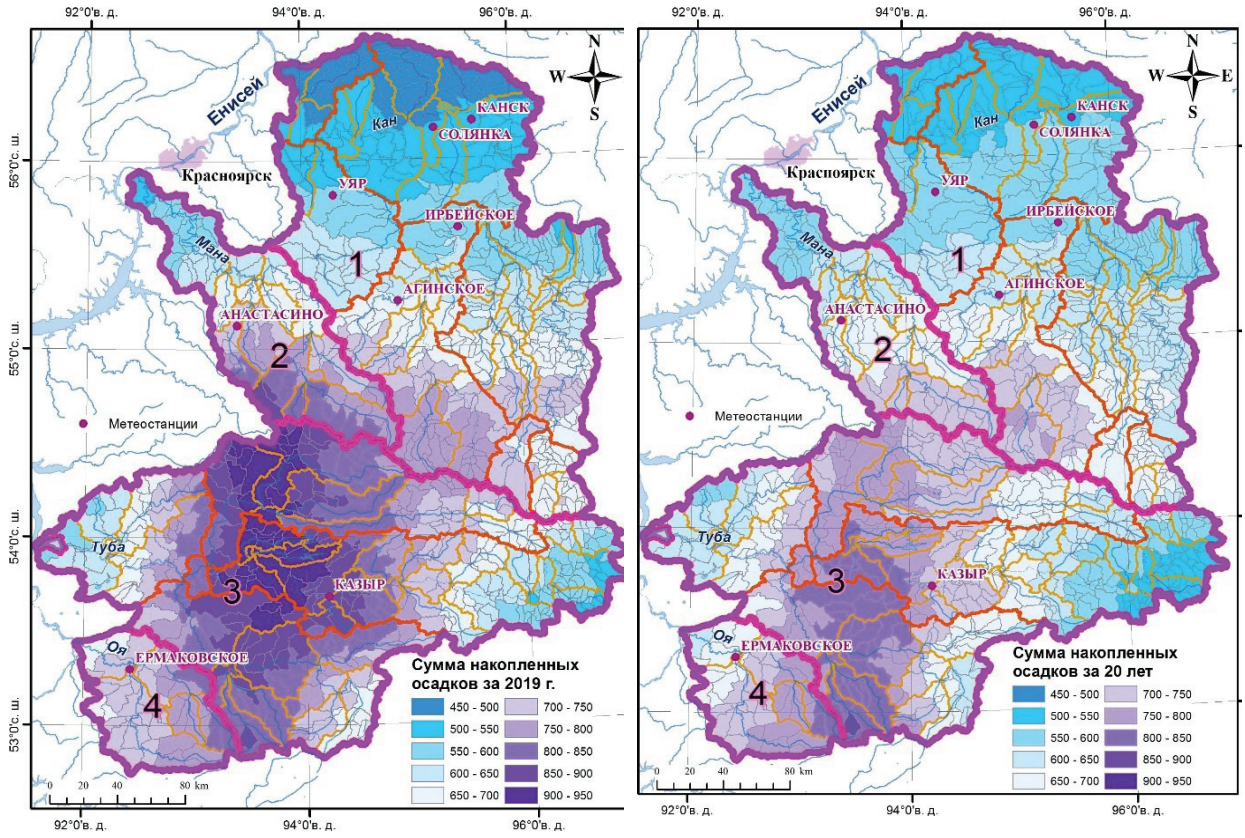
Сформирована база данных набора природных характеристик-атрибутов иерархической системы водосборного деления, которая состоит из морфологических характеристик, характеристик растительного и почвенного покрова; за 2000–2021 гг. каждый бассейн содержит значения (с шагом 8 дней) о температуре, выпавших осадков и вегетационных индексов NDVI, SAVI и LAI. Такой набор атрибутов позволяет проводить оценку состояния территории, используя различные методы математического моделирования, статистического и кластерного анализа.

На основе данных MERIT Hydro DEM был проведен анализ морфологических характеристик, таких как средняя высота, уклон и экспозиция склона, для каждого уровня иерархической системы водосборных бассейнов. В частности, вычислены следующие показатели для бассейна р. Ои: минимальная высота — 280 м, максимальная высота — 1373 м, средняя высота — 594 м, стандартное отклонение — 283 м. Перечисленные показатели также определены для рр. Туба, Мана и Кан. Для ранжирования водосборных бассейнов по средней высоте была использована стандартная классификация местности по абсолютной высоте (рис. 1).

Для территории 4 водосборных бассейнов был составлен и проанализирован архив спутниковых данных для каждого бассейна каждого уровня на основе 8-дневных безоблачных данных о среднесуточной температуре и нескольких вегетационных индексах, полученных Terra MODIS за 2000–2022 гг. Он может быть использован для анализа состояния и тенденций природной среды. Накопленная статистика дает основу для количественной оценки характеристик различными методами пространственного анализа: наложением, отбором, зонированием, сводной статистикой. Архив позволяет оценить состояние водосборных бассейнов любого уровня и сравнить динамику вегетационных показателей и температур, осадков для разных типов растительности или высотных поясов, типов характеристик почв.

Был выполнен анализ сезонной динамики температуры поверхности исследуемой территории, получены статистические распределения изменения температуры поверхности в течение разных лет для каждого бассейна. Посчитана средняя сумма активных температур воздуха выше 10 °C за 2000–2022 гг. На территории исследования находится несколько наземных метеостанций (рис. 2), архив которых находится в свободном доступе. Сравнение годового хода температуры по данным метеостанций и MODIS показывает хорошее соглашение между ними. Коэффициент корреляции данных о годовом ходе температур для всех метеостанций по сравнению с данными MODIS превышает 0,9 [*Erunova* et al., 2020]. По данным реанализа NASA GPM для всех элементарных водосборных бассейнов были сформированы данные по накопленным осадкам и ряду других характеристик за период 2000–2022 г. Сравнительный анализ полученных данных и данных с наземных метеостанций по осадкам показал высокую степень соответствия между рассмотренными

наборами данных [*Yakubailik, Yakubaylik*, 2020]. Так, например, в 2019 г. чрезмерное число дождей, наблюдавшееся в южных и местами в центральных районах, привело к увеличению количества осадков относительно нормы в 1.1–1.8 р. На рис. 2а представлена тематическая карта суммы накопленных осадков за 2019 г. и имеющиеся на данной территории наземные метеостанции. На рис. 2б представлен результат вычисления среднемноголетних значений количества накопленных осадков за период 2000–2020 гг.

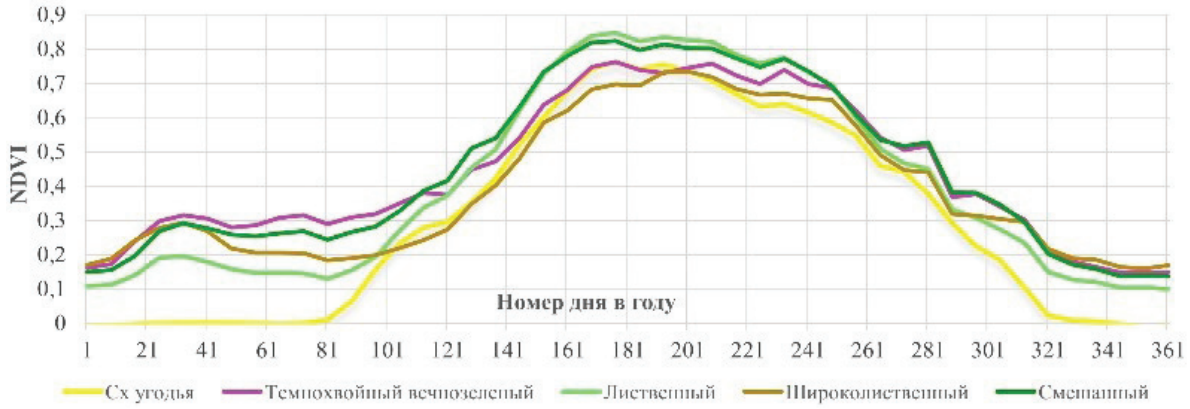


а) *б)*

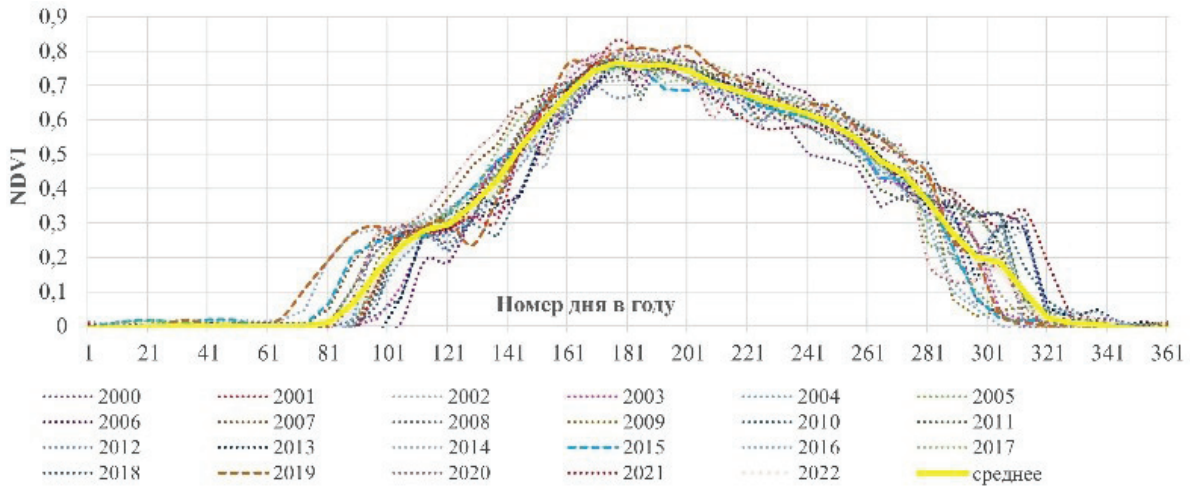
Рис. 2. Тематические карты суммы накопленных осадков:
а) за 2019 г.; б) за 2000–2020 гг.
Fig. 2. Thematic maps of the amount of accumulated precipitation:
a) for 2019; b) for 2000–2020

Были получены среднегодовые характеристики трендов изменения вегетационных индексов NDVI, SAVI и LAI для каждого бассейна. Накопленные данные позволяют выполнять количественную оценку развития сельскохозяйственных культур на рассматриваемой территории. На рис. 3б представлен ход средних значений динамики NDVI для сельскохозяйственных районов за отдельные года с 2000–2022 гг. На рис. 3а показаны средние значения за этот же период для некоторых типов растительности. Получены характеристики преобладающих видов растительного покрова (рис. 3в) и почвенного покрова. База данных характеристик почв содержит более 50 атрибутов, которые определяют характер и свойства почв.

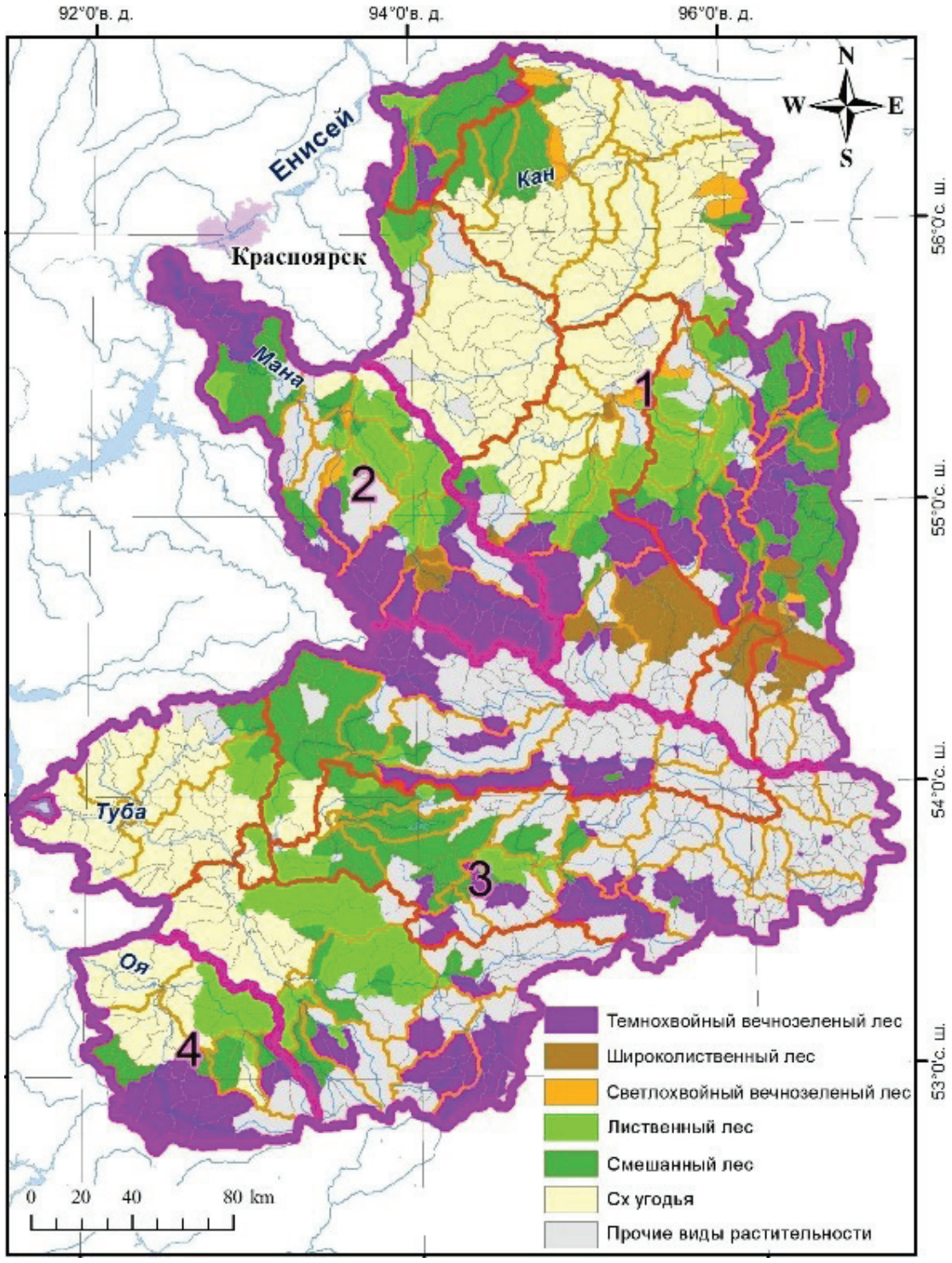
Данные многоуровневой иерархической системы разграничения водосборных бассейнов могут быть использованы для оценки состояния природных характеристик территории с использованием статистических и математических методов и программного обеспечения. В частности, открытый программный комплекс VidaExpert [*Gorban, Zinovyev,* 2015] был использован для проведения кластерного анализа нелинейным методом анализа и визуализации многомерных данных (метод эластичной карты) для выявления однородных участков по годовому колебанию температуры за 2019 г. Было обнаружено, что нелинейная кластеризация с использованием метода упругих карт позволяет точно выявить кластеры, которые объединили небольшие бассейны в группы со сходными географическими, климатическими и ландшафтными свойствами [*Erunova* et al., 2020].



а) a)



б) b)



в) с)

Рис. 3. а) Среднее значение динамики NDVI в течение 2000–2022 гг. для различных типов растительности; б) средние значения динамики NDVI в разные годы для сельскохозяйственных угодий; в) карта растительного покрова
Fig. 3. a) Average value of NDVI dynamics during 2000–2021 for different vegetation types; b) average values of NDVI dynamics in different years for farmlands; c) map of vegetation

ВЫВОДЫ

Разработана детальная многоуровневая иерархическая система разграничения водосборных бассейнов территории южного Красноярского края. Разработаны необходимые методы и технологии для создания, хранения и обработки данных о каждом водосборном бассейне. Методы многомерного анализа данных могут быть использованы для выявления закономерностей распределения данных и определения взаимосвязей между ними. Полученная многоуровневая база данных природных характеристик территории может быть расширена как по масштабу, за счет добавления более детального уровня бассейна, так и за счет наполнения его природными характеристиками не только продукта MODIS, но и других спутниковых продуктов. База данных природных характеристик, представленных в данном исследовании, служит для оценки состояния уникальных природных свойств каждого водосборного бассейна и выявления их взаимосвязей. Для рационального управления территорией необходимо правильно оценить состояние экосистемы. Предложенная методика формирования и использования совокупности природных характеристик территории позволяет осуществлять мониторинг изменений экосистем, планирование рациональной деятельности человека (землепользования), зонирование территории для оказания основных экосистемных услуг.

Важным результатом текущего исследования стала разработка информационно-методического обеспечения для задач оценки состояния экосистем на основе бассейнового подхода с использованием методов и технологий геоинформационного моделирования. Такой подход может быть использован в качестве инструмента дифференцированного финансирования агрохолдингов федеральными и муниципальными органами власти Красноярского края, в целях совершенствования экосистемного управления территорией и содействия социально-экономическому развитию региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.

Браславская Т.Ю., Колбовский Е.Ю., Есипова Е.С., Коротков В.Н., Немчинова А.В., Чуракова Е.Ю., Козыкин А.В., Кулясова А.А., Алейников А.А. Ландшафтно-бассейновый подход в экологической оценке малонарушенных лесов Онежского полуострова. Известия Российской академии наук. Серия географическая, 2020. Т. 84 (6). С. 905–919. DOI: 10.31857/S2587556620060035.

Гинзбург А. И. Костяной А.Г., Шеремет Н.А., Ижицкий А.С., Соловьев Д.М. Динамика высыхания западного бассейна Большого Аральского моря по спутниковым данным (2002–2021). Современные проблемы ДЗЗ из космоса, 2022. Т. 19. № 5. С. 246–263. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-246-263.

Ермолаев О.П. Мальцев К.А., Мозжерин В.В., Мозжерин В.И. Глобальная геоинформационная система «Сток взвешенных наносов в речных бассейнах Земли». Геоморфология и палеогеография, 2012. № 2. С. 50–58. DOI: 10.15356/0435-4281-2012-2-50-58.

Жерелина И.В. Бассейновый подход в управлении природопользованием: дис. ... канд. геогр. н., Барнаул, 1999. 203 с.

Кузнецова Т.И. Картографирование геосистем бассейна озера Байкал в пределах территорий России и Монголии для решения задач устойчивого развития. Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС», 2016. Т. 22. № 1. С. 297–309.

Кузьменко Я.В., Лисецкий Ф.Н., Нарожняя А.Г. Применение бассейновой концепции природопользования для почвоводоохранного обустройства агроландшафтов. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2012. Т. 14. № 1 (9). С. 2432–2435.

Лупян Е.А., Барталев С.А., Крашенинникова Ю.С., Плотников Д.Е., Толпин В.А., Уваров И.А. Анализ развития озимых культур в южных регионах европейской части России весной 2018 года на основе данных дистанционного мониторинга Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2018. Т. 15. № 2. С. 272–276. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-272-276.

Макарова М. А., Владимирова Н. А. Обзор ресурсов открытых пространственных данных о растительном покрове земли в сети Интернет. Ботанический журнал, 2020. Т. 105. № 4. С. 387–407. DOI: 10.31857/S0006813620040067.

Рогов В.Ю., Багайников М.Л. Бассейновый подход к формированию институтов экономического развития региона (применительно к Байкальскому региону). Вестник Забайкальского государственного университета, 2020. Т. 26. № 5. С. 106–117. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-5-106-117.

Dangermond J. GIS Foreword. World Spatial Metadata Standards, 2005. P. XV–XVI.

Erunova M.G., Yakubailik O.E. Zoning of the territory on the basis of morphometric analysis of basin geosystems. IOP Conference Series. Earth and Environmental Sciences, 2020. T. 421. P. 062039. DOI: 10.1088/1755-1315/421/6/062039.

Erunova M.G., Yakubailik O.E., Sadovsky M.G. Annual temperature variation reliably identifies different sites in a large water basin. IOP Conference Series. Materials Science & Engineering, 2020. V. 862. P. 062060. DOI: 10.1088/1757-899X/862/6/062060.

Gorban A.N., Zinovyev A. Fast and user-friendly non-linear principal manifold learning by method of elastic maps. 2015 IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA). Paris. France, 2015. P. 1–9. DOI: 10.1109/DSAA.2015.7344818.

Haag S., Schwartz D., Shakibajahromi B., Campagna M., Shokoufandeh A. A fast algorithm to delineate watershed boundaries for simple geometries. Environmental Modelling & Software, 2020. V. 134. P. 104842. DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104842.

Lindsay J.B. Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis. Computers & Geosciences, 2016. V. 95. P. 75–84. DOI: 10.1016/j.cageo.2016.07.003.

Murray N.J., Keith D.A., Bland L.M., Legoretta L.F. The role of satellite remote sensing in structured ecosystem risk assessments. Science of The Total Environment, 2018. V. 619–620. P. 249–257. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.034.

Neumann A., Saber A., Arnillas C.A., Shimoda Yu. Implementation of a watershed modelling framework to support adaptive management in the Canadian side of the Lake Erie basin. Ecological Informatics, 2021. V. 66. P. 101444. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2021.101444.

Schmidt P., Morrison T.H. Watershed management in an urban setting: process, scale and administration. Land use policy, 2012. V. 29. No. 1. P. 45–52. DOI: 10.1016/j.landusepol. 2011.05.003.

Sun Y., Hao R., Qiao J., Xue H. Function zoning and spatial management of small watersheds based on ecosystem disservice bundles. Journal of Cleaner Production, 2020. V. 255. P. 120285. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120285.

Yakubailik O.E., Yakubaylik T.V. Analysis of accumulated precipitation based on satellite data in Central Siberia. IOP Conference Series. Earth and Environmental Sciences, 2020. V. 548. No. 3. P. 032025. DOI: 10.1088/1755-1315/548/3/032025.

Yamazaki D., Ikeshima D., Sosa J., Bates P.D., Allen G.H., Pavelsky T.M. MERIT Hydro: A high-resolution global hydrography map based on latest topography dataset. Water Resources Research, 2019. V. 55. No. 6. P. 5053–5073. DOI: 10.1029/2019WR024873.

REFERENCES

Bartalev S., Egorov V., Zharko V., Loupian E., Plotnikov D., Khvostikov S., Shabanov N. Land cover mapping over Russia using Earth observation data. Moscow: Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, 2016. 208 p. (in Russian).

Braslavskaya T.Yu., Kolbowsky E.Yu., Esipova E.S., Korotkov V.N., Nemchinova A.V., Churakova E.Yu., Kozykin A.V., Kulyasova A.A., Aleinikov A.A. The Landscape-Basin Approach for Ecological Evaluation of Intact Forest Areas on the Onega Peninsula (Russia). Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya, 2020. V. 84(6). P. 905–919 (in Russian). DOI: 10.31857/S2587556620060035.

Dangermond J. GIS Foreword. World Spatial Metadata Standards, 2005. P. XV–XVI.

Erunova M.G., Yakubailik O.E. Zoning of the territory on the basis of morphometric analysis of basin geosystems. IOP Conference Series. Earth & Environmental Science, 2020. V. 421. P. 062039 (in Russian). DOI: 10.1088/1755-1315/421/6/062039.

Erunova M.G., Yakubailik O.E., Sadovsky M.G. Annual temperature variation reliably identifies different sites in a large water basin. IOP Conference Series. Materials Science & Engineering, 2020. V. 862. P. 062060 (in Russian). DOI: 10.1088/1757-899X/862/6/062060.

Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A., Izhitskiy A.S., Soloviov D.M. The drying dynamics of the Western Large Aral Sea from satellite data (2002–2021). Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2022. V. 19. No. 5. P. 246–263 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-246-263.

Gorban A. N., Zinovyev A. Fast and user-friendly non-linear principal manifold learning by method of elastic maps. 2015 IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA). Paris. France, 2015. P. 1–9. DOI: 10.1109/DSAA.2015.7344818.

Haag S., Schwartz D., Shakibajahromi B., Campagna M., Shokoufandeh A. A fast algorithm to delineate watershed boundaries for simple geometries. Environmental Modelling & Software, 2020. V. 134. P. 104842. DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104842.

Kuzmenko Ya.V., Lisetsky F.N., Narozhnaya A.G. Application the basin concept of environmental management for soil-water safety arrangement of agrolandscapes. Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2012. V. 14. No. 1(9). P. 2432–2435 (in Russian).

Kuznetsova T.I. Geosystems mapping for solving the problems of sustainable development of lake Baikal basin within the transboundary area of Russia and Mongolia. Proceedings of the International conference “InterCarto. InterGIS”, 2016. V. 22. No. 1. P. 297–309 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-297-309.

Lindsay J.B. Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis. Computers & Geosciences, 2016. V. 95. P. 75–84. DOI: 10.1016/j.cageo.2016.07.003.

Loupian E.A., Bartalev S.A., Krasheninnikova Yu.S., Plotnikov D.E., Tolpin V.A., Uvarov I.A. Analysis of winter crops development in the southern regions of the European part of Russia in spring of 2018 with use of remote monitoring. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2018. V. 15. No. 2. P. 272–276 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-272-276.

Makarova M.A., Vladimirova N.A. The review of the Internet open spatial resources on Earth's vegetation cover. Botanical journal, 2020. V. 105. No. 4. P. 387–407 (in Russian). DOI: 10.31857/S0006813620040067.

Murray N.J., Keith D.A., Bland L.M., Legoretta L.F. The role of satellite remote sensing in structured ecosystem risk assessments. Science of The Total Environment, 2018. V. 619–620. P. 249–257. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.034.

Neumann A., Saber A., Arnillas C.A., Shimoda Yu. Implementation of a watershed modelling framework to support adaptive management in the Canadian side of the Lake Erie basin. Ecological Informatics, 2021. V. 66. P. 101444. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2021.101444.

Rogov V., Bagaynikov M. Pool approach to the formation of institutions of economic development of the region (applicable to the Baikal region). Transbaikal State University Journal, 2020. V. 26. No. 5. P. 106–117 (in Russian). DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-5-106-117.

Schmidt P., Morrison T.H. Watershed management in an urban setting: process, scale and administration. Land use policy, 2012. V. 29. No. 1. P. 45–52. DOI: 10.1016/j.landusepol.2011.05.003.

Sun Y., Hao R., Qiao J., Xue H. Function zoning and spatial management of small watersheds based on ecosystem disservice bundles. Journal of Cleaner Production, 2020. V. 255. P. 120285. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120285.

Yakubailik O.E., Yakubalik T.V. Analysis of accumulated precipitation based on satellite data in Central Siberia. IOP Conference Series. Earth Environmental Sciences, 2020. V. 548. No. 3. P. 032025 (in Russian). DOI: 10.1088/1755-1315/548/3/032025

Yamazaki D., Ikeshima D., Sosa J., Bates P.D., Allen G.H., Pavelsky T.M. MERIT Hydro: A high-resolution global hydrography map based on latest topography dataset. Water Resources Research, 2019. V. 55. No. 6. P. 5053–5073. DOI: 10.1029/2019WR024873.

Yermolaev O.P., Maltsev K.A., Mozzherin V.V., Mozzherin V.I. Global Geoinformation system "Suspended sediment yield in the river basins of the Earth". Geomorfologiya i Paleogeografiya. 2012. No. 2. P. 50–58 (in Russian). DOI: 10.15356/0435-4281-2012-2-50-58.

Zherelina I.V. Basin approach in environmental management. PhD dissertation. Barnaul, 1999. 203 p.

УДК: 502/504+631.4+551.58 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-574-588**

И.О. Алябина[1], **О.В. Чернова**[2], **А.А. Присяжная**[3], **О.В. Решоткин**[4]

ПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ ЗАПОВЕДНИКОВ И НАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРКОВ КАК ОТРАЖЕНИЕ ЗОНАЛЬНО-РЕГИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

АННОТАЦИЯ

Оценена представленность разнообразия основных природных комплексов России в федеральных особо охраняемых природных территориях (ООПТ) на основе сравнения их почвенного покрова с почвенным покровом территориальных единиц Карты почвенно-экологического районирования Российской Федерации 2019 г. Выявлена высокая репрезентативность в отношении почвенного покрова сети ООПТ полярного пояса и удовлетворительная — бореального пояса. С продвижением на юг представленность разнообразия природных комплексов на охраняемых территориях заметно снижается, принимая минимальные значения в степных и сухостепных регионах. В горных ООПТ почвенный покров хорошо и средне отражает разнообразие природных условий горных почвенных провинций; в большинстве случаев хорошо представлен почвенный покров высокогорий, значительно хуже — низкогорий и наиболее плодородных почв соответствующих горных провинций (дерново-карбонатных, горных черноземовидных, лугово-степных). Несмотря на относительное благополучие, отмеченное при анализе на уровне почвенных зон (подзон), рассмотрение на уровне равнинных почвенных провинций позволило выявить неблагополучные в этом отношении регионы. Шесть из 14 равнинных почвенных провинций без ООПТ расположены в Западной Сибири, где равнинный рельеф, обусловливающий хорошо выраженную зональность ландшафтов, позволил проследить климатические тренды последних десятилетий. Этот регион выбран в качестве модельного для оценки потребности в организации дополнительных ООПТ в связи с изменением климата. Анализ климатических трендов последних десятилетий выявил климатические изменения, наиболее выраженные в экстремальных по климатическим параметрам регионах: северных и южных равнинных почвенных зонах (подзонах). Причем в наиболее холодной северной части региона отмечается максимальное повышение температуры воздуха, а в аридной южной — максимальное снижение влажности воздуха. Реализация планов по созданию 4 новых заповедников на юге Западной Сибири существенно повысит репрезентативность сети ООПТ по отношению к почвенному покрову и позволит оптимизировать государственную систему опорных объектов фонового экологического мониторинга.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геоинформационный анализ, репрезентативность ООПТ, почвенный покров, изменение климата

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, Ленинские горы, д. 1/12, Москва, Россия, 119991, *e-mail:* **alio@yandex.ru**

[2] Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Ленинский пр-т, д. 33, Москва, Россия, 119071, *e-mail:* **ovcher@mail.ru**

[3] Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ул. Институтская, д. 2, Пущино, Московская обл., Россия, 142290, *e-mail*: **alla_pris@rambler.ru**

[4] Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, ул. Институтская, д. 2, Пущино, Московская обл., Россия, 142290, *e-mail:* **reshotkin@rambler.ru**

Irina O. Alyabina[1], **Olga V. Chernova**[2], **Alla A. Prisyazhnaya**[3], **Oleg V. Reshotkin**[4]

SOIL COVER OF NATURE RESERVES AND NATIONAL PARKS AS A REFLECTION OF THE ZONAL AND REGIONAL FEATURES OF THE TERRITORY OF RUSSIA

ABSTRACT

The representation of the diversity of the main natural complexes of Russia in federal specially protected natural areas (SPNA) was assessed based on a comparison of their soil cover with the soil cover of territorial units of the Map of soil-ecological zoning of the Russian Federation (2019). A high representativeness in relation to the soil cover of the SPNA systems of the polar belt and a satisfactory one of the boreal belt was revealed. Moving southward, the representation of the diversity of natural complexes in the protected areas decreases markedly, taking the minimum values in the steppe and dry-steppe regions. In mountain protected areas the soil cover reflects the diversity of natural conditions of mountain soil provinces well and average, in most cases the soil cover of high mountains is well represented and significantly worse — of low mountains and the most fertile soils of the corresponding mountain provinces (soddy-calcareous, mountain chernozem-like, meadow-steppe). In spite of relative prosperity noted in the analysis at the level of soil zones (subzones), consideration at the level of plain soil provinces allowed revealing unfavorable regions in this respect. Six of the 14 plain soil provinces without SPNA are located in Western Siberia, where the flat relief, which determines the well-defined zonality of landscapes, allowed to trace the climatic trends of recent decades. This region has been chosen as a model to assess the need for additional SPNA due to climate change. Analysis of climatic trends in recent decades has revealed climatic changes most pronounced in the extreme climatic regions: the northern and southern flat soil zones (subzones). Moreover, in the coldest northern part of the region there is a maximum increase in air temperature, and in the arid southern part there is a maximum decrease in air humidity. The implementation of plans to create four new nature reserves in the south of Western Siberia will significantly increase the representativeness of the network of SPNA in relation to the soil cover and will optimize the state system of reference objects of background environmental monitoring.

KEYWORDS: geoinformation analysis, representativeness of SPNAs, soil cover, climate change

ВВЕДЕНИЕ

Сеть ООПТ Российской Федерации имеет более чем вековую историю и представляет собой систему минимально нарушенных природных территорий, полностью или частично изъятых из хозяйственного использования, которая охватывает бóльшую часть природных зон страны. Основу природно-заповедного фонда составляют государственные природные заповедники и национальные парки, в задачи которых, в отличие от ООПТ других категорий, входит сохранение в естественном состоянии

[1] Lomonosov Moscow State University, 1/12, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **alio@yandex.ru**

[2] Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, 33, Leninsky ave., Moscow, 119071, Russia, *e-mail:* **ovcher@mail.ru**

[3] Institute of Fundamental Problems of Biology of the Russian Academy of Sciences, 2, Institutskaya str., Pushchino, Moscow oblast, 142290, Russia, *e-mail:* **alla_pris@rambler.ru**

[4] Institute of Physico-Chemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences, 2, Institutskaya str., Pushchino, Moscow oblast, 142290, Russia, *e-mail:* **reshotkin@rambler.ru**

природных комплексов, ведение научно-исследовательской работы и осуществление государственного экологического мониторинга[1,2].

Фундамент природоохранной теории в нашей стране закладывался одновременно со становлением биогеографии, биогеоценологии и почвоведения как самостоятельных наук. Основным принципом, сформулированным пионерами заповедного дела: И.П. Бородиным, В.В. Докучаевым, Г.А. Кожевниковым, А.П. и В.П. Семеновыми-Тян-Шанскими, В.Н. Сукачевым и др. в начале XX в., являлось сохранение естественных природных комплексов с тем, чтобы проводить научные наблюдения вне сферы хозяйственной деятельности [*Добровольский*, 1996; *Штильмарк*, 1996]. Однако в большинстве случаев охраняемые природные территории учреждались для сбережения ценных объектов живой природы (редких видов растений и животных, мест гнездовий птиц и т. п.), в отдельных случаях — для охраны редких геологических образований, и до последнего времени основным критерием успешности функционирования системы ООПТ считается ее репрезентативность в отношении биологического разнообразия. Лишь в конце XX в., когда все больше стали говорить о необходимости сохранения в ненарушенном состоянии типичных для определенных регионов ненарушенных экосистем в качестве «эталонов», появилось стремление создать сеть охраняемых территорий, репрезентативно представляющую природное разнообразие страны.

Выраженные климатические тренды последних десятилетий и необходимость мониторинга их влияния на изменение биологических круговоротов вещества и энергии и функционирования природных систем делают требование репрезентативности системы ООПТ еще более актуальным. В соответствии с Программой работ по охраняемым территориям, принятой в 2004 г. на VII конференции Сторон Конвенции по биологическому разнообразию, одной из основных задач является создание репрезентативных систем ООПТ на национальном и региональном уровнях [*Шестаков*, 2009]. В 2009 г. была опубликована первая в нашей стране работа, посвященная анализу репрезентативности системы федеральных ООПТ на основе анализа большого объема материалов, характеризующих в целом для страны разнообразие физико-географических условий, экологическое, ландшафтное, а также видовое разнообразия растений и животных [*Кревер* и др., 2009]. Актуальная репрезентативность федеральной системы ООПТ и перспективы ее дальнейшего развития рассмотрены в работе М.С. Стишова [2020]. Следует отметить, что при составлении планов развития государственной системы ООПТ особенности почвенного покрова традиционно игнорируются, несмотря на то, что имеется целый ряд исследований, посвященных анализу репрезентативности системы ООПТ всей страны и отдельных регионов в отношении почвенного разнообразия [*Чернова*, 2012; *Присяжная* и др., 2016; 2021 и др.].

Педосфера — центральное звено, связывающее воедино геосферные и биосферные компоненты Земли. Продукционная способность почвенного покрова, его средообразующие, газо-, водорегулирующие и санитарные функции являются ведущими механизмами, обеспечивающими существование биосферы [*Добровольский*, *Никитин*, 1990; *Daily*, 1999 и др.]. Высокая пространственная неоднородность педосферы на разных уровнях — от микроагрегатов до комплексности почвенного покрова — обеспечивает сосуществование огромного разнообразия видов растений, животных и микроорганизмов в наземных экосистемах [*Добровольский* и др., 2011; *Ibàñez* et al., 1995; *Amundson*, 2000]. В свою очередь, особенности почвенного покрова отражают биоклиматические и литолого-

[1] Федеральный закон от 14.03.1995 № 33-ФЗ (ред. от 28.06.2022) «Об особо охраняемых природных территориях».

[2] Концепция развития системы особо охраняемых природных территорий федерального значения на период до 2020 года (Утв. распоряжением Правительства РФ от 22 декабря 2011 г. № 2322-р.

геоморфологические характеристики регионов, а также геологическую историю территории. По-видимому, представленность типичных для различных территорий структур почвенного покрова страны в пределах охраняемых территорий может обеспечить репрезентативность природных комплексов в системе ООПТ. Представляется, что в настоящее время наиболее корректным подходом для определения того, насколько это условие выполняется, является анализ расположения ООПТ на картах почвенно-экологического районирования (ПЭР), которое как раз и заключается в выделении территорий, однотипных по структуре почвенного покрова, сочетанию факторов почвообразования и возможностям хозяйственного использования почв [*Урусевская* и др., 2015].

Цель настоящей работы — оценка текущей представленности разнообразия основных природных комплексов России на основе сравнения их почвенного покрова с почвенным покровом территориальных единиц Карты почвенно-экологического районирования Российской Федерации [*Урусевская* и др., 2019] и перспективы ее повышения в федеральных ООПТ. Соответственно поставлены следующие задачи:

– оценить представленность почвенного покрова территориальных единиц ПЭР в пределах государственных заповедников и национальных парков;
– на примере модельного региона оценить необходимость организации дополнительных ООПТ в связи с изменением климата;
– рассмотреть возможности повышения эффективности сети объектов национального экологического, в т. ч. климатического мониторинга за счет повышения репрезентативности сети опорных объектов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно Карте почвенно-экологического районирования 2019 г., на территории России выделено:

- 4 географических пояса;
- 10 почвенно-биоклиматических областей;
- 16 почвенных зон (подзон) равнинных территорий, состоящих из 68 почвенных провинций;
- 33 горные почвенные провинции.

В пределах зон (подзон), равнинных почвенных провинций и горных почвенных провинций была проведена оценка наличия ООПТ федерального уровня, а именно заповедников и национальных парков, а также представленности разнообразия природных комплексов на основе сопоставления почвенного покрова ООПТ и территориальной единицы ПЭР в целом.

Модельным регионом послужила равнинная территория Западной Сибири, включающая:

- подзону арктотундровых почв арктической тундры (Б);
- подзону тундровых глеевых почв и подбуров субарктической тундры (В);
- подзону глееподзолистых почв, глееземов и подзолов северной тайги (Г);
- подзону подзолистых почв средней тайги (Д);
- зону дерново-подзолистых почв южной тайги (Е);
- зону серых лесных почв лиственных лесов (Л);
- зону оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи (М);
- зону обыкновенных и южных черноземов степи (Н);
- зону темно-каштановых и каштановых почв сухой степи (О).

Климатические карты для территории Западной Сибири построены в программе MapInfo Professional v. 17.0.4. на основе данных метеорологических станций сети Росгидромета с длительными рядами наблюдений о температуре воздуха (259 станций) и влажности воздуха (68 станций).

Для почвенных зон (подзон) были рассчитаны средние многолетние параметры климатических данных. Оценивали изменение температуры воздуха, сравнивая усредненные данные за десятилетие 2011–2020 гг. и период 1961–1990 гг. — тридцатилетие, принятое в качестве климатической нормы[1]. Для показателя влажности воздуха ввиду ограниченности данных проведено сопоставление периода 2011–2020 гг. с 1966–1990 гг. без учета подзоны арктотундровых почв арктической тундры и зоны темно-каштановых и каштановых почв сухой степи.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Представленность разнообразия природных комплексов территориальных единиц ПЭР в заповедниках и национальных парках

Представленность в системе ООПТ разнообразия природных комплексов на первом этапе рассматривалась в опорных единицах ПЭР, которыми в равнинных условиях является почвенная зона (подзона), а в горах — горная почвенная провинция [*Урусевская* и др., 2015]. В целом для равнинной территории страны характерно разной степени соответствие почвенного покрова ООПТ и зоны (подзоны).

Высока репрезентативность в отношении почвенного покрова ООПТ полярного пояса, несмотря на то что заповедники и национальные парки не всегда представительны для почвенного покрова провинций, в которых они расположены. Достаточно хорошо почвенный покров охраняемых территорий отражает природные условия бореального пояса, за исключением зоны дерново-подзолистых почв южной тайги (Е) и подзоны глееземов таежных торфянисто-перегнойных северной тайги (Ж). Так, на охраняемых территориях не представлены перегнойно-карбонатные, дерново-карбонатные и дерново-таежные почвы с соответствующими природными комплексами.

К югу ситуация меняется: в зонах серых лесных почв лиственных лесов (Л) и буроземов и подзолисто-буроземных почв хвойно-широколиственных и широколиственных лесов (П) почвенный покров представлен на охраняемых территориях частично, т. е. там отсутствуют отдельные широко распространенные, типичные для некоторых провинций почвы. Это касается, в частности, серых лесных почв со вторым гумусовым горизонтом и луговых черноземовидных почв. В большинстве случаев такая ситуация возникает при отсутствии заповедников или национальных парков в провинциях со сложным почвенным покровом, заметно отличающемся по составу от окружающих территорий.

Еще южнее — в зонах оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи (М), обыкновенных и южных черноземов степи (Н), темно-каштановых и каштановых почв сухой степи (О) — представленность разнообразия природных комплексов минимальна. Почвенный покров имеющихся в их пределах ООПТ слабо соотносится с почвенным покровом зон в целом.

На большей части горных территорий почвенный покров заповедников и национальных парков хорошо и средне отражает разнообразие почв горных почвенных провинций; лишь в 3 провинциях — Полярно-Уральской, Верхоянской и Приенисейской — государственные заповедники и национальные парки отсутствуют. Все горные системы характеризуются разнообразным в типологическом отношении почвенным покровом, в

[1] *Решоткин О.В., Алябина И.О., Худяков О.И.* Изменение атмосферного и почвенного климата Западной Сибири в условиях современного потепления. Географическая среда и живые системы, 2023. В печати.

большинстве горных провинций имеются значительные по площади охраняемые территории, которые обеспечивают высокую представленность почвенного покрова высокогорий и более низкую — наиболее плодородных почв соответствующих горных провинций (дерново-карбонатных, горных черноземовидных, лугово-степных), а также почв низкогорий.

Несмотря на относительное благополучие, отмеченное при рассмотрении представленности разнообразия природных комплексов на уровне почвенных зон (подзон), анализ на уровне более мелких таксономических единиц районирования — равнинных почвенных провинций — позволил выявить неблагополучные в этом отношении регионы. В целом ряде провинций вообще отсутствуют заповедники и национальные парки, или на их территориях не представлены типичные для региона природные комплексы (рис. 1, табл. 1). Шесть из этих 14 равнинных почвенных провинций без ООПТ расположены в Западной Сибири, где равнинный рельеф, обусловливающий хорошо выраженную зональность ландшафтов, позволяет проследить климатические тренды последних десятилетий.

Рис. 1. Представленность разнообразия природных комплексов равнинных почвенных провинций и горных почвенных провинций в заповедниках и национальных парках (названия зон (подзон), индексы которых размещены на карте, см. в тексте)
Fig. 1. The nature ecosystems diversity representation of plain soil provinces and mountain soil provinces in reserves and national parks (the names of zones (subzones), whose indices are placed on the map, see the text)

Изменение атмосферного климата Западной Сибири

Как известно, глобальное потепление не подразумевает повсеместного равномерного повышения температуры, климатические изменения в разных регионах происходят метахронно. В соответствии с «Оценочным докладом об изменениях климата и

их последствиях на территории Российской Федерации»[1], повышение среднегодовой температуры на территории России ожидается значительно большим, чем в среднем на земном шаре; зимой предполагается увеличение осадков на всей территории страны, а летом знак изменения осадков зависит от региона. Гидротермическим режимом почв в значительной степени определяется уровень биологической продуктивности экосистем и вовлечение в почвенные процессы органического углерода. Соответственно, крайне важно изучение реакции почвы и почвенной биоты на стрессовые изменения погодных условий, причем эту реакцию необходимо оценивать на иерархическом уровне ландшафта с акцентом на адаптивную динамику сообществ [*Кудеяров* и др., 2009].

Табл. 1. Равнинные почвенные провинции без заповедников и национальных парков
Table 1. Plain soil provinces without reserves and national parks

№ пп	Индекс почвенной провинции	Почвенная провинция	Зона (подзона)
1	Б1	Северо-Европейская	Подзона арктотундровых почв арктической тундры
2*	**В3**	**Западно-Сибирская тундровая**	Подзона тундровых глеевых почв и подбуров субарктической тундры
3	Е6	Приангарская	Зона дерново-подзолистых почв южной тайги
4	И1	Западно-Камчатская	Зона лесных вулканических почв
5	**Л4**	**Приалтайская**	Зона серых лесных почв лиственных лесов
6	Л5	Средне-Сибирская лиственно-лесная	
7	**М3**	**Западно-Сибирская лесостепная**	Зона оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи
8	М6	Иркутско-Черемховская	
9	Н1	Предкавказская	Зона обыкновенных и южных черноземов степи
10	**Н5**	**Западно-Сибирская степная**	
11	**Н6**	**Предалтайская степная**	
12	Н8	Забайкальская	
13	О1	Восточно-Предкавказская	Зона темно-каштановых и каштановых почв сухой степи
14	**О5**	**Предалтайская сухостепная**	

* Жирным шрифтом выделены равнинные почвенные провинции Западной Сибири

В качестве модельного региона для оценки необходимости организации дополнительных ООПТ в связи с изменением климата была выбрана Западная Сибирь. В ряде публикаций отмечены особенности климата и тенденции временных изменений температуры этого региона [*Трофимова*, *Балыбина*, 2014; 2015; *Харюткина*, *Логинов*, 2019; *Шполянская* и др., 2022]; кроме того, установлено, что потепление имеет зональный характер[2].

[1] Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. РОСГИДРОМЕТ, 2008. 28 с.

[2] *Решоткин О.В., Алябина И.О., Худяков О.И.* Изменение атмосферного и почвенного климата Западной Сибири в условиях современного потепления. Географическая среда и живые системы, 2023. В печати.

Увеличение температуры воздуха наиболее существенно проявляется в северных зонах (подзонах). Оно наблюдается во все сезоны года, но особенно ярко выражено в весенний и зимний периоды (рис. 2). Температура воздуха в подзонах арктической и субарктической тундры и северной тайги в 2011–2020 гг. увеличилась относительно климатической нормы в весенний сезон на 4–4,9 °С, в зимний сезон — на 3,1–3,4 °С в подзонах субарктической тундры и северной тайги, а в подзоне арктической тундры отмечается максимальный рост температуры воздуха — на 6,0 °С.

Сопоставление средних многолетних значений влажности воздуха в 2011–2020 и 1966–1990 гг. показало разностороннюю направленность изменения этого параметра (рис. 3). Незначительное увеличение влажности воздуха в последнее десятилетие относительно более раннего периода отмечается в ряде почвенных зон (подзон) в течение всего года, в зимний сезон — на всей рассматриваемой территории. В целом установленная среднегодовая динамика демонстрирует увеличение влажности атмосферного воздуха до 1 % в подзоне глееподзолистых почв, глееземов и подзолов северной тайги и подзоне подзолистых почв средней тайги и снижение влажности до 2 % на остальной территории. Максимальное снижение влажности воздуха по сезонам на величину более 2 % наблюдается в подзоне тундровых глеевых почв и подбуров субарктической тундры (лето), зоне серых лесных почв лиственных лесов и зоне оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи (весна), а также зоне обыкновенных и южных черноземов степи (весна и лето). Таким образом, на большей части территории Западной Сибири уменьшение относительной влажности воздуха наблюдается в теплый период года, тогда как в холодный период года влажность воздуха почти не изменилась или незначительно увеличилась. Несмотря на то, что корреляция между температурой воздуха и влажностью очень высока, зависимость относительной влажности от температуры воздуха в эти периоды года имеет разный характер.

Наиболее выраженные изменения климата отмечены для экстремальных по климатическим параметрам регионов: северных и южных равнинных почвенных зон (подзон) Западной Сибири. Причем в наиболее холодной северной части территории отмечается максимальное повышение температуры воздуха, а в аридной южной — максимальное снижение влажности воздуха. Уменьшение влажности воздуха в весенне-летний период на юге Западной Сибири способствует увеличению физического испарения с поверхности почвы и формированию весенних и летних засух. Аналогичные тренды нарастания аридности климата и повышения рисков атмосферных засух отмечаются в последние десятилетия и в сухостепных районах Европейской части страны, в частности в аридных зонах Поволжья [*Губарев* и др., 2022].

Потенциальные возможности повышения репрезентативности сети опорных объектов

Как было отмечено выше, особенно низка репрезентативность системы федеральных ООПТ в отношении почвенного покрова лесостепных и степных почвенных зон. Почти в половине равнинных провинций этих регионов нет ни заповедников, ни национальных парков, а некоторые из имеющихся заповедников созданы для сохранения интразональных или азональных природных комплексов (пойменных экосистем, водно-болотных угодий и др.). Большая часть этой территории изменена сельскохозяйственной деятельностью; соответственно, здесь особенно высока потребность в организации опорных объектов мониторинга естественных или минимально нарушенных природных комплексов для сравнения их функционирования с антропогенно-преобразованными аналогами. Наименее обеспечены территориальной охраной равнинные степные провинции Западной Сибири, в которых, как показано выше, необходима организация опорных пунктов экологического мониторинга.

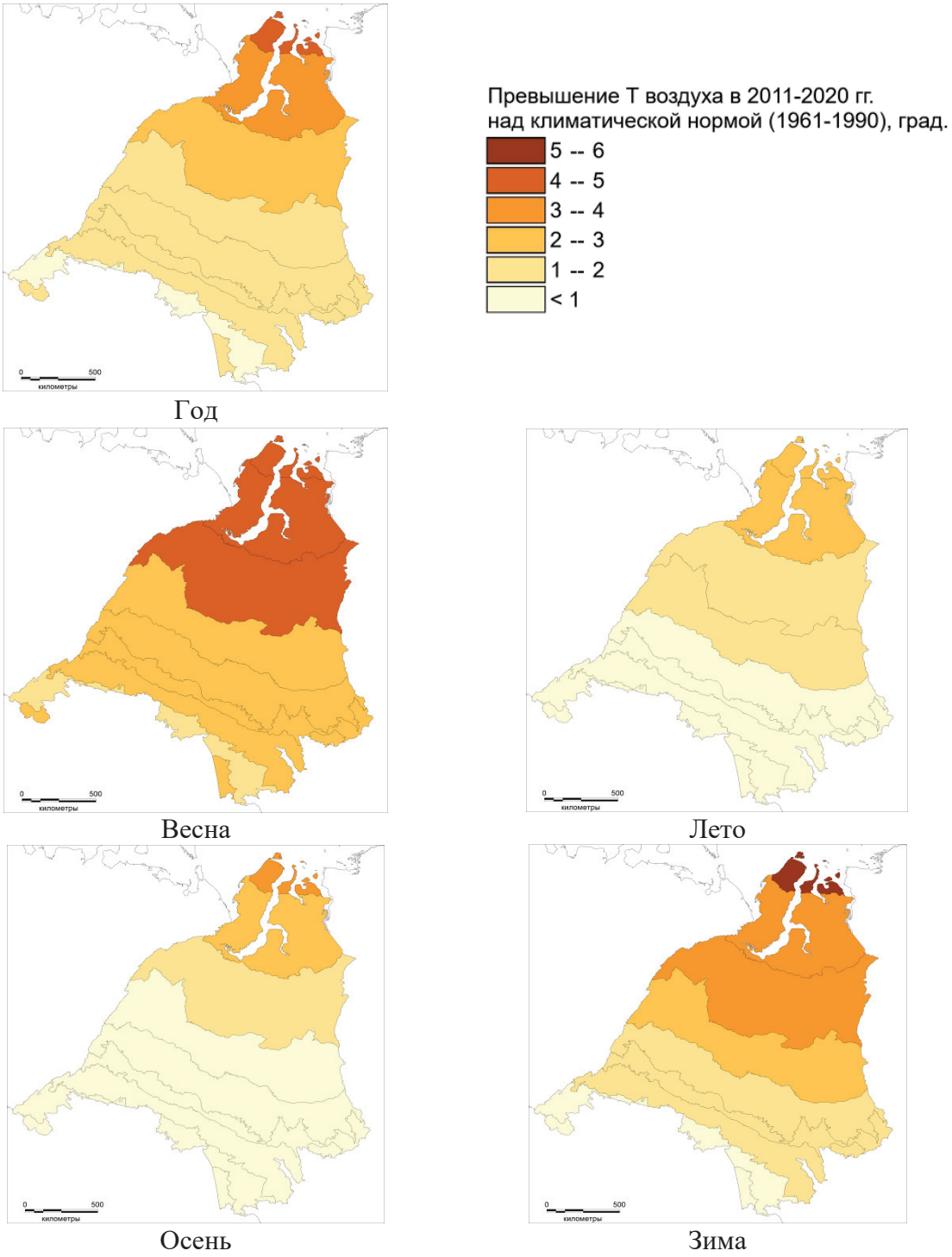


Рис. 2. Среднегодовая и сезонная динамика повышения температуры воздуха (°С) в границах почвенных провинций[1]

Fig. 2. Average annual and seasonal dynamics of air temperature increase (°C) within the boundaries of soil provinces

[1] *Решоткин О.В., Алябина И.О., Худяков О.И.* Изменение атмосферного и почвенного климата Западной Сибири в условиях современного потепления. Географическая среда и живые системы, 2023. В печати.

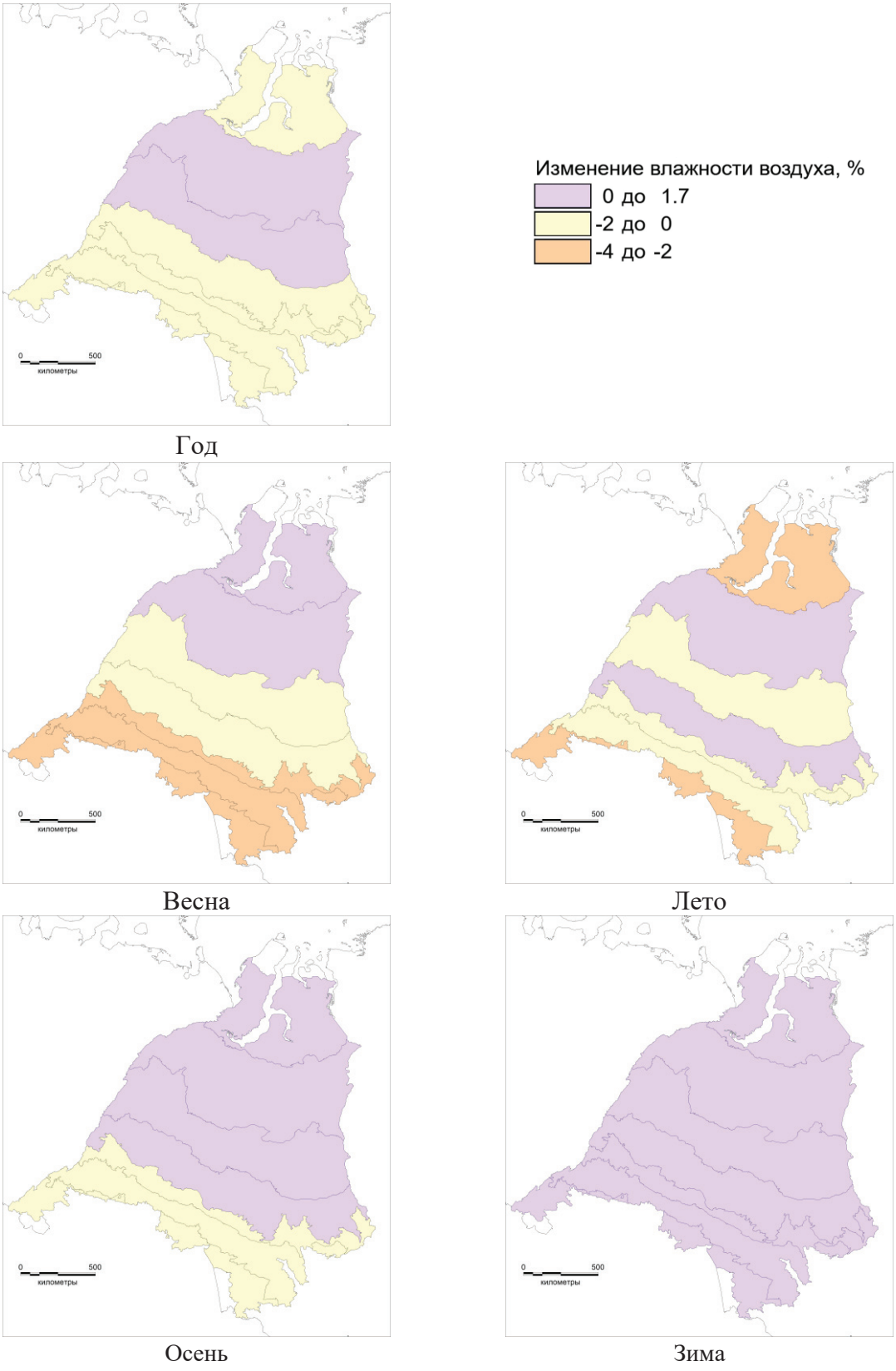


Рис. 3. Среднегодовая и сезонная динамика влажности воздуха (%) в границах почвенных провинций
Fig. 3. Average annual and seasonal dynamics of air humidity (%) within the boundaries of soil provinces

Согласно Плану мероприятий по реализации Концепции развития системы особо охраняемых природных территорий федерального значения на период до 2020 г.[1] было запланировано создание 31 охраняемой территории федерального значения (заповедники и национальные парки). Однако до настоящего времени не реализована организация 7 заповедников (из них 5 степных) и 6 национальных парков. Четыре охраняемые территории должны располагаться в пределах степных провинций Западной Сибири (рис. 4), причем необходимость создания некоторых из них, например Барабинского заповедника, обсуждается с середины прошлого века. Насущная потребность в организации постоянных площадок экологического мониторинга для исследования влияния изменения климата на функционирование природных систем и биогеохимических циклов элементов может служить дополнительным аргументом в поддержку создания степных заповедников Западной Сибири.

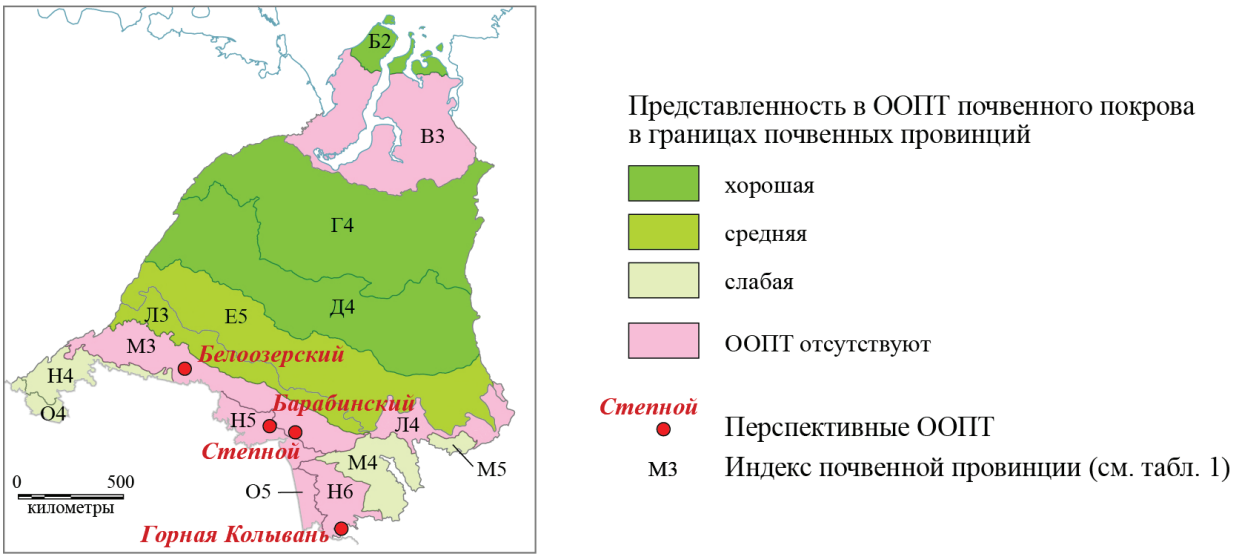


Рис. 4. Представленность разнообразия природных комплексов равнинных почвенных провинций в заповедниках и национальных парках и расположение перспективных ООПТ в Западной Сибири
Fig. 4. The nature ecosystems diversity representation of plain soil provinces in reserves and national parks and the location of planned protected areas in Western Siberia

ВЫВОДЫ

Оценка представленности разнообразия основных природных комплексов России в федеральных ООПТ на основе сравнения их почвенного покрова с почвенным покровом территориальных единиц Карты почвенно-экологического районирования Российской Федерации 2019 г. выявила высокую репрезентативность в отношении почвенного покрова ООПТ полярного пояса и удовлетворительную — бореального пояса. С продвижением на юг представленность разнообразия природных комплексов на охраняемых территориях заметно снижается, принимая минимальные значения в степных и сухостепных регионах.

В горных ООПТ почвенный покров хорошо и средне отражает разнообразие природных условий горных почвенных провинций; в большинстве случаев хорошо

[1] План мероприятий по реализации Концепции развития системы особо охраняемых природных территорий федерального значения на период до 2020 г. (утв. расп. Правительства РФ от 22 декабря 2011 г. № 2322-р).

представлен почвенный покров высокогорий, значительно хуже — низкогорий и наиболее плодородных почв соответствующих горных провинций (дерново-карбонатных, горных черноземовидных, лугово-степных).

Анализ климатических трендов последних десятилетий для равнинной территории Западной Сибири выявил климатические изменения, наиболее выраженные в экстремальных по климатическим параметрам регионах: северных и южных равнинных почвенных зонах (подзонах), причем в наиболее холодной северной части территории отмечается максимальное повышение температуры воздуха, а в аридной южной — максимальное снижение влажности воздуха.

Реализация планов по созданию 4 новых государственных заповедников в пределах лесостепных, степных и сухостепных равнинных почвенных зон Западной Сибири существенно повысит представленность разнообразия структур почвенного покрова в ООПТ федерального уровня и позволит оптимизировать государственную систему участков фонового экологического мониторинга.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по теме № 1736-р Аграрного центра МГУ имени М.В. Ломоносова, теме научного проекта РНФ № 22-14-00107 ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» и темам государственного задания № 122040500036-9 «Влияние климатических флуктуаций и антропогенной деятельности на эволюцию и современное состояние почв юга России» и № 122041200035-2 «Разработка научных основ методов снижения техногенного загрязнения окружающей среды и экомониторинг состояния естественных и антропогенно измененных экосистем».

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was performed on the theme No. 1736-r of the Lomonosov Moscow State University Agrarian Centre, the theme of the Russian Science Foundation research project No. 22-14-00107 FSBEI of HE M.V. Lomonosov Moscow State University and the themes of the state task No. 122040500036-9 “Influence of climatic fluctuations and anthropogenic activity on the evolution and current state of soils in southern Russia” and No. 122041200035-2 “Development of scientific bases of methods to reduce technogenic pollution of the environment and eco-monitoring of the state of natural and anthropogenically modified ecosystems”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Губарев Д.И., Левицкая Н.Г., Деревягин С.С. Влияние изменений климата на деградацию почв в аридных зонах Поволжья. Аридные экосистемы, 2022. Т. 28. № 1. С. 20–27.

Добровольский Г.В. В.В. Докучаев как выдающийся эколог. Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение, 1996. № 3. С. 3–8.

Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Функции почв в биосфере и экосистемах (Экологическое значение почв). М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 1990. 260 с.

Добровольский Г.В., Чернов И.Ю., Бобров А.А., Добровольская Т.Г., Лысак Л.В., Онипченко В.Г., Гонгальский К.Б., Зайцев А.С., Терехова В.А., Соколова Т.А., Терехин В.Г., Шмарикова Е.В., Чернова О.В. Роль почвы в формировании и сохранении биологического разнообразия. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2011. 273 с.

Кревер В.Г., Стишов М.С., Онуфреня И.А. Особо охраняемые природные территории России: современное состояние и перспективы развития. М.: Орбис Питкус, 2009. 456 с.

Кудеяров В.Н., Демкин В.А., Гиличинский Д.А., Горячкин С.В., Рожков В.А. Глобальные изменения климата и почвенный покров. Почвоведение, 2009. № 9. С. 1027–1042.

Присяжная А.А., Хрисанов В.Р., Митенко Г.В., Чернова О.В., Снакин В.В. Анализ почвенного разнообразия заповедников и национальных парков России (с учетом новых территорий). Геодезия и картография, 2016. № 12. С. 7–15. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-918-12-7-15.

Присяжная А.А., Чернова О.В., Митенко Г.В., Снакин В.В. Геоинформационный анализ охраны почвенного покрова в Арктической зоне Российской Федерации. Арктика: экология и экономика, 2021. Т. 11. № 4. С. 529–540. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-4-529-540.

Стишов М.С. Развитие федеральной системы особо охраняемых природных территорий России в период 2009−2018 гг. и его дальнейшие перспективы. Москва, 2020. 184 с.

Трофимова И.Е., Балыбина А.С. Классификация климатов и климатическое районирование Западно-Сибирской равнины. География и природные ресурсы, 2014. № 2. С. 11–21.

Трофимова И.Е., Балыбина А.С. Районирование Западно-Сибирской равнины по термическому режиму почв. География и природные ресурсы, 2015. № 3. С. 27–38.

Урусевская И.С., Алябина И.О., Шоба С.А. Почвенно-географическое районирование как научное направление и основа рационального землепользования. Почвоведение, 2015. № 9. С. 1020–1035. DOI: 10.7868/S0032180X15090129.

Урусевская И.С., Алябина И.О., Шоба С.А. Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Масштаб 1: 8 000 000. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, Факультет почвоведения, 2019. Электронный ресурс: https://soil-db.ru/map/eco (дата обращения 11.07.2023).

Харюткина Е.В., Логинов С.В. Тенденции временных изменений температуры почвы на глубинах в Западной Сибири по данным реанализа. География и природные ресурсы, 2019. № 2. С. 95–102. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-2(95-102).

Чернова О.В. Сохранение естественных почв на охраняемых природных территориях Российской Федерации. Известия РАН. Серия географическая, 2012. № 2. С. 30–37.

Шестаков А.С. Программа работы по охраняемым природным территориям Конвенции о биологическом разнообразии. Комментарии для практического применения в регионах России. М., 2009. 96 с.

Шполянская Н.А., Осадчая Г.Г., Малкова Г.В. Современное изменение климата и реакция криолитозоны (на примере Западной Сибири и Европейского Севера России). Географическая среда и живые системы, 2022. № 1. С. 6–30. DOI: 10.18384/2712-7621-2022-1-6-30.

Штильмарк Ф.Р. Историография российских заповедников (1895–1995). М.: Логата, 1996. 340 с.

Amundson R. Are soils endangered? The Earth around us: Maintaining a Livable Planet. New York: WH Freeman, 2000. P. 144–153.

Daily G.C. Developing a scientific basis for managing Earth's life support systems. Conservation Ecology, 1999. V. 3. No. 14. Электронный ресурс: http://www.consecol.org/vol3/iss2/art14 (дата обращения 11.07.2023).

Ibàñez J.J., De-Alba S., Bermúdez F.F., García-Álvarez A. Pedodiversity: Concepts and measures. Catena, 1995. V. 24. P. 215–232.

REFERENCES

Amundson R. Are soils endangered? The Earth around us: Maintaining a Livable Planet. New York: WH Freeman, 2000. P. 144–153.

Chernova O.V. Virgin soils preservation in nature protected areas of the Russian Federation. Series: Geographic. Izvestia RAN. Seriya Geograficheskaya (News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series), 2012. No. 2. P. 30–37 (in Russian).

Daily G.C. Developing a scientific basis for managing Earth's life support systems. Conservation Ecology, 1999. V. 3. No. 14. Web resource: http://www.consecol.org/vol3/iss2/art14 (accessed 11.07.2023).

Dobrovolskii G.V. V.V. Dokuchaev as an outstanding ecologist. Moscow University Bulletin. Series 17. Soil science, 1996. No. 3. P. 3–8 (in Russian).

Dobrovolskii G.V., Chernov I.Yu., Bobrov A.A., Dobrovolskaya T.G., Lysak L.V., Onipchenko V.G., Gongalsky K.B., Zaitsev A.S., Terekhova V.A., Sokolova T.A., Terekhin V.G., Shmarikova E.V., Chernova O.V. The role of soil in the biological diversity formation and conservation. Moscow: KMK Scientific Press Ltd., 2011. 273 p. (in Russian).

Dobrovolskii G.V., Nikitin E.D. Biospheres and ecosystems functions of soils (Ecological significance of soils). Moscow: International Academic Publishing Company "Nauka/ Interperiodika", 1990. 260 p. (in Russian).

Gubarev D.I., Levitskaya N.G., Derevyagin S.S. Influence of climate change on soil degradation in arid zones of the Volga region. Arid Ecosystems, 2022. V. 28. P. 20–27 (in Russian).

Ibàñez J.J., De-Alba S., Bermúdez F.F., García-Álvarez A. Pedodiversity: Concepts and measures. Catena, 1995. V. 24. P. 215–232.

Kharyutkina E.V., Loginov S.V. Trends in changes of soil temperature at depth in Western Siberia based on reanalysis data. Geography and Natural Resources, 2019. No. 2. P. 95–102 (in Russian). DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-2(95-102).

Krever V.G., Stishov M.S., Onufrenya I.A. Specially protected natural territories of Russia: Current state and development prospects. Moscow: Orbis Pitkus, 2009. 456 p. (in Russian).

*Kudeyarov V.N., Demkin V.A., Gilichinsky D.A., Goryachkin S.V., Rozhkov V.A. G*lobal climate changes and the soil cover. Eurasian Soil Science, 2009. V. 42. No. 9. P. 953–966 (in Russian).

Prisyazhnaya A.A., Chernova O.V., Mitenko G.V., Snakin V.V. Geoinformation analysis of soil cover protection in the Arctic Zone of the Russian Federation. Arctic: Ecology and Economy, 2021. V. 11. No. 4. P. 529–540 (in Russian). DOI: 10.25283/2223-4594-2021-4-529-540.

Prisyazhnaya A.A., Khrisanov V.R., Mitenko G.V., Chernova O.V., Snakin V.V. Analysis of the soil diversity of nature reserves and national parks in Russia (taking into account new territories). Geodesy and Cartography, 2016. No. 12. P. 7–15 (in Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2016-918-12-7-15.

Shestakov A.S. Program of work on protected areas of the convention of biological diversity. Comments for practical application in the regions of Russia. Moscow, 2009. 96 p. (in Russian).

Shpolyanskaya N.A., Osadchay G.G., Malkova G.V. Modern climate change and permafrost reaction (on the example of Western Siberia and the European North of Russia). Geographical Environment and Living Systems, 2022. No. 1. P. 6–30 (in Russian). DOI: 10.18384/2712-7621-2022-1-6-30.

Shtil'mark F.R. Historiography of Russian nature reserves (1895–1995). Moscow: LLP "Logata". 1996. 340 p. (in Russian).

Stishov M.S. Development of the federal system of specially protected natural territories of Russia in the period 2009–2018 and its further prospects. Moscow, 2020. 184 p. (in Russian).

Trofimova I.E., Balybina A.S. Classification of climates and climatic regionalization of the West-Siberian plain. Geography and Natural Resources, 2014. V. 35. No. 2. P. 114–122 (in Russian). DOI: 10.1134/S1875372814020024.

Trofimova I.E., Balybina A.S. Regionalization of the West Siberian Plain from thermal regime of soils. Geography and Natural Resources, 2015. V. 36. No. 3. P. 234–244 (in Russian) DOI: 10.1134/S1875372815030038.

Urusevskaya I.S., Alyabina I.O., Shoba S.A. Soil-geographical zoning as a direction of science and as the basis for rational land use. Eurasian Soil Science, 2015. V. 48. No. 9. P. 897–910 (in Russian). DOI: 10.1134/S1064229315090112.

Urusevskaya I.S., Alyabina I.O., Shoba S.A. Map of soil-ecological zoning of the Russian Federation. Scale 1: 8 000 000. Moscow: Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, 2019 (in Russian). Web resource: https://soil-db.ru/map/eco (accessed 11.07.2023).

УДК: 912.4

DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-589-606

И.А. Рыльский[1], **Д.А. Парамонов**[2], **А.Ю. Кожухарь**[3], **А.И. Терская**[4]

СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ РАЙОНА БОЛЬШОЙ СОЧИ – КРАСНАЯ ПОЛЯНА – ПЛАТО ЛАГО-НАКИ

АННОТАЦИЯ

Проектирование горнолыжных комплексов с учетом прилегающих территорий и их особенностей — непростой и многогранный процесс, требующий внимания не только к географическим, но и социально-экономическим аспектам региона. Наряду с оценкой в пределах горных склонов в проекте должны быть рассмотрены особенности застройки территории, ее инженерная освоенность и иные техногенные элементы антропогенного воздействия на местность. Опыт строительства подобных объектов свидетельствует о том, что высокоточные пространственные данные о территории работ востребованы всеми участниками процессов экономической оценки проекта и проектирования. Эти сведения используются для оптимизации расположения подъемников, подъездных путей, водоводов снеговых пушек, проектирования ландшафтных дизайнерских решений, отелей, ресторанов и прочей селитебной инфраструктуры. Наиболее перспективным на сегодняшний день методом геоинформационного обеспечения подобных проектов является подбор комплексных разномасштабных ГИС-данных, включая проведение лазерного сканирования с одновременным выполнением плановой и наклонной аэрофотосъемки. Впоследствии эти материалы вместе с космическими снимками высокой детальности на сопредельные территории применяются для создания виртуальных моделей с набором функций, адаптированных под нужды пользователей со средним и низким уровнем подготовки к работе с пространственными данными. На данном этапе классические полнофункциональные ГИС-пакеты обладают рядом недостатков. Наиболее частая проблема пользователей, ранее не сталкивавшихся с подобными данными — сложность в освоении. Полнофункциональные ГИС-пакеты могут быть дороги при закупке, функциональность бесплатных решений — недостаточна. Использование значительных по объему пространственных данных в ситуации, когда пользователи находятся в разных населенных пунктах требует высокоскоростного доступа в Интернет и все равно не обеспечивает желаемой производительности и гибкости. Использованный в данной работе подход к организации данных устраняет вышеуказанные недостатки. При этом нет необходимости использования сложных ГИС-пакетов. В качестве замены создаются закрытые от редактирования и доступа к исходным данным виртуальные среды. Полученная виртуальная модель территорий существующих и проектируемых элементов горнолыжных кластеров ориентирована на повышение пространственной осведомленности пользователей. Удалось реализовать функциональность и возможность использования

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail:* **rilskiy@mail.ru**

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail:* **paramonovwork@mail.ru**

[3] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail:* **ann3105880@yandex.ru**

[4] Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Факультет космических исследований, Ленинские горы, д. 1 стр. 52, Москва, Россия, 119991, *e-mail:* **arvin2@yandex.ru**

модели на обычных компьютерах в режиме сочетания высокой пространственной точности модели с ее значительным территориальным охватом (свыше 25 000 км^2).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аэрофотосъемка, виртуальная модель, лидар, ГИС

Ilya A. Rylskiy[1], **Dmitriy A. Paramonov**[2], **Anna Yu. Kozhukhar**[3], **Anna I. Terskaya**[4]

CREATING A VIRTUAL MODEL OF THE AREA OF GREATER SOCHI – KRASNAYA POLYANA – LAGO-NAKI PLATEAU

ABSTRACT

The design of ski resorts, considering the surrounding areas and their characteristics, is a complex and multifaceted process that requires taking into account not only the geographical, but also the socio-economic aspects of the region. Along with the assessment within the mountain slopes, the project should assess the features of the development of the territory, its engineering development and other technogenic elements of the anthropogenic impact on the area. Experience in the construction of such facilities indicates that high-precision spatial data on the area of work are in demand by all participants in the processes of economic evaluation of the project and design. This information is used to optimize the location of lifts, driveways, snow gun conduits, landscape design solutions, hotels, restaurants and other residential infrastructure. The most promising method of geoinformation support for such projects today is the selection of complex multi-scale GIS data, including laser scanning with simultaneous planned and inclined aerial photography. Subsequently, these materials, together with highly detailed satellite images of adjacent territories, are used to create virtual models with a set of functions adapted to the needs of users with an average and low level of training in working with spatial data. At this stage, classic full-featured GIS packages have a number of disadvantages. The most common problem for users who have not previously encountered such data is the difficulty in mastering. Full-featured GIS packages can be expensive to purchase, while free solutions don't provide enough functionality. The use of significant spatial data in a situation where users are located in different locations requires high-speed Internet access, and still does not provide the desired performance and flexibility. The approach to data organization used in this work eliminates the above disadvantages. There is no need to use complex GIS packages. As a replacement, virtual environments are created that are closed from editing and access to the source data. The resulting virtual model of the territories of existing and planned elements of ski clusters is focused on increasing the spatial awareness of users. It was possible to realize the functionality and the possibility of using the model on conventional computers in the mode of combining the high spatial accuracy of the model with its significant territorial coverage (over 25 000 km^2).

KEYWORDS: airborne imagery, virtual model, remote sensing, GIS, LIDAR

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **rilskiy@mail.ru**

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **paramonovwork@mail.ru**

[3] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **ann3105880@yandex.ru**

[4] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Space Researches, 1 build 52, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **arvin2@yandex.ru**

ВВЕДЕНИЕ

Строительство новых и развитие существующих горно-туристических и горно-лыжных кластеров — сложная и комплексная задача. Эти работы нуждаются в предпроектном проведение исследований как на территории равнинных ландшафтных комплексов, так и в горной местности, включая территории с предельно сложным рельефом (скальные сбросы, отвесные стены, речные каньоны и пр.). Обычно один только этап технико-экономического обоснования планируемых проектных решений и общая оценка бизнес-модели занимает несколько лет; столько же или больше времени может понадобиться и на проведение изыскательских работ и проектной деятельности. В эти процессы могут быть вовлечены десятки и сотни специалистов, а сами подобные проекты могут обретать федеральное или даже международное значение. Примером подобных объектов-проектов явилось строительство начальной стадии горно-туристического кластера в Красной Поляне в рамках подготовки к Зимним Олимпийским Играм в Сочи в 2014 г.

Большая часть специалистов, привлекаемых к выработке проектных и экономических решений, не является ГИС-специалистами и не имеет опыта работы с пространственными данными. Полный объем результатов изысканий доступен не каждому из них, руководители проектов часто имеют довольно смутное представление о расположении и особенностях территории.

Кроме вышеупомянутого, различные филиалы и дочерние отделения компаний, реализующих проект, работают с совершенно разнотипными данными, многие из них никак не учитывают пространственные аспекты деятельности. В том случае, когда такие материалы используются, их подробность может колебаться от 1: 1 000 000 (стадия обоснования инвестиций, используется высшим руководством компании и менеджерами старшего звена) до 1: 200 (реконструкция зданий, причалов, промышленных сооружений, проектировщики и строители). Все эти сведения имеют разный пространственный охват и собираются различными методами. При попытке их сведения в единое информационное поле данных возникают сложности: от различий в проекциях до различий в форматах данных.

Не последнюю роль играют и ограничения в части обеспечения безопасности использования данных, характерные для компаний, ведущих работы по крупным проектам. Большая часть материалов, собранных в ходе подготовки к реализации проекта, представляет собой коммерческую ценность; нередко она составляет и государственную тайну. Подобные сведения не должны свободно распространяться по открытым каналам связи или передаваться в сторонние компании в виде непосредственно готовых для работы данных, но при этом они должны давать возможность решать текущие задачи — от общей ситуационной осведомленности до конкретных проектных решений.

Одним из возможных подходов для решения вышеописанного набора проблем может быть создание виртуальных моделей с использованием ГИС-пакетов, доступных на коммерческом рынке, наиболее распространенные из которых — ArcGIS (ArcScene, ArcGlobe). Однако, помимо высокой цены и сложностей в освоении, данные продукты не обеспечивают хорошего качества визуализации (рендеринга), предъявляют необоснованно высокие требования к аппаратному обеспечению. Отдельные (ранее доступные на российском рынке программного обеспечения) ГИС-пакеты и модули, созданные специально для виртуального моделирования (ERDAS Virtual GIS, Space Eye и пр.) обладают схожим набором недостатков. Ввиду введенных в 2022–2023 гг. санкций и ограничений на поставки западного программного обеспечения, официальное использование западного профессионального программного обеспечения становится также затруднительным для новых пользователей.

Решением этих проблем может быть создание комплексных виртуальных моделей (сред) с полностью закрытой от редактирования или экспорта части данных географической основой с использованием 3D-ядра западного производства и доработанной российскими специалистами визуальной оболочки и функций пространственного анализа. В данной работе описывается пример реализации проекта на базе описанного подхода к созданию виртуальных географических сред на базе 3D-ядра Unity. Основным методом информационного наполнения подобной виртуальной модели предлагается воздушное лазерное сканирование, цветная цифровая съемка в видимом диапазоне, а также открытые источники данных и результаты пространственной обработки этих материалов, отображаемые в модели.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Источники данных для создания виртуальных моделей (ВМ) горно-туристических комплексов

Существующие фондовые и открытые источники данных для информационного обеспечения задач проектирования в условиях сложного рельефа совершенно недостаточны. Из имеющихся в фактическом доступе следует в первую очередь упомянуть военно-топографические карты м-ба 1: 50000–1: 25 000 с сечением рельефа 5–20 м и оценочной точностью рельефа на уровне 1/3–1/2 от величины сечения горизонталей (1,7–5.0 м для 1: 25 000, 3.5–10 м для 1: 50 000), материалы дистанционного зондирования из космоса с пространственным разрешением на уровне 0,5–1,5 м, распространяемые на коммерческой основе; бесплатные данные космической съемки с пространственным разрешением 10–30 м (космические аппараты Sentinel, Landsat и схожие с ними по техническим характеристикам); достаточно редко — топографическая продукция м-ба 1: 10 000 или детальнее (обычно сильно устаревшая). Также имеются широко известные открытые источники информации о рельефе — такие, как бесплатные ЦМР AW3D30 (Alos DEM 30) или SRTM и платные данные. Все эти источники данных о рельефе не обеспечивают точность и детальность лучше 1: 50 000 [*Mukul*, 2017].

Отметим, что для выполнения проектных решений (и соответствующих экономических расчетов) требуется использование данных с масштаба 1: 10 000 для общих решений территориального планирования, 1: 2 000 — для проектирования на незастроенных территориях и 1: 500–1: 200 — для проектирования на застроенных территориях. При разработке проектов освоения территории должны быть представлены данные в составе топографических планов, ортофотопланов, цифровые модели рельефа и производные от них модели (карты углов наклона, кривизны склонов, экспозиции). Данные должны быть не старше 2 лет. Согласно СНиП 11-02-96 «Инженерные изыскания в строительстве», пространственная точность большинства сведений о ситуации должна быть на уровне 0,4–0,5 мм в масштабе карты (например, для 1: 2 000 это 0,8 м) в части планового положения и 1/3 сечения рельефа (для 1: 2 000 сечение рельефа составляет 1 м, а точность — 0,33 м). Эти требования крайне высоки для имеющихся фондовых материалов.

Данные космической съемки в видимом диапазоне, плановой аэрофотосъемки с пилотируемых носителей и с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) не дают детальных сведений о рельефе и микрорельефе местности под пологом растительности, в условиях затененных склонов, вертикальных скальных стен и прочих условиях горного рельефа. Данные космической радиолокационной съемки о горном рельефе обычно недостаточно детальны (при использовании более длинных волн), либо не достигают фактической поверхности о рельефа, отражаясь от крон деревьев (при использовании более коротких длин волн).

В отличие от городского или сельского строительства, где площади объектов редко превышают 50–100 га, работы по проектированию горно-туристических комплексов могут охватывать территории площадью в десятки и даже сотни км^2. Например, площадь территории горнолыжного кластера в Сочи – Красной Поляне превышает 200 км^2. Это не позволяет хоть сколько-нибудь полно решить проблему обеспечения детальными данными столь крупных объектов с использованием наземных методов съемки и требует применения инновационных съемочных методов, обеспечивающих одновременно и высокую точность, и производительность.

В данный момент таким методом информационного обеспечения проектов является лазерное (лидарное) сканирование с пилотируемого или беспилотного носителя с одновременной цветной аэрофотосъемкой (RGB) в видимом диапазоне (реже в ближнем инфракрасном и в тепловом диапазонах). Данный метод обеспечивает полноту и точность, соответствующие м-бам 1: 200–1: 5 000 на значительных по площади территориях [*Chen*, 2007]. Стоимость 1 км^2 подобной съемки (выполняемой одновременно) уже сопоставима с ценой проведения космической стереосъемки с последующим моделированием видимой поверхности в стерео-режиме. Надежность метода очень высока и гарантирует низкий процент случаев превышения предельных погрешностей при выполнении работ. Так, одной из наиболее ценных и безальтернативных особенностей лидаров является способность лазерных импульсов (с полной оцифровкой формы принимаемого сигнала) проникать сквозь листву и ветви растений, достигая поверхности грунта и позволяя регистрировать множественные отражения, порожденные одним исходным импульсом. Эта особенность позволяет отображать рельеф в залесенной местности с практически той же подробностью, что и на открытом пространстве, а также выполнять (при необходимости) дешифрирование нижних ярусов растительности, поваленного леса и прочих объектов ниже главного яруса растительности [*Korpela*, 2008].

Данные, производные от материалов аэрофотосъемки и лазерного сканирования

Главную роль при создании крупных высокоточных виртуальных моделей (когда сочетаются высокая точность с высокой реалистичностью и большим пространственных охватом) играет применение лазерного сканирования совместно с аэрофотосъемкой [*Schwalbe*, 2005]. В данный момент только это метод обеспечивает единовременное получение пространственных данных нужной детальности.

Прямыми результатами лазерного сканирования и аэрофотосъемки являются облака точек отражений и аэрофотоснимки с элементами внешнего ориентирования, а также данные с других сенсоров, установленных на борту в ходе залета. Это могут быть наклонные камеры видимого диапазона, кадровые камеры или сканеры, работающие в тепловом и ближнем инфракрасном диапазонах и т. д.

Сами по себе точки лазерных отражений являются топологически несвязанными данными (в отличие от векторных топологических слоев ГИС или регулярно-ячеистых моделей данных), и работа с ними малопроизводительна и неудобна. Обычно пользователь всегда имеет дело с какими-либо результатами обработки данных исходного залета [*Haala*, 1998]. Возможно отметить несколько уровней последовательной обработки данных:

- Уровень 0. Облако точек лазерных отражений, разделенное на классы, а также уравненный фотограмметрический блок снимков;
- Уровень 1. Регулярно-ячеистые матрицы высот, созданные по классу точек «земля», ортофотопланы с исправлением искажений за наклон и рельеф;
- Уровень 2. Триангуляционные модели рельефа (структурные и бесструктурные), матрицы относительных высот растительности, матрица углов наклона, матрица экспозиции склонов;

- Уровень 3. Векторные слои общегеографической и тематической нагрузки [*Zhang*, 2001].

Для практического применения необходима вся совокупность данных со всех уровней обработки.

Предпосылки для использования виртуальных сред в качестве замены ГИС-пакетов при планировании, строительстве и эксплуатации горно-туристических кластеров

Как уже было отмечено, геоинформационные системы обладают рядом недостатков:

- необходимость обучения работе с ними людей без специального образования;
- возможна либо работа с полнофункциональными программными продуктами (значительная цена, ограниченное количество рабочих мест), либо использование бесплатных модулей с неполной функциональностью в части геоанализа, невозможность решения проблем с реалистичной трехмерной визуализацией (низкое качество рендеринга);
- требование защиты от копирования пространственной информации, представляющую коммерческую ценность, при этом для достижения приемлемого качества разрабатываемых проектных решений число ее потенциальных пользователей необходимо увеличивать;
- при работе на объектах, где нет скоростных каналов доступа к сети Интернет, пространственная информация о районе работ обязательно должна присутствовать на полевом рабочем устройстве (ноутбук, планшет, редко — настольный компьютер) пользователя вместе с программным обеспечением.

Приведем пример регулярно возникающих, но при этом простейших задач. К ним можно отнести:

- визуальная оценка оптимальных маршрутов перемещения с точки зрения рельефа, проходимости растительности и уклонов;
- оценка относительных высот и превышений участков местности;
- оценка длины линейных объектов или их периметра площадных;
- обходы водных объектов или техногенных и природных препятствий (ветровалы, сбросы, обрывы);
- оцифровка и изменение простых векторных объектов на территории планируемых работ;
- оценка уклонов (с целью определения уровня сложности горнолыжных трасс, объемов перемещаемого грунта, проходимость строительной и обслуживающей техники, возможность или невозможность расположения в выбранной точке опор подъемников).

Все эти задачи без проблем могут быть реализованы без использования специализированных ГИС-пакетов. Вместо них возможно использовать закрытые от редактирования и доступа к исходным данным виртуальные среды.

Концептуальные и технические требования к виртуальным средам для нужд проектирования горно-туристических кластеров

Учитывая упомянутые выше требования к составу и покрытию данными, а также и имеющиеся недостатки, возникающие при использовании обычных геоинформационных систем, можно сформулировать нижеследующие требования к созданию виртуальных географических сред будущих горно-туристических кластеров [*Allen*, 2003]:

- Виртуальная среда требует наличия простого и интуитивно понятного интерфейса и набора функций, пригодных к использованию персоналом без навыков работы с ГИС.
- Виртуальная среда должна обеспечивать высокую степень реализма ландшафта и эффект присутствия на местности.
- Необходимо обеспечить возможность трехмерной визуализации в реальном времени на персональном компьютере с разрешением экрана не ниже 1920x1080 и выше в не самой мощной конфигурации.
- Геопространственные данные в составе виртуальной среды должны быть закрыты от несанкционированного копирования или экстракции.
- Ни одно из существующих ГИС-приложений (платных или бесплатных) не должно использоваться в качестве среды.
- Виртуальная модель должна быть создана в виде некоей отдельной программы, обеспечивающей возможность работы на сколь угодно большое количество рабочих станций пользователей (без обеспечения режима работы по сети).
- Виртуальная среда должна обеспечить полноту и точность данных на нескольких масштабных уровнях:
  - уровень 1: район строительства подъемников, отельных комплексов, торгово-развлекательных объектов — 1: 500, сечение рельефа 0,5 м; источник данных — воздушное лазерное сканирование, цифровая аэрофотосъемка, наклонная аэрофотосъемка;
  - уровень 2: районы горнолыжных трасс, дорожек для треккинга и их буферная зона шириной до 5000 м — 1: 2 000, сечение рельефа 1,0 м — воздушное лазерное сканирование, цифровая аэрофотосъемка;
  - уровень 3: окружающие районы, включая скальные участки, ближайшие населенные пункты, заповедные территории — на площади территории радиусом до 80 км; детальность — 1: 50 000 в части рельефа (источник данных — ALOS DEM) или 1: 100 000 (SRTM), 1: 10 000–1: 25 000 — в части ортофотопланов (данные космической съемки с детальностью 3–10 м, различные сканирующие системы, материалы — из бесплатных источников).
- Необходимо обеспечить возможность выполнения измерений плановых координат и высотных отметок — в принятой системе координат и высот.
- Модель должна обеспечивать возможность импорта/экспорта пользовательских данных векторного типа на базе формата *.KML (формат данных для Google Earth); кроме того, необходимо реализовать возможность редактирования линейных, полигональных, точечных векторных объектов в указанных слоях данных.

Типы виртуальных моделей местности и их недостатки

Виртуальная модель местности (далее — ВММ) — это математическая модель территории, включающая в себя сведения о высотах земной поверхности, ее спектральных характеристиках и объектах, локализованных в ее пределах, предназначенная для интерактивной пользовательской визуализации, обладающая эффектом присутствия наблюдателя на местности. Для создания и визуализации ВММ с достаточно высокой степенью реалистичности требуется применение программ, способных обрабатывать трехмерные объекты, «драпированные» («обтянутые») текстурой (растровыми картами либо снимками), рассчитывая в реальном времени не менее 20 кадров в секунду.

Виртуальные модели местности, созданные на базе геоданных, применяются свыше 30 лет. Многие коммерческие ГИС (ArcGIS или ERDAS) предлагают уже готовые к работе

модули с заранее подготовленными массивами ГИС-сведений для последующего применения в состав формируемой ВММ. Виртуальные модели такого типа отличаются низкой степенью реализма (используются условные текстуры, библиотеки и наборы объектов имеют небольшое разнообразие, в значительной мере эти изобразительные меры условны). Несмотря на развитость функций по обработке существующих и созданию новых геоданных, эти модели требуют установки на компьютере пользователя основного ГИС-приложения (например, ArcGlobe требует наличия ArcMap), что снижает число потенциальных пользователей этого вида моделей (стоимость лицензии на одно рабочее место у подобного программного обеспечения может превышать 15 000 евро).

Следует также отметить специальные программные среды для создания ВММ из готовых ГИС-данных, которые не предусматривают возможность коррекции исходных материалов — например, SpaceEye или ERDAS Virtual GIS. При значительно меньшей стоимости рабочего места пакета-конструктора ВММ и при наличии бесплатного приложения для визуализации готовой ВММ, подобные программные решения обладают теми же недостатками вышеперечисленных ГИС-пакетов в части реализма. При этом они не обладают функциональностью в части редактирования самих ГИС-данных (а где-то это все равно нужно делать). В конечном итоге это все равно вынуждает пользователей приобретать и полнофункциональные ГИС — для того, чтобы иметь возможность хоть что-то изменить в данных. Тем самым уровень затрат потенциального пользователя возрастает.

Распространение цифровых аэросъемок с БПЛА или пилотируемых носителей создало класс пользователей ВММ, использующих фактические и фотореалистичные текстуры и визуальные 3D поверхности объектов. Разделения на отдельные объекты при этом может и не происходить — реальность моделируется как сплошная видимая поверхность, представленная в виде сотен миллионов треугольников. Этот тип ВММ распространен и обладает сильными и слабыми сторонами. Примером такого решения (в виде отдельного приложения, не использующего Интернет) является Sputnik от компании AgiSoft, визуализирующий данные, полученные ранее путем обработки исходной аэрофотосъемки в фотограмметрическом комплексе Metashape (от того же производителя). На рынке также распространены и онлайн-ресурсы, реализующие работу с виртуальными средами в режиме доступа через Интернет, например Google Earth.

ВММ, ориентированных на использование данных лидарных съемок и сопутствующих им данных, немного (например Bentley Point Tools). Ввиду все более широкого распространения материалов лидарной съемки, все чаще возникает необходимость в создании на их базе ВММ высокой степени реализма.

Выбор программной основы для разработки ВММ и ее функций

В качестве программного «ядра» для создания виртуальных сред, учитывающих недостатки, отмеченные нами выше, была выбрана платформа для визуализации трехмерных сред на базе UNITY. Unity — это кросс-платформенная среда разработки интерактивных виртуальных сред, созданная фирмой Unity Technologies (США). Unity позволяет создавать отдельные модули, функционирующие на десятках аппаратных платформ, включая как персональные компьютеры, так и игровые консоли, мобильные устройства, интернет-приложения и ряд других. Первая версия Unity вышла в 2005 г., и в течение последних 18 лет среда постоянно развивалась. На основе решений Unity создано значительное число виртуальных сред, приложений, визуализаций математических и пространственных моделей, которые охватывают большой круг задач. При этом Unity может быть использована коллективами любой численности — от мелких фирм до крупных корпораций.

Преимущества Unity состоят в следующем:

- визуальная среда разработки;

- возможность межплатформенной поддержки;
- модульная система компонентов;
- дешевизна.

С точки зрения описанной концепции нужно отметить, что непосредственная загрузка пространственных данных в среду неквалифицированным пользователем затруднена и сопряжена с необходимостью делать дополнительные процедуры по их подготовке (сегментация, генерализация и пр.). В ряде случаев прямое встраивание геоданных (например, векторные полигональные 2D-данные) в среду невозможна, и необходимо выполнять конвертацию 2D данных из векторной в растровую форму или создавать псевдо-3D объекты (которые, по сути, трехмерны, но из-за вырожденности третьей координаты визуализируются как двухмерные).

Выбор участка и получение данных

В качестве тестового участка для отработки вышеописанной концепции была выбрана территория существующих и проектируемых горно-туристических комплексов в районе Сочи – Красная Поляна – плато Лагонаки. Все объекты расположены на территории Краснодарского края и Республики Адыгеи (рис. 1).

Район включает в себя приморские, предгорные и горные ландшафты Кавказа. Для наполнения данными модели были использованы материалы залетов 2008 г. (территория Сочи), 2014 г., 2018 г. — для территории Красной Поляны, 2022 г. — для территории Лагонаки.

Съемки 2018 г. проводились дважды, в весенний и летний периоды, что позволило создать модель толщины и распределения снежного покрова в период его максимальной толщины. Более подробно методика этой работы была описана в предыдущих статьях [*Тикунов*, 2020]. В данную модель вносились итоговые результаты в виде растрового слоя данных.

В настоящее время на территории создания модели наблюдается очень высокая активность в части развития горно-туристических кластеров и сопутствующей прилежащей селитебной инфраструктуры с целью увеличения потока отдыхающих во все сезоны года.

Климат региона — субтропический морской на юге, умеренный континентальный (степной) на севере. Территория гористая, с выраженными альпийскими формами в пределах всего Главного Кавказского хребта. Ближе к северу преобладают предгорные ландшафты Северного Кавказа.

Поскольку вся данная территория предполагает слияние в единый горно-туристический кластер в течение ближайших 10–15 лет, а также планируется создание крупных инфраструктурных объектов (автодорог и тоннелей) на значительном протяжении, было принято решение создать модель со значительным территориальным охватом (120 х 120 км) площадью около 14 000 км^2. Подобный охват позволяет в дальнейшем производить оценку ситуации и поддержку принятия решений при развитии объектов без отрыва от общей окружающей ситуации, обеспечив целостное восприятие географической среды и ее компонентов.

На территориях Большого Сочи (1 050 км^2), Красная Поляна (долина р. Мзымты и прилегающие склоны хребтов (320 км^2) и плато Лагонаки (27 км^2) в разные годы было выполнено несколько проектов с использованием систем воздушного лазерного сканирования (рис. 2). Лазерное сканирование выполнялось с использованием лазерных сканеров RIEGL Q560 и Leica ALS50, использовалась цифровая фотокамера IGI DigiCam 60 (среднеформатная авиационная камера с разрешением матрицы в 60 МП) или аналогичные. Из открытых источников данных были получены фото наземных объектов. Перспективные и наземные снимки использовались для дешифрирования топографических планов и текстурирования 3D объектов. Съемка велась с борта самолета Ан-2. Полеты выполнялись в 2008 г. (Большой Сочи), 2014 г. и 2018 г. (Красная Поляна), 2022 г. (Лагонаки).

Залет производился по системе параллельных треков, продольное перекрытие фотоснимков составило 60 %, поперечное — от 30 до 55 % (аналогично и для лазерного сканирования).

Рис. 1. Районы создания виртуальной модели. Красный контур — уровень детальности 3
Fig. 1. Extent of virtual modelling levels. Red contour — level of detail 3

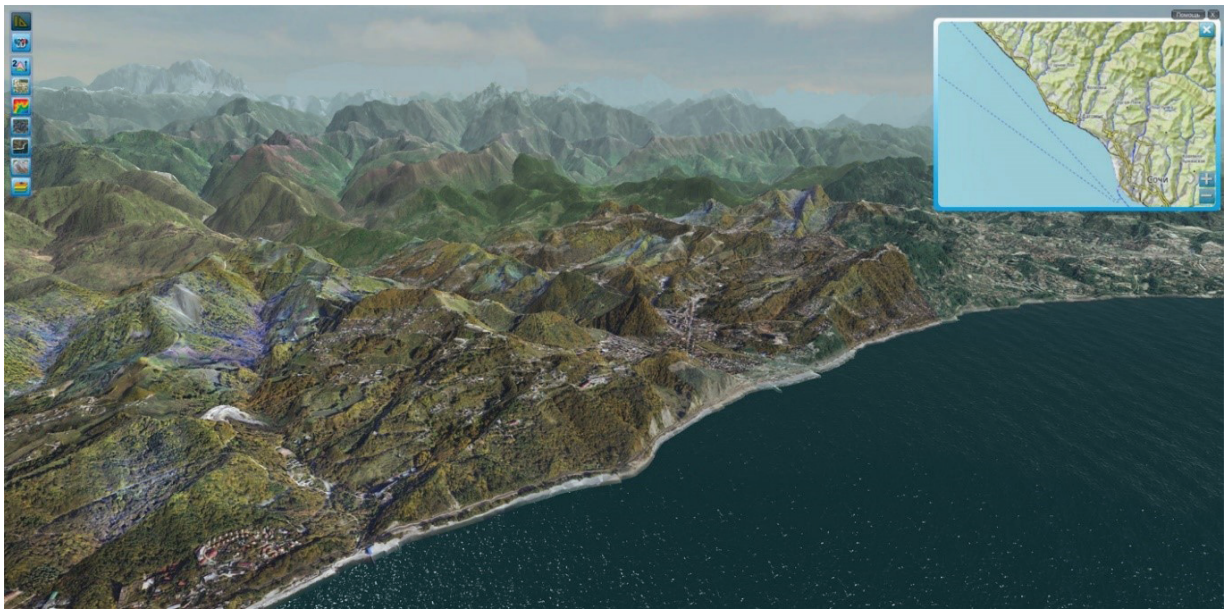


Рис. 2. Район Большого Сочи. Моделирование с детальностью уровня 3 и 2. Использованы открытые источники данных и материалы лазерного сканирования. Вертикальный масштаб 2: 1
Fig. 2. Big Sochi area. Modeling with level 3 and 2 detail. Open data sources and laser scanning materials were used. Vertical Scale 2: 1

Аэрофотосъемка и лидарное сканирование производились одновременно. Работа велась с высот 350–800 м над поверхностью рельефа. Разрешение фотоснимков составило от 5 до 10 см, плотность лазерного сканирования — от 5 до 16 точек на 1 м^2. Это соответствует требованиям м-бов 1: 500 и 1: 2 000 с запасом по детальности и плотности сканирования.

Для увеличения уровня реализма в ВММ были использованы нижеперечисленные решения:

- звуковое сопровождение волн, их анимация и визуальные эффекты динамического освещения;
- светотеневое моделирование подводных эффектов при «погружении» камеры под воду;
- моделирование неба и облаков;
- моделирование дымки;
- моделирование отдельных деревьев.

Для упрощения ориентирования в пространстве модели была использована интерактивная карта-врезка (при необходимости может быть свернута), дающая возможность масштабирования и смены охвата территории, а также быстрого перемещения камеры в указанную на карте-врезке точку.

Для непрерывного демонстрационного показа без участия пользователя модель была снабжена заранее созданной траекторией для облета камеры. При этом в любое время возможно переключение управления обратно на пользователя и управляемая навигация в модели.

По итогам обработки данных различных по времени залетов (2008, 2014, 2018, 2022 гг.) были получены облака точек лазерного сканирования. Точки лазерных отражений были разделены на классы «Земля», «Сооружения», «Растительность», «Прочее». По координатам точек класса «Земля» были созданы триангуляционные и матричные модели рельефа; впоследствии они применялись также и для создания топографических планов 1: 2 000 и 1: 500 [*Gorgens*, *2017*], равно как и модели рельефа в среде UNITY.

Моделирование искусственных сооружений выполнялось с использованием материалов лазерного сканирования (определение габаритов и форм). Для этого точки лазерных отражений из класса «Растительность» преобразовывались в ячеистую модель данных (GRID) с шагом около 50 см, загружались в ГИС-пакет ArcView и оцифровывались по контурам сооружений. По данным этой же модели определялась высота объекта или высоты его характерных точек. Итоговые трехмерные векторные материалы через промежуточный формат DWG экспортировались в среду моделирования 3D MAX, где полученный контур редактировался с учетом атрибутивных характеристик для «выдавливания» на ранее определенную высоту, «Tesselate» (разделение ребер или граней на более короткие сегменты последующей их визуально-ручной модификации с целью приведения к соответствию реальной форме сооружений). При создании комплексных 3D-объектов использовалось моделирование по частям с последующим «слиянием» 3D-объектов.

При построении моделей рельефа уровней 1 (высокодетальный) и 2 (детальный) также использовались точки лазерного сканирования класса «Земля». Точки данного класса использовались как основа для создания TIN-поверхности по методу триангуляции Делоне и импортировались в среду Unity напрямую. Видимые поверхности для уровня 3 (обзорный) создавались аналогичным методом с последующим прореживанием граней с целью устранения малозначительных для формы рельефа элементов (с целью экономии вычислительных ресурсов итоговой модели при визуализации в реальном

времени. Далее в зонах стыковки сегментов моделей разной детальности выполнялась сводка узлов и вершин TIN-поверхностей (вручную или автоматически) с последующим их слиянием в единые сегменты данных, готовых для динамической подгрузки и визуализации в реальном времени.

Для текстурирования вертикальных поверхностей применялось наложение текстур стен, полученных либо по данным наклонных съемок с воздуха, либо по данным наземной фотосъемки. Для драпировки рельефа реалистичными текстурами применялись ортофотопланы или иные геопривязанные растровые изображения (см. ниже). После наложения текстур готовые 3D-объекты вместе с текстурами подгружались в среду UNITY через обменный формат OBJ.

Набор слоев геоданных включал в себя:

- цифровую модель рельефа в виде сетки с шагом 1 м и высотной точностью около 15–20 см для уровней 1 и 2 и точностью исходных моделей рельефа SRTM или AW3D30;
- растровые изображения в виде цветного ортофотоплана 1:2 000 с детальностью 10 см;
- растровые изображения в виде топопланов с полупрозрачной текстурой ортофотоплана;
- растровые изображения в виде раскрашенной по высотам модели рельефа с нанесенными горизонталями и отметками высот;
- растровые изображения в виде карты глубины снега;
- растровые изображения в виде карты углов наклона;
- растровые изображения в виде карты экспозиции склонов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После унификации и подготовки собранные слои пространственных данных и функций по управлению визуализацией, координатным запросам и т. д. подвергаются окончательной сборке и итоговой компиляции, после чего исходные геоданные превращаются в закрытые бинарные файлы, визуализируемые с помощью самостоятельно работающего EXE-приложения. Оболочка для работы с данными ориентирована на работу в среде Windows 7 и новее, поддержка работы на иных платформах (например, Apple или Android) в данный момент не реализована и не планируется. Подобный программно-информационный комплекс не требует инсталляции, при запуске позволяя выбрать качество визуализации 3D-сцен, разрешение экрана (или окна — при работе в оконном режиме) и выполняет 3D-визуализации и пространственные запросы в режиме реального времени. Итоговая виртуальная среда обладает следующими достоинствами:

- защищенность от дублирования и информации (несанкционированное использование информации напрямую невозможно, декомпиляция затруднена);
- простота интерфейса и необходимый минимум функций;
- небольшие размеры (до 12 Гб дискового пространства);
- нетребовательность к ресурсам компьютера (16 Гб оперативной памяти и процессор Intel Core i7 — вполне достаточно);
- очень хорошее качество (по отзывам пользователей) визуализации и стабильность работы.

Общее описание модели

Основной вертикальный масштаб виртуальной модели (а также на всех иллюстрациях модели в данной работе) — 1: 1. В виртуальной среде реализована возможность преувеличения вертикального масштаба до 2: 1.

Визуальную основу модели составляет TIN-модель рельефа, текстурированная одной из трех текстур (RGB ортофото, карта высот в виде цветной шкалы с нанесенными горизонталями и точечными отметками высот [*Lohr*, 1997], топоплан 1: 2 000–1: 500).

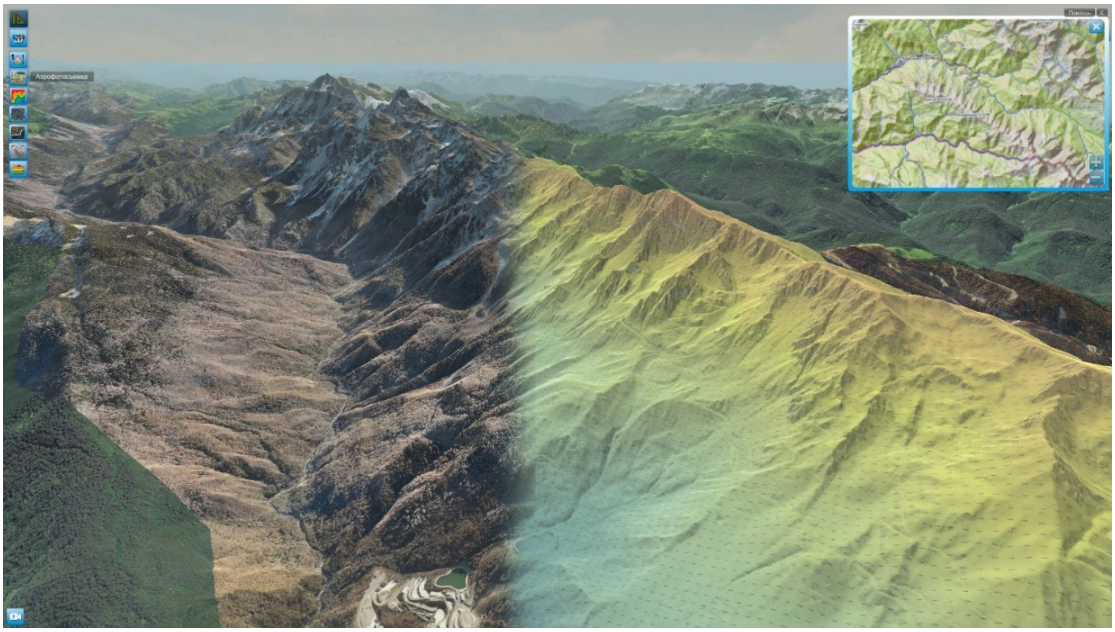


Рис. 3. Виды слоев-текстур: слева — ортофотоплан,
справа — карта высот с нанесенными отметками высот
Fig. 3. Types of texture layers: on the left — orthomosaic,
on the right — elevation map with plotted contour lines

Матрица высот также была применена для производства растрового изображения с цветовой шкалой высот с последующим нанесением на нее горизонталей и точечных отметок высот (рис. 3). По полученным ортофотопланам и цифровым моделям рельефа были построены цифровые топопланы 1: 500 и 1: 2 000.

При создании модели поверхности для UNITY также применялись сведения о батиметрии морских участков, взятые с топографических карт 1: 200 000. Все модели рельефа были сведены между собой по высоте с использованием стандартного инструментария ArcView 3.2 и специально написанных для этой задачи подпрограмм на языке Avenue (также в среде ArcView 3.2), что дало возможность создать единую бесшовную и бесступенчатую (на стыках) поверхность рельефа в созданной виртуальной среде.

Полученные слои данных (модель рельефа с текстурами видимых фотоснимков, гипсометрической картой, топографическими планами 1: 1 000, карта толщины снежного покрова (рис. 4), карты углов наклона и экспозиции склонов) были встроены в оболочку виртуальной среды в виде переключаемых наборов данных.

Основное средство управления моделью и навигации в ней — мышь и клавиши перемещения курсора. Все прочие запросы переключаются с использованием кнопок экрана.

Модель обеспечивает возможность измерений высот, длин, периметров, превышений, площадей (рис. 5). Возможно обращение к атрибутике векторных объектов, подгружаемых пользователем в формате KML (формат геоданных Google Earth). KML принят как основной обменный формат для пользовательских данных в виду его простоты и широкого распространения. Формат является открытым, что облегчает задачу даль-

нейшего развития ГИС-инструментария подобных моделей. Пользователь может самостоятельно оцифровать или загрузить ранее оцифрованные точечные, линейные, полигональные ГИС-объекты в данном формате, осуществить редактирование (как данных, так и стилей их отображения), выгрузку и сохранение результатов работы во внешние файлы. Детальность полученной модели позволяет даже визуально дешифрировать опасные инженерные процессы — такие как карст, оползневые участки, обвально-осыпные процессы (рис. 6).

Также в данной виртуальной среде реализована возможность работы в режиме 3D-анаглифов — визуализация в режиме стерео с использованием цветных очков (рис. 7). Управление перемещением камеры (пользователя) возможно также с применением touch-экранов, либо в автоматическом режиме по заранее заданной траектории.

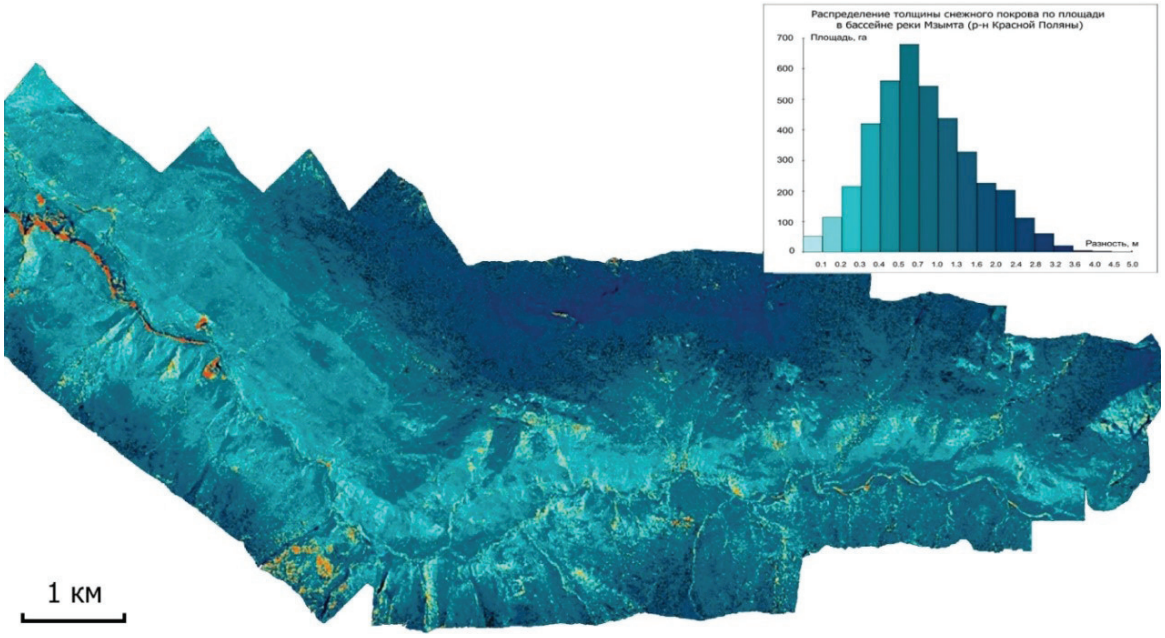


Рис. 4. Распределение толщины снежного покрова
Fig. 4. Distribution of snow coverage

Преимущества описанного подхода

Основными достоинствами подобного подхода к созданию виртуальных сред и информационному обеспечению работ по проектированию горно-туристических комплексов являются:

1) Возможность работы с высокоточными геоданными без использования Интернет;
2) Возможность использования виртуальной модели на любом количестве рабочих мест без лишних затрат;
3) Невысокие требования к аппаратным ресурсами при высоком качестве визуализации;
4) Защита от несанкционированного копирования пространственных данных;
5) Простота освоения и работы.

Подход к созданию таких ВММ имеет и ряд недостатков. Например, при потребности изменить основные наборы геоданных (добавить или убрать растровые слои, трехмерные объекты, изменить пространственный охват модели) необходимо полное перестроение всего приложения и самого набора данных. Сам процесс перестроения непрост и не может быть выполнен обычным пользователем ГИС (требуется умение

программировать на встроенном языке UNITY, иметь инструментарий для сегментации пространственных данных и их сводки).

Рис. 5. Измерение длин и площадей в модели
Fig. 5. Measuring length and area of the polygon in the model

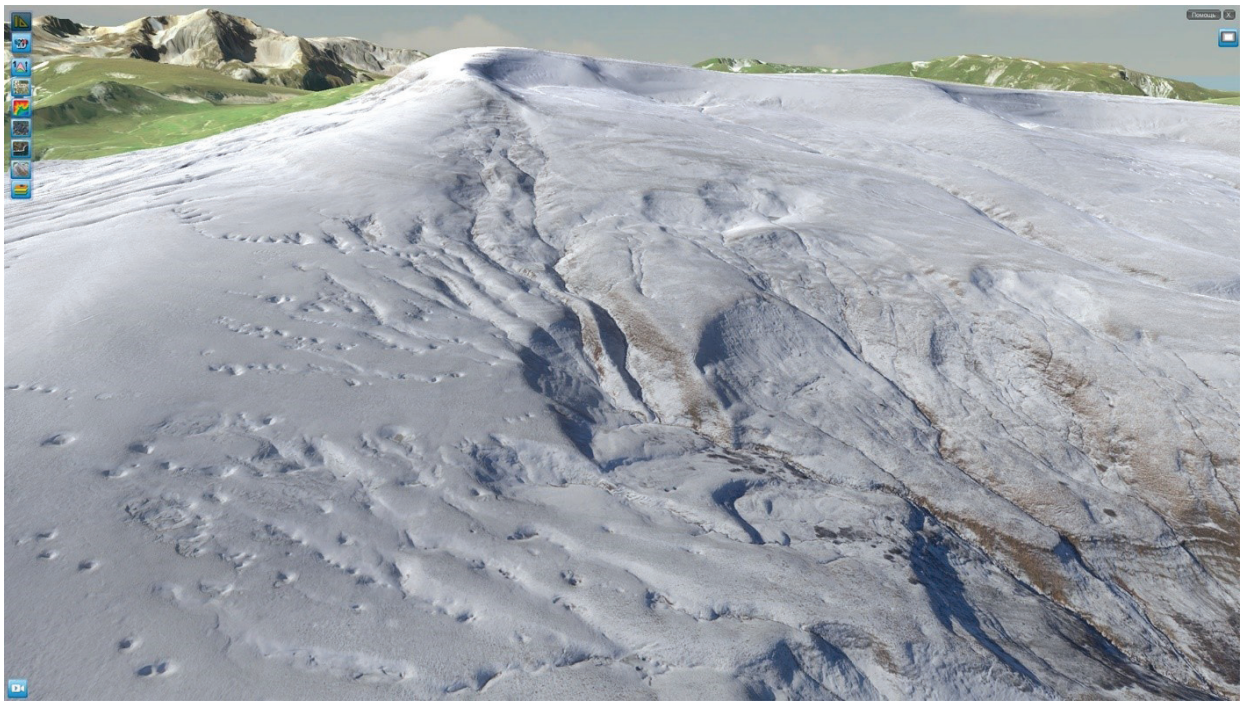


Рис. 6. Опасные инженерные явления (карст, хорошо видны карстовые воронки)
Fig. 6. Hazardous engineering phenomena (karst, sinkholes are clearly visible)

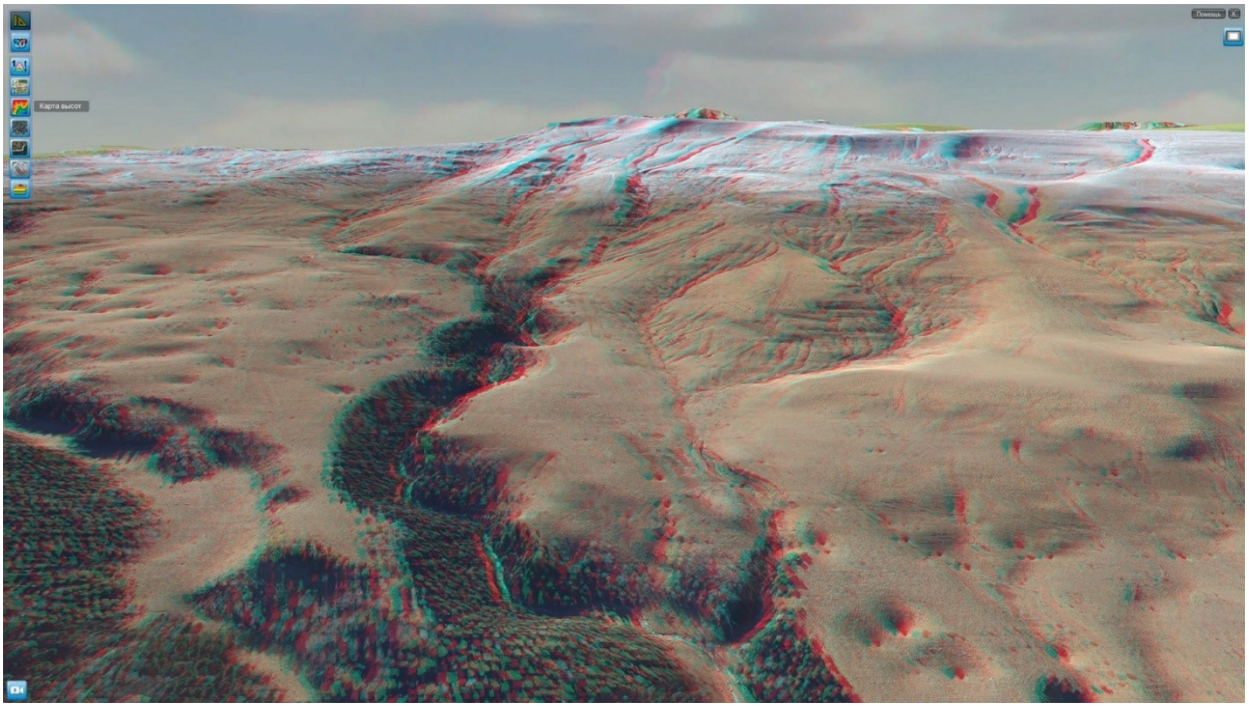


Рис. 7. Анаглифическая стереовизуализация
Fig. 7. Anaglyphic stereovisualization

Требования модели в части аппаратного обеспечения — не менее 16 Гб оперативной памяти, процессор уровня Intel Core i7 или аналогичный (и выше), видеокарта с производительностью на уровне NVIDIA 1650й серии или лучше. Впрочем, такие требования не являются чем-то необычным для современного настольного компьютера или ноутбука.

Дальнейшая работа с подобными системами предполагает использование производительных, но тем не менее персональных (не специализированных) компьютеров. Одним из важных вопросов для изучения в данной работе являлась оценка возможных пределов габаритов территории, на которых данный подход к моделированию может быть реализован. Опыт создания данной модели показал возможность обеспечения приемлемого уровня комфорта работы модели на персональных компьютерах с процессорами Intel Core i7 и 16 Гб оперативной памяти при площади территории до 14 000 км^2. Это говорит о возможности применения этого подхода к созданию ВММ не только на небольших участках отдельных проектов, но и на целых регионах или в пределах отдельных субъектов РФ.

ВЫВОДЫ

По итогам проделанной работы можно утверждать, что описанная в работе концепция создания виртуальной модели с дифференцированными уровнями детальности (1: 100 000–1: 2 000–1: 500) с использованием материалов из открытых источников, а также материалов воздушного лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки технически реализуема на обычных персональных компьютерах с оперативной памятью от 16 Гб на базе процессора Intel Core i7 (или аналогичного) на территориях площадью до 25 000 км^2. Данная модель может быть использована как ГИС-специалистами, так и обычными пользователями без какой-либо подготовки. Обучение работе с моделью составляет не более 1 часа.

Виртуальная среда обеспечивает превосходное качество трехмерной визуализации, возможность работы ГИС-слоями модели (растровыми и/или векторными в формате KML). Все объекты модели созданы в реальных габаритах и координатах с точностями, соответствующими масштабу (1: 50 000, 1: 2 000 или 1: 1 000). Модель обладает высокой эффективностью использования аппаратных ресурсов и не предъявляет высоких аппаратно-технических требований к персональному компьютеру. Пространственные данные, составляющие основу модели, не могут быть несанкционированно скопированы и распространены.

Применение подобных виртуальных сред при проектно-изыскательских работах может быть весьма эффективно на всех уровнях (это могут быть как управляющие и/или инжиниринговые компании, так и непосредственные исполнители проектных решений). Данный подход реализует возможность доступа к 3D ГИС-данным для всех участников процесса реализации проектов развития горных туристических кластеров, что повышает ситуационную осведомленность и снижает долю неоптимальных решений. Также данные среды позволяют на практике внедрить геоколлаборацию участников процесса проектирования без значительных технических затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Тикунов В.С., Рыльский И.А. Подходы к определению толщины снежного покрова с использованием лазерного сканирования. Геодезия и картография, 2020. № 8. С. 28–41.

Allen P.K., Stamos I., Troccoli A.A., Smith B., Leordeanu M., Hsu Y. 3D modeling of historic sites using range and image data. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003. V. 1. P. 145–150.

Chen Q. Airborne lidar data processing and information extraction. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007. V. 73. No. 2. P. 109–112.

Gorgens E., Valbuena R., Rodriguez L. A method for optimizing height threshold when computing airborne laser scanning metrics. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2017. V. 1. P. 343–350.

Haala N., Brenner C., Anders K.-H. 3D urban GIS from laser altimeter and 2D map data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1998. P. 339–346.

Korpela I. Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data. Remote Sensing of Environment, 2008. P. 3891–3897.

Lohr U. Digital elevation models by laserscanning: Principle and applications. Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1997. P. 174–180.

Mukul M., Srivastava V., Jade S. Uncertainties in the Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) Heights: Insights from the Indian Himalaya and Peninsula. Scientific Reports, 2017. P. 1–10.

Schwalbe E., Maas H., Seidel F. 3D building model generation from airborne laser scanner data using 2D GIS data and orthogonal point cloud projections. Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2005. P. 12–14.

Zhang C., Chen T. Efficient feature extraction for 2D/3D objects in mesh representation. Proceedings of the 2001 International Conference on Image Processing, 2001. P. 935–938.

REFERENCES

Allen P.K., Stamos I., Troccoli A.A., Smith B., Leordeanu M., Hsu Y. 3D modeling of historic sites using range and image data. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003. V. 1. P. 145–150.

Chen Q. Airborne lidar data processing and information extraction. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007. V. 73. No. 2. P. 109–112.

Gorgens E., Valbuena R., Rodriguez L. A method for optimizing height threshold when computing airborne laser scanning metrics. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2017. V. 1. P. 343–350.

Haala N., Brenner C., Anders K.-H. 3D urban GIS from laser altimeter and 2D map data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1998. P. 339–346.

Korpela I. Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data. Remote Sensing of Environment, 2008. P. 3891–3897.

Lohr U. Digital elevation models by laserscanning: Principle and applications. Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1997. P. 174–180.

Mukul M., Srivastava V., Jade S. Uncertainties in the Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) Heights: Insights from the Indian Himalaya and Peninsula. Scientific Reports, 2017. P. 1–10.

Schwalbe E., Maas H., Seidel F. 3D building model generation from airborne laser scanner data using 2D GIS data and orthogonal point cloud projections. Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2005. P. 12–14.

Tikunov V.S., Rylskiy I.A. Approaches to determination of snow coverage thickness using LIDAR. Geodesy and Cartography, 2020. No. 8. P. 28–41 (in Russian).

Zhang C., Chen T. Efficient feature extraction for 2D/3D objects in mesh representation. Proceedings of the 2001 International Conference on Image Processing, 2001. P. 935–938.

УДК: 528.94

DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-607-615

Т.Ю. Выручалкина[1,2]

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ИСПАРЕНИЯ С ЗАЛИВА КАРА-БОГАЗ-ГОЛ

АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты анализа батиметрии залива Кара-Богаз-Гол, выполненные по цифровой модели рельефа дна залива. Показаны особенности морфометрии залива. Выше отметки −30 м БС (Балтийской системы) залив имеет крутые и обрывистые берега, ниже отметки −34 м БС практически плоское дно. От −28 до −30 м БС площадь зоны мелкой воды с глубиной до 1 м меняются от 0.5 до 16 %, с глубиной до 2 м — с 2 до 40 %, соответственно. Особенности морфологии ложа залива таковы, что ниже −28 м БС соотношение площади мелкой и глубокой зон меняются и значительно увеличивается площадь мелководий. Для получения оценки влияния батиметрии при разных гидрометеорологических условиях на испарение залива совместно с цифровой модели рельефа дна залива была использована модель тепло-массообмена системы водоем-атмосфера. Интенсификация испарения проявляется на уровне 29.9 м БС даже при скорости ветра 1 м/с на северных и юго-восточных мелководных частях акватории и достигает 5–12.5 %. При скорости ветра 5 м/с интенсификация испарения нарастает и достигает значений 10–15 % на уровне −27 м БС и 12.5–50 % на уровне −29.9 м БС. При скорости ветра 10 м/с возрастает от 12 % в центре залива до 30 % у береговой линии при уровне 27 м БС, в аналогичных зонах от 15 до 60…100 % при уровне 29.9 м БС и от 18 до 60…120 % при уровне 31.8 м БС. Оценки испарения показали, что при уровнях −29.5…−31.5 м БС залив наиболее интенсивно взаимодействует с атмосферой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Кара-Богаз-Гол, цифровая модель рельефа, батиметрическая карта, морфометрия, испарение

Tatiana Yu. Vyruchalkina[3,4]

INVESTIGATION OF THE FEATURES OF THE INTENSIFICATION OF EVAPORATION FROM THE KARA-BOGAZ-GOL BAY

ABSTRACT

The article presents the results of the analysis of the bathymetry of the Kara-Bogaz-Gol Bay, made using a digital model of the relief of the bottom of the bay. The features of the morphometry of the bay are shown. Above the -30 m BS mark, KBG Bay has steep and precipitous

[1] Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Кропоткинский пер., д. 6, Москва, Россия, 119034, *e-mail:* **vyruchi@list.ru**

[2] Институт водных проблем Российской академии наук, ул. Губкина, д. 3, Москва, Россия, 119333, *e-mail:* **vyruchi@list.ru**

[3] N.N. Zubov's State Oceanographic Institute, 6, Kropotkinsky ln., Moscow, 119034, Russia, *e-mail:* **vyruchi@list.ru**

[4] Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, 3, Gubkina str., Moscow, 119333, Russia, *e-mail:* **vyruchi@list.ru**

shores, below the −34 m BS mark there is almost a flat bottom. From −28 to −30 m BS the area of the shallow water zone with a depth of up to 1 m varies from 0.5 to 16 %, with a depth of up to 2 m from 2 to 40 %, respectively. The features of the morphology of the gulf bed are such that below −28 m BS the ratio of the area of shallow and deep zones change and the area of shallow waters increases significantly. To obtain an assessment of the effect of bathymetry under different hydrometeorological conditions on the evaporation of the bay, a model of heat and mass transfer of the reservoir-atmosphere system was used together with a digital model of the relief of the bottom of the bay. The intensification of evaporation is manifested at the level of 29.9 m BS even at a wind speed of 1 m/s in the northern and southeastern shallow parts of the water area and reaches 5–12.5 %. At a wind speed of 5 m/s, evaporation intensification increases and reaches values of 10–15 % at the level of −27 m BS and 12.5–50 % at the level of −29.9 m BS. At a wind speed of 10 m/s, it increases from 12 % in the center of the bay to 30 % near the coastline at the level of 27 m BS, in similar zones from 15 to 60...100 % at the level of 29.9 m BS and from 18 to 60...120 % at the level of 31.8 m BS. Evaporation estimates have shown that at levels of −29.5... −31.5 m BS, the bay interacts most intensively with the atmosphere.

KEYWORDS: Kara-Bogaz-Gol, digital elevation model, bathymetric map, morphometry, evaporation

ВВЕДЕНИЕ

Залив Кара-Богаз-Гол (КБГ) — один из уникальных водоемов на планете. Первые его исследования начаты в XVIII веке. В начале XX в. специальная многоцелевая экспедиция выполнила обширные исследования в области метеорологии, гидрологии и гидрохимии, и в дальнейшем изыскания в заливе проводились на относительно регулярной основе. Однако в публикациях батиметрия залива представлена лишь схематическими картами, а морфометрические зависимости — в виде нескольких пар величин уровень-зеркало и уровень-объем вод залива. По всей видимости, это обусловлено тем, что береговая линия залива и рельеф дна значительно менялись во времени. До настоящего времени мало изучено и испарение с залива. В источниках встречаются величины испарения, полученные двумя методами: балансовым и по эмпирическим/полуэмпирическим соотношениям. По эмпирическим/полуэмпирическим соотношениям годовая величина испарения с акватории залива оценивалась с учетом поправочных коэффициентов по методу Вильда за 1923–1924 гг. ~950 мм [*Щербак*, 1930] и по формуле Бигелоу за 1934–1935 гг. 990 мм [*Разумовский*, 1940], по наблюдениям на большом испарителе в 1947–1951 [*Поляков*, 1961] получено 1300 мм и в 1957–1958 гг. [*Буйневич*, 1963] 832 мм. В 1957 г. по данным [*Миронова*, 1960] испарение с рапы прибрежной зоны по трем различным методикам составило 720, 994 и 1023 мм соответственно, при этом глубина в месте измерения составляла 10–15 см, соленость в течение периода измерений изменялась в диапазоне от 100 до 270 ‰, температура воды изменялась в диапазоне 26–38 °С. По водному балансу залива годовое испарение с его поверхности в этот год оценивалось в 770 мм. Так же Мироновой Н.Я. по формуле В.С. Самойленко получено, что в 1950–1951 гг. испарение составило ~870 мм.

Облик залива в XX в. менялся кардинально. По данным [*Лепешков* и др., 1981; *Leroy* et al., 2006; *Geldiyew*, 2008] колебания его уровня происходили в диапазоне от −27 до −33.5 м БС (Балтийской системы), что отражалось в изменении размеров акватории залива и соотношения площадей и объемов. Для такого мелководного водоема, как Кара-Богаз-Гол, понижение уровня воды неуклонно приводит к превращению более глубоководных участков в мелководные, что делает необходимым учитывать влияние глубины на интенсивность взаимодействия с атмосферой с учетом изменения приводной скорости

ветра [*Панин* и др., 2006]. Приведенные факторы определяют необходимость проведения исследований морфометрии залива и зон мелководий с учетом колебания уровня воды в нем и оценки влияния этих изменений на интенсификацию испарения.

Цель работы — оценка влияния изменения площадей мелководных зон на интенсификацию испарения с залива. При этом решались следующие задачи: выявление особенностей морфометрии залива, соотношения площадей глубоководной и мелководной зон водоема при разных уровнях воды, а также оценка интенсификации испарения с учетом глубин водоема и приводной скорости ветра.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании применялась цифровая модель залива с пространственным разрешением 100×100 м. Она была подготовлена на основе топографических карт м-бов 1: 200 000 и 1: 100 000, опубликованных в 1986–1989 гг. Главным управлением геодезии и картографии СССР, и описана в статье [*Выручалкина*, 2020]. Оцифровка карт и построение модели местности, включая залив, производились с помощью программ Didger 5, Surfer 12 пакета Golden Software.

Для получения оценки влияния батиметрии при разных гидрометеорологических условиях на испарение залива была использована модель тепло-массообмена системы водоем-атмосфера [*Панин* и др., 2006]. Модель позволяет оценить непосредственное влияние глубины водоема на процессы энерго-массообмена. Ранее модель показала хорошие результаты и при исследовании интенсификации испарения с пресноводных водоемов [*Иванова* и др., 2013; *Гиппиус* и др., 2016; *Панин* и др., 2016]. В реальных условиях, с использованием непосредственных данных о глубине, площади и повторяемости скорости ветра, учет эффекта мелководий должен приводить к увеличению результирующей величины испарения с поверхности водоемов. Величина коррекции для КБГ должна быть разной для разных уровней стояния воды. Привлечение данной модели вызвано тем, что это пока единственная модель, в которой может быть учтена батиметрия при расчете испарения и теплообмена водоема с атмосферой. Согласно этой модели, интенсивность испарения, теплообмена и энергообмена мелководий рассчитывается в виде:

$$U_*^{SW} = U_* + U_* \cdot k_U^{SW} \cdot \frac{h^{sw}}{H} \approx U_*(1 + 1.6h^{sw}/H) \quad (1);$$

$$Q_T^{SW} = Q_T + Q_T \cdot k_T^{SW} \cdot \frac{h^{sw}}{H} \approx Q_T(1 + 2h^{sw}/H) \quad (2);$$

$$E^{SW} = E + E \cdot k_E^{SW} \cdot \frac{h^{sw}}{H} \approx E(1 + 2h^{sw}/H) \quad (3),$$

где: h — высота волны, H — глубина, E и Q_T — потоки влаги и тепла соответственно на глубокой воде, U_* — динамическая скорость ветра, U_*^{SW}, Q_T^{SW}, E^{SW} — потоки количества движения, тепла и влаги для мелководных зон;

$k_T^{SW} \approx k_E^{SW} \approx 2.0$, $k_U^{SW} \approx 1.6$ — эмпирические коэффициенты, индекс «*sw*» означает «мелководье».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Уровень КБГ за последние 100 лет имел следующие характерные позиции: в 1920–1930-х и 1950–1970-х гг. он колебался вокруг отметок −27 м и −31,9 м БС соответственно, в начале 1980-х гг. опустился почти до −34 м БС, затем в 1996 г. поднялся выше −27.5 м БС и настоящее время находится на отметке ниже −29 м БС [*Лепешков* и др., 1981; *Leroy* et al., 2006; *Geldiyew*, 2008]. Площадь залива сначала сократилась более чем в 1.5 р., затем восстановилась до изначальных значений. Объем залива менялся значительнее. Со 100–120 км^3 в 1910–1930-х гг. он сократился до 20–30 км^3 в 1950–1970-х гг. В первой половине 1980-х гг. залив практически пересох. В 2022 г. объем залива составляет ~60 км^3. Рис. 1 наглядно иллюстрирует, как изменялись площади и глубины залива при разных отметках уровня. В качестве характерных приняты отметки −27, −29.9 и −31.8 м БС.

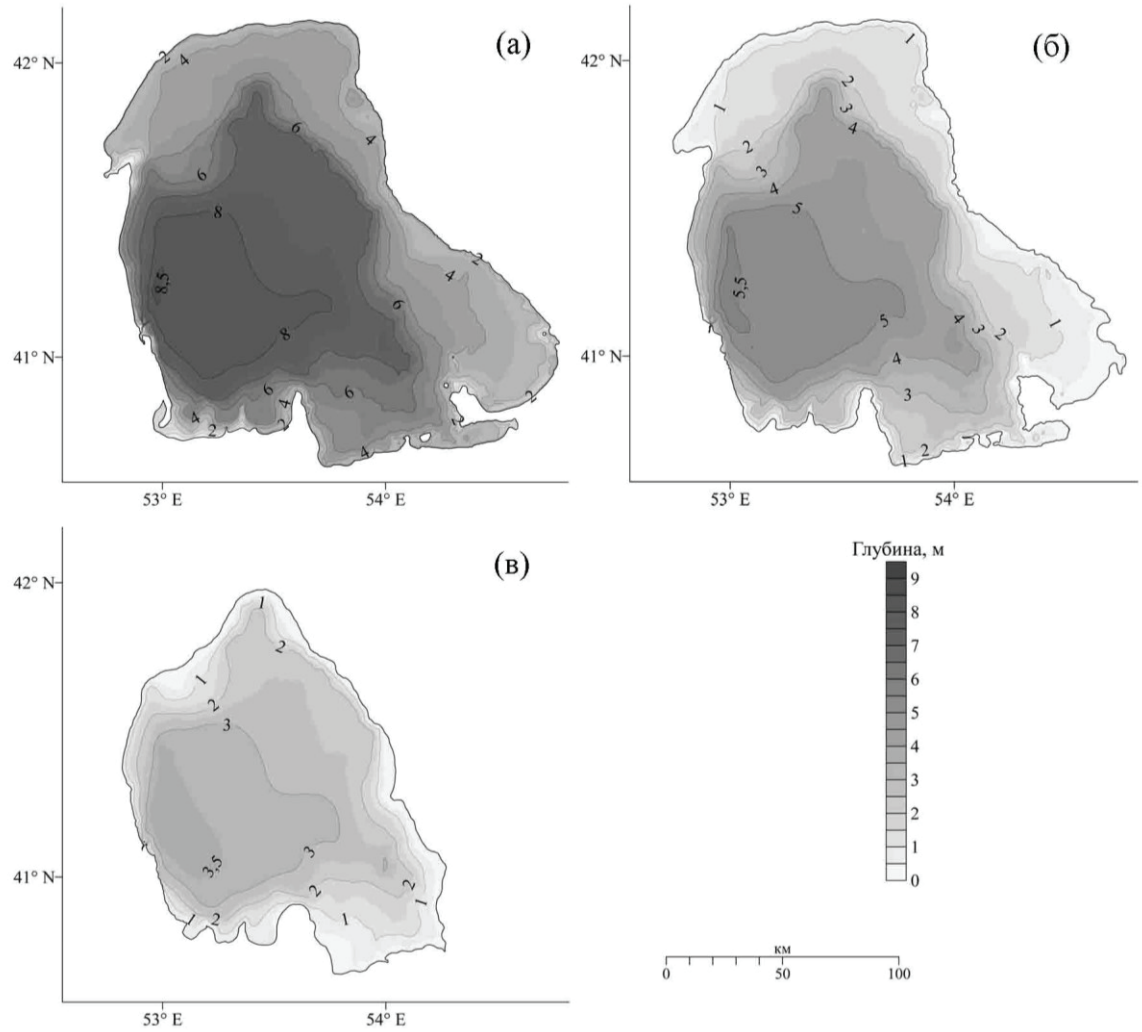


Рис. 1. Батиметрия залива Кара-Богаз-Гол при отметках уровня −27 (а), −29.9 (б) и −31.8 (в) м БС
Fig. 1. Bathymetry of the Kara-Bogaz-Gol Bay at levels of −27 (a), −29.9 (b) and −31.8 (c) m BS

Согласно [*Выручалкина*, 2020], выше отметки −30 м БС залив КБГ имеет крутые и обрывистые берега. От отметки −30 м БС до −34 берега имеют уклон 30–45 %, ниже отметки −34 м БС практически плоское дно. Морфометрические зависимости залива

представлены на рис. 2а. Информацию о количественном соотношении между мелководными и глубоководными зонами при разных уровнях залива дает рис. 2б. Действительно, они сильно зависят от отметок уровня залива. Например, от −28 до −30 м БС площадь зоны мелкой воды с глубиной до 1 м меняются от 0.5 до 16 %, с глубиной до 2 м с 2 до 40 % соответственно. Особенности морфологии ложа залива таковы, что ниже −28 м БС соотношение площади мелкой и глубокой зон меняются и значительно увеличивается площадь мелководий.

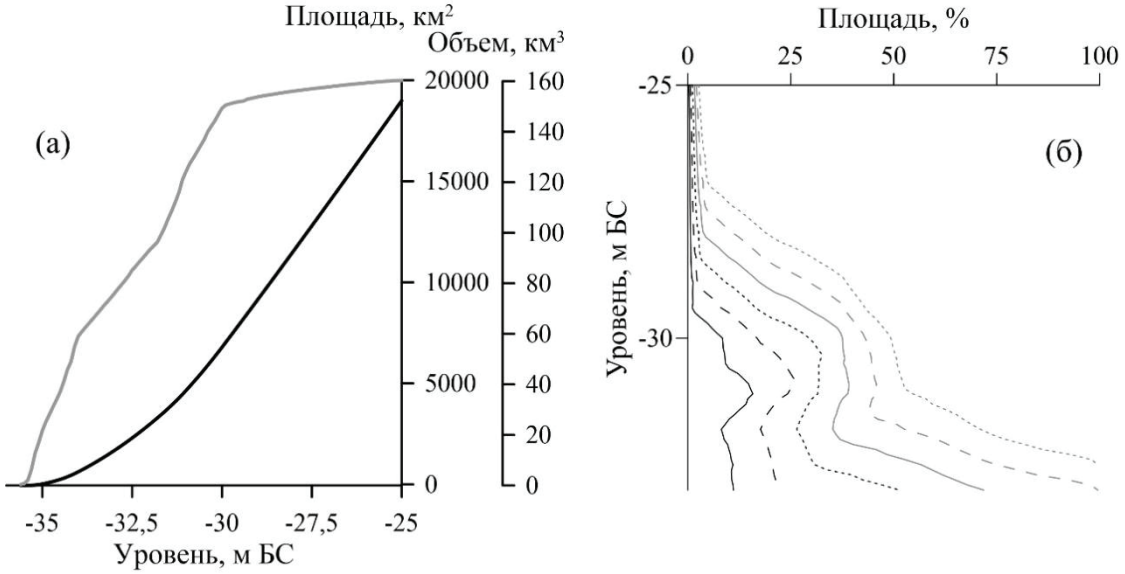


Рис. 2. Морфометрические зависимости (а) и изменение площади мелководий Кара-Богаз-Гола при уровне −25…−33 м БС в % (б): а) площадь — серая линия, объем — черная линия; б) глубиной до 0,5 м — черная сплошная, до 1 м — черная пунктирная, до 1,5 м — черная точечная, до 2 м — серая сплошная, до 2,5 м — серая пунктирная, до 3 м — серая точечная линии

Fig. 2. Morphometric dependences (a) and the change in the area of the shallow waters of the Kara-Bogaz-Gol Bay at the level of −25... −33 m BS in % (b): a) area — gray line, volume — black line; b) up to 0.5 m deep — black solid, up to 1 m — black dashed, up to 1.5 m — black dotted, up to 2 m — gray solid, up to 2.5 m — gray dashed line, up to 3 m — gray dotted line

Необходимо уточнить, что на морфометрические характеристики залива оказывает влияние его водно-солевой баланс. При существенном уменьшении объема воды в КБГ происходит рост концентрации солей в рассоле и изменение его химического состава, что приводит к их кристаллизации и выпадению в осадок. Вследствие этого процесса дно бассейна поднимается, изменяются морфометрические характеристики залива. Цифровизация залива проводилась по картам 1986–1989 гг., на которых были представлены данные изменений 1970–1980-х гг., когда уровень залива существенно понизился и/или залив обмелел. Фактически в модели представлены данные рельефа дна залива с максимальными отметками вследствие седиментации солей. После ликвидации плотины в проливе Кара-Бога-Гол каспийская вода снова беспрепятственно поступает в залив, что должно было привести к растворению части солей. С момента ликвидации плотины прошло более 30 лет, из них последние 15 лет уровень залива снижается, что должно было интенсифицировать процесс выпадения солей. Таким образом, в настоящее время дно КБГ могло как опуститься в результате растворения солей водой из Каспия, так и подняться. Данные в открытом доступе об этом отсутствуют.

Анализ изменения батиметрии залива открывает новые возможности для количественной оценки изменения испарения с него при разных отметках уровнях и при разных динамических условиях взаимодействия водоема с атмосферой. Этот этап исследований направлен на применение модели тепло-влагообмена [*Панин* и др., 2006] мелководных и прибрежных акваторий с атмосферой на основе использования стандартной гидрометеорологической информации.

Интенсификация энерго-массообмена мелководных акваторий с атмосферой связана с тем, что волны в мелководных акваториях более крутые, чем в глубоководных частях водоема и раньше (при более низких скоростях ветра) обрушаются. Все это приводит к усилению шероховатости водной поверхности в аэродинамическом смысле и, соответственно, к более интенсивному турбулентному обмену импульсом, теплом и влагой. В реальных условиях, с использованием непосредственных данных о глубине, площади и повторяемости скорости ветра, модель тепло-влагообмена позволяет уточнять значения характеристик взаимодействия водоема с атмосферой, включая учет эффекта мелководий, на основе стандартной гидрометеорологической информации. Первые результаты, касающиеся оценки роли глубины (батиметрии) КБГ при разных динамических условиях на интенсификацию испарения представлены на рисунке 3. На рисунке представлены относительные величины, т. е. во сколько раз увеличивается испарение. Для анализа выбраны три варианта скорости ветра: 1, 5 и 10 м/с.

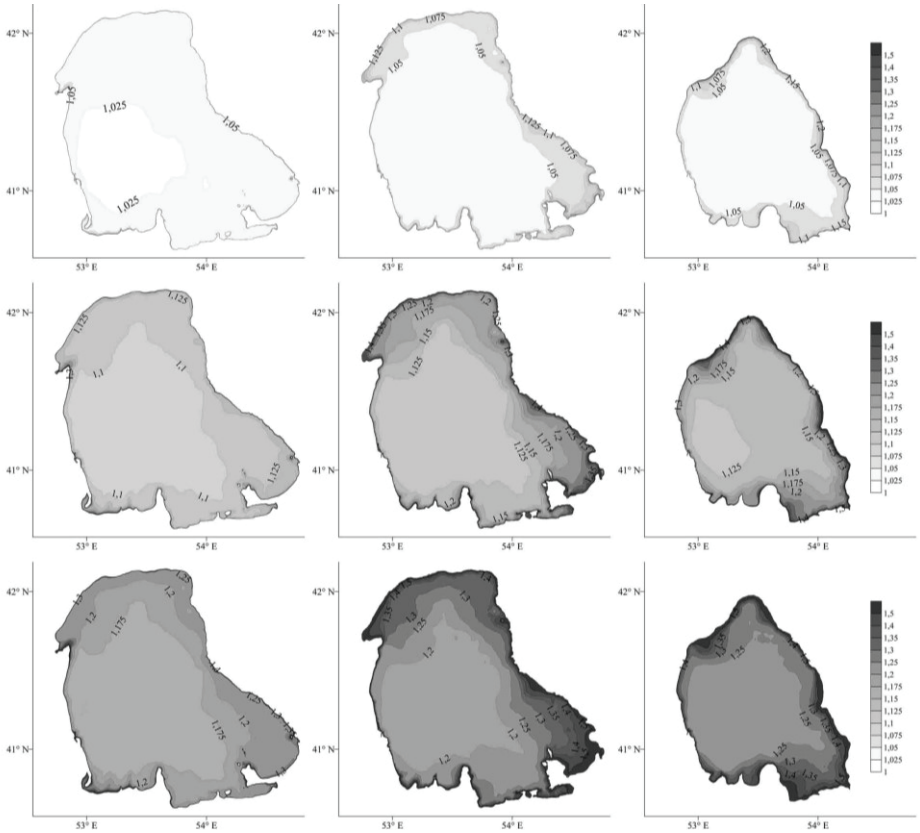


Рис. 3. Значения интенсификации испарения с Кара-Богаз-Гола при разных отметках уровня (−27, −29.9 и −31.8 м БС слева направо) и скоростях ветра 1, 5 и 10 м/с, сверху вниз
Fig. 3. Values of evaporation intensification of the Kara-Bogaz-Gol Bay at different levels (−27, −29.9 and −31.8 m BS from left to right) and wind speeds of 1, 5 and 10 m/s, from top to bottom

Даже при скорости ветра 1 м/с на северных и юго-восточных мелководных частях акватории можно заметить некоторую интенсификацию испарения, достигающую 5–12.5 %

при уровне 29.9 м БС. Хорошо видно, что на уровне −27 м БС уже при скорости ветра 5 м/с заметно проявляется влияние глубины на испарение (интенсификация достигает 10–15 % по всей акватории). В этих же областях на уровне −29.9 м БС при скорости 5 м/с интенсификация испарения составляет 12.5–50 %. Расчеты показывают, что при ветрах 10 м/с, мелководные акватории особенно сильно испаряют воду. Величина испарения при таких скоростях ветра возрастает от 12 % в центре залива до 30 % у береговой линии при уровне 27 м БС, в аналогичных зонах от 15 до 60…100 % при уровне 29.9 м БС и от 18 до 60…120 % при уровне 31.8 м БС (рис. 3).

Оценки испарения показали, что при уровнях −29.5…−31.5 м БС режим взаимодействия залива с атмосферой находится в некотором критическом состоянии (рис. 4).

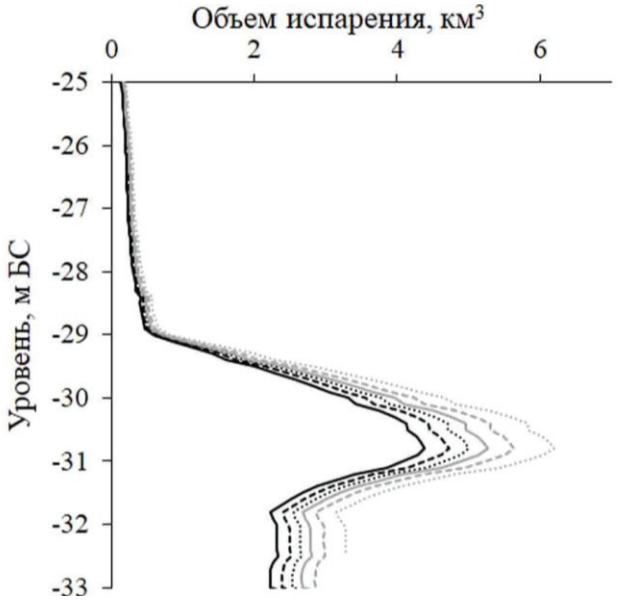


Рис. 4. Изменение объемов испаряемой воды мелководьями залива Кара-Богаз-Гол (при глубине 1 м) при разных отметках уровня и скоростях ветра. При скорости (м/с). 1 — черная сплошная, 3 — черная пунктирная, 5 — черная точечная, 7 — серая сплошная, 10 — серая пунктирная, 15 — серая точечная линии

Fig. 4. The change in the volume of evaporated water by the shallow waters of the Kara-Bogaz-Gol Bay (at a depth of 1 m) at different levels and wind speeds. At speed (m/s) 1 — black solid, 3 — black dashed, 5 — black dotted, 7 — gray solid, 10 — gray dashed, 15 — gray dotted lines

Батиметрия КБГ такова, что при снижении уровня воды ниже −29…−29.5 м БС при разных скоростях ветра объемное испарение сначала заметно увеличивается до отметки уровня −30.5…−31 м БС, а затем уменьшается (рис. 2, 4). Это может означать, что КБГ при этих уровнях находится в некотором критическом состоянии в смысле его взаимодействия с атмосферой, увеличение испарения приводит к росту скорости падения уровня залива.

ВЫВОДЫ

За последнее столетие уровень воды в заливе вслед за колебаниями Каспийского моря претерпевал значительные изменения, что отражалось на морфометрических характеристиках залива. Площадь залива сначала сократилась более чем в 1.5 р., затем восстановилась до изначальных значений. Объем залива менялся значительнее. Со 100–120 км^3 в 1910–1930-х гг. он сократился до 20–30 км^3 в 1950–1970-х гг. В первой половине 1980-

х гг. залив практически пересох. В 2022 г. объем залива составляет ~60 км^3. Установлено, что на гидрологический режим залива Кара-Богаз-Гол существенное влияние оказывает испарения с мелководных акваторий. Отметки −29…−29.5 м БС для залива имеют некоторой критической характер в смысле его взаимодействия с атмосферой. При снижении уровня залива до этих отметок происходит интенсификация испарения за счет увеличения площадей мелководий. Интенсификация при различных скоростях ветра и глубинах составляет от 5 до 120 %, что указывает на важность учета батиметрии водоема при оценке испарения. Вследствие роста испарения должна возрастать и скорость падения уровня, что является предметом дальнейших исследований.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 22-27-00800.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was performed within the framework of the RSF grant № 22-27-00800.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Буйневич Д.В., Буйневич Н.А. Испарение с поверхности залива Кара-Богаз-Гол. Метеорология и гидрология, 1963. № 5. С. 35–37.

Выручалкина Т.Ю. Создание цифровой модели рельефа залива Кара-Богаз-Гол. Труды Карельского научного центра РАН, 2020. № 4. С. 1–6. DOI: 10.17076/lim1199.

Гиппиус Ф.Н., Архипкин В.С., Фролов А.В. Сезонный ход испарения с поверхности Каспия с учетом влияния волнения и глубины моря. Вестник Московского Университета. Серия 5. География, 2016. № 5. С. 26–32.

Иванова Е.В., Панин Г.Н., Поздняков Ш.Р., Румянцев В.А. Особенности режима испарения с акватории Ладожского озера. Метеорология и гидрология, 2013. № 11. С. 87–93.

Лепешков И.Н., Буйневич Д.В., Буйневич Н.А., Седельников Г.С. Перспективы использования солевых богатств Кара-Бога-Гола. М.: Наука, 1981. 274 с.

Миронова Н.Я. Водный баланс залива Кара-Богаз-Гол. Труды ИО РАН, 1960. Т. 37. С. 110–122.

Панин Г.Н., Выручалкина Т.Ю., Гречушникова М.Г., Соломонова И.В. Особенности гидрологического режима Цимлянского водохранилища при климатических изменениях в бассейне Дона. Водные ресурсы, 2016. Т. 43. № 2. С. 111–121. DOI: 10.7868/S03210596160 20127.

Панин Г.Н., Насонов А.Е., Фокен Т. Испарение и теплообмен водоема с атмосферой при наличии мелководий. Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2006. Т. 42. № 3. С. 367–383.

Поляков В.Д. Физико-химическое исследование залива Кара-Богаз: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора химических наук. Академия наук СССР. М.: Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ) РАН, 1961. 30 с.

Разумовский Н.И. Опыт определения испарения с бассейнов высокой солености. Метеорология и гидрология, 1940. № 8. С. 80–81.

Щербак С.А. Климат Карабугаза. Кара-Богаз-Гол и его промышленное значение. Л.: Изд-во АН СССР, 1930. С. 66–68.

Geldiyew O. The study of hydro-mineralogical and ecological regime of Kara-Bogaz-Gol lagoon, Turkmenistan. Sustainable Use and Development of Watersheds. Springer Science+Business Media B.V., 2008. P. 415–423. DOI: 10.1007/978-1-4020-8558-1_26.

Leroy S.A.G., Marret F., Giralt S., Bulatov S.A. Natural and anthropogenic rapid changes in the Kara-Bogaz-Gol over the last two centuries reconstructed from palynological analyses and a

comparison to instrumental records. Quaternary International, 2006. T. 150. No. 1. C. 52–70. DOI: 10.1016/j.quaint.2006.01.007.

REFERENCES

Buinevich D.V., Buinevich N.A. Evaporation from the surface of the Kara-Bogaz-Gol Bay. Russian Meteorology and Hydrology, 1963. No. 5. P. 35–37 (in Russian).

Geldiyew O. The study of hydro-mineralogical and ecological regime of Kara-Bogaz-Gol lagoon, Turkmenistan. Sustainable Use and Development of Watersheds. Springer Science + Business Media B.V., 2008. P. 415–423. DOI: 10.1007/978-1-4020-8558-126.

Gippius F.N., Arkhipkin V.S., Frolov A.V. Seasonal variations of evaporation from the Caspian Sea surface with account of wind waves and sea depth. Moscow University Bulletin. Series 5. Geography, 2016. No. 5. P. 26–32 (in Russian).

Ivanova E.V., Panin G.N., Pozdnyakov S.R., Rumyantsev V.A. Peculiarities of evaporation regime of Ladoga Lake. Russian Meteorology and Hydrology, 2013. V. 38. No. 11. P. 782–786 (in Russian). DOI: 10.3103/S1068373913110083.

Lepeshkov I.N., Buinevich D.V., Buinevich N.A., Sedelnikov G.S. Prospects for the use of salt riches of Kara-Bogaz-Gol. Moscow: Nauka, 1981. 274 p. (in Russian).

Leroy S.A.G., Marret F., Giralt S., Bulatov S.A. Natural and anthropogenic rapid changes in the Kara-Bogaz-Gol over the last two centuries reconstructed from palynological analyses and a comparison to instrumental records. Quaternary International, 2006. V. 150. No. 1. P. 52–70. DOI: 10.1016/j.quaint.2006.01.007.

Mironova N.Ya. Water balance of the Kara-Bogaz-Gol Bay. Proceedings of the Institute of Oceanology of the USSR Academy of Sciences, 1960. V. 37. P. 110–122 (in Russian).

Panin G.N., Nasonov A.E., Foken T. Evaporation and heat exchange of a body of water with the atmosphere in a shallow zone. Izvestiya: Atmospheric and Oceanic Physics, 2006. V. 42. No. 3. P. 337–352 (in Russian). DOI: 10.1134/S0001433806030078.

Panin G.N., Vyruchalkina T.Y., Grechushnikova M.G., Solomonova I.V. Specific features of the hydrological regime of the Tsimlyansk reservoir under climate changes in the Don basin. Water Resources, 2016. V. 43. No. 2. P. 249–258 (in Russian). DOI: 10.1134/S0097807816020123.

Polyakov V.D. Physico-chemical study of the Kara-Bogaz-Gol Bay. Dissertation abstract for the degree of Doctor of Chemical Sciences. Academy of Sciences of the USSR. Moscow: V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS, 1961. 30 p. (in Russian).

Razumovsky N.I. Experience in determining evaporation from high salinity pools. Russian Meteorology and Hydrology, 1940. No. 8. P. 80–81 (in Russian).

Shcherbak S.A. Climate of Kara-Bogaz-Gol. Kara-Bogaz-Gol and its industrial significance. Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1930. P. 66–68 (in Russian).

Vyruchalkina T.Y. Creation of a digital relief model of the Kara-Bogaz-Gol Bay. Transactions of Karelian Research Centre of Russian Academy of Science, 2020. No. 4. P. 1–6 (in Russian). DOI: 10.17076/li m1199.

УДК: 551.324.6

DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-616-629

А.Д. Китов[1]

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ БАЗЫ ДАННЫХ ЛЕДНИКОВ ПЛАТО ПУТОРАНА И ХРЕБТА МУНКУ-САРДЫК

АННОТАЦИЯ

Состояние горных ледников тесно связано с обеспечением водными ресурсами, отслеживанием изменения климата, трансформацией ландшафта и др. В связи с этим проведение регулярных инвентаризаций территорий оледенения представляет фундаментальную задачу географических исследований. Результаты инвентаризации ледников заносятся в специальные каталоги, в настоящее время в цифровые базы данных. Такой каталог существовал для ледников СССР, который представлен и расширен в цифровой форме как база данных (БД) ледников России. Современное состояние ледников мира отражено в БД через сервис Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS), которую дополняют данные Randolph Glacier Inventory (RGI). База данных, созданная в Институте географии РАН, тоже входит в БД GLIMS. Однако в этих БД не отражена динамика ледников с определенной периодичностью. Существуют также особенности горных массивов, затрудняющие дешифрирование ледников. К такой территории относится плато Путорана. Трапповое строение рельефа, способствующее формированию многолетних снежников, и наличие множества рек и озер, на которых формируются наледи, требует дополнительной информации для составления БД ледников. Представление характеристик ледников для нескольких основных параметров (площадь, длина, экспозиция, высотная отметка низа и верха ледника и др.) в горном массиве, включающем 10–20 ледников, не представляет сложности. Однако ледники плато Путорана отличаются своей многочисленностью и своеобразностью конфигурации, определяемой особенностями рельефа. Только по исходным данным (топографическим картам) выделено около 200 нивально-гляциальных объектов, учтенных как ледники. Поэтому данную БД целесообразно рассматривать именно как БД нивально-гляциальных образований, которые предстоит классифицировать по типу объекта. Представляя динамику ледников в БД, при условии потепления климата, приводящего в основном к сокращению и исчезновению ледников, также необходимо учитывать и распад на части некогда больших ледников. Последнее характерно для ледников плато Путорана. Создаваемая БД отражает состояние ледников в 1960, 1979, 1987 гг. Эти данные сравниваются и дополняются существующими международными БД GLIMS и ИГ РАН. В данной работе проведено сравнение с ледниками хребта Мунку-Сардык, как характерными и наиболее изученными представителями оледенения южной части Сибири. Отмечаются особенности представления характеристик этих ледников в международных БД.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: база данных, Восточная Сибирь, ледник, плато Путорана, снимки Landsat и топографические карты

[1] Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, д. 1, Иркутск, Россия, 664033, *email:* **kitov@irigs.irk.ru**

Aleksandr D. Kitov[1]

FEATURES OF THE FORMATION OF A DATABASE OF GLACIERS OF THE PUTORANA PLATEAU AND THE MUNKU-SARDYK RIDGE

ABSTRACT

The state of mountain glaciers is closely related to the provision of water resources, tracking climate change, transforming the landscape, etc. Therefore, conducting regular inventories of glaciation areas is a fundamental task of geographical research. The results of the glacier inventory are recorded in special catalogs, currently in digital databases. Such a catalog existed for the glaciers of the USSR, which is presented and expanded in digital form as a database (DB) of glaciers in Russia. The current state of the world's glaciers is reflected in the database through the Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) service, which is supplemented by data from Randolph Glacier Inventory (RGI) and GAMDAM (Glacier Area Mapping for Discharge from the Asian Mountains). The database was created at the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, also included in the GLIMS database. However, these databases do not reflect the dynamics of glaciers with a certain periodicity. There are also features of mountain ranges that make it difficult to decrypt glaciers. Such an area includes the Putorana plateau. The trapway structure of the relief, which contributes to the formation of perennial snowflakes, and the presence of many rivers and lakes on which ice forms, requires additional information to compile a database of glaciers. The representation of the characteristics of glaciers for several main parameters (area, length, exposure, elevation of the bottom and top of the glacier, etc.) in a mountain range including 10–20 glaciers is not difficult. However, the glaciers of the Putorana plateau are distinguished by their abundance and peculiarity of configuration, determined by the features of the relief. Only according to the initial data (topographic maps), about two hundred nival-glacial objects were identified, recorded as glaciers. Therefore, it is advisable to consider this database as a database of nival-glacial formations, which are to be classified according to the type of object. Presenting the dynamics of glaciers in the database, under the condition of climate warming, leading mainly to the reduction and disappearance of glaciers, it is also necessary to take into account the disintegration of once large glaciers. The latter is characteristic of the glaciers of the Putorana plateau. The created database reflects the state of glaciers in 1960, 1979, 1987. In this paper, a comparison is made with the glaciers of the Munku-Sardyk ridge, as characteristic and most studied representatives of the glaciation of the southern part of Siberia. The features of the presentation of the characteristics of these glaciers in international databases are noted.

KEYWORDS: database, Eastern Siberia, glacier, Putorana plateau, Landsat imagery and topographic maps

ВВЕДЕНИЕ

Малые горные ледники особенно чувствительны к изменению климата [IPCC, 2007; 2022]. В результате потепления климата эта чувствительность проявляется в сокращении ледников, распаде на отдельные еще меньшие ледники, бронировании их поверхности моренами и др. Подобная динамика отмечается практически во всех районах современного оледенения в горах Сибири. Плато Путорана представляет такой район, но расположенный значительно севернее, чем территории оледенения в горах Восточного Саяна, Северного

[1] V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 1, Ulan-Batorskaya str., Irkutsk, 664033, Russia, *email:* **kitov@irigs.irk.ru**

Прибайкалья, хребта Кодар. Также известно, что лед Арктики, находящийся еще севернее, тает ускоренными темпами [*Matveeva*, *Semenov*, 2022]. В современных каталогах отражен некоторый срез состояния ледников. Часто эти данные отражают период первоначального исследования оледенения в каком-то горном массиве. Плато Путорана расположено за Северным полярным кругом, поэтому сравнение изменения ледников этого плато с другими ледниками широтного трансекта от Кодара до гор Монголии имеет дополнительный интерес.

Первоначально результаты инвентаризации ледников публиковались в специальных каталогах. В настоящее время каталоги представлены как цифровые базы данных (БД). Для отслеживания динамики ледников с использованием ГИС составлен ряд баз данных [*Китов*, *Плюснин*, 2012; *Китов* и др., 2017; *Хромова* и др., 2021; GLIMS, 2005]. В СССР такие каталоги составлялись по ледниковым районам. Каталоги публиковались в 1970–1980-е гг. Плато Путорана относится к 10-му району из 18 существующих [Каталог, 1981]. Первоначально в каталоге было представлено 22 ледника. Позднее В.А. Сарана [2005] исследовал 67 ледников. В БД Института географии РАН представлен уже 71 ледник [*Хромова* и др., 2021]. Эти ледники с 2020 г. вошли также в международную БД GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space).

Динамика ледников России и принципы создания БД подробно рассмотрены В.М. Котляковым с соавторами [2015], там же приведены последние данные по плато Путорана. Интересно также оценить динамику ледников горного массива Путорана и ключевых сибирских ледников, например, хребта Мунку-Сардык (рис. 1).

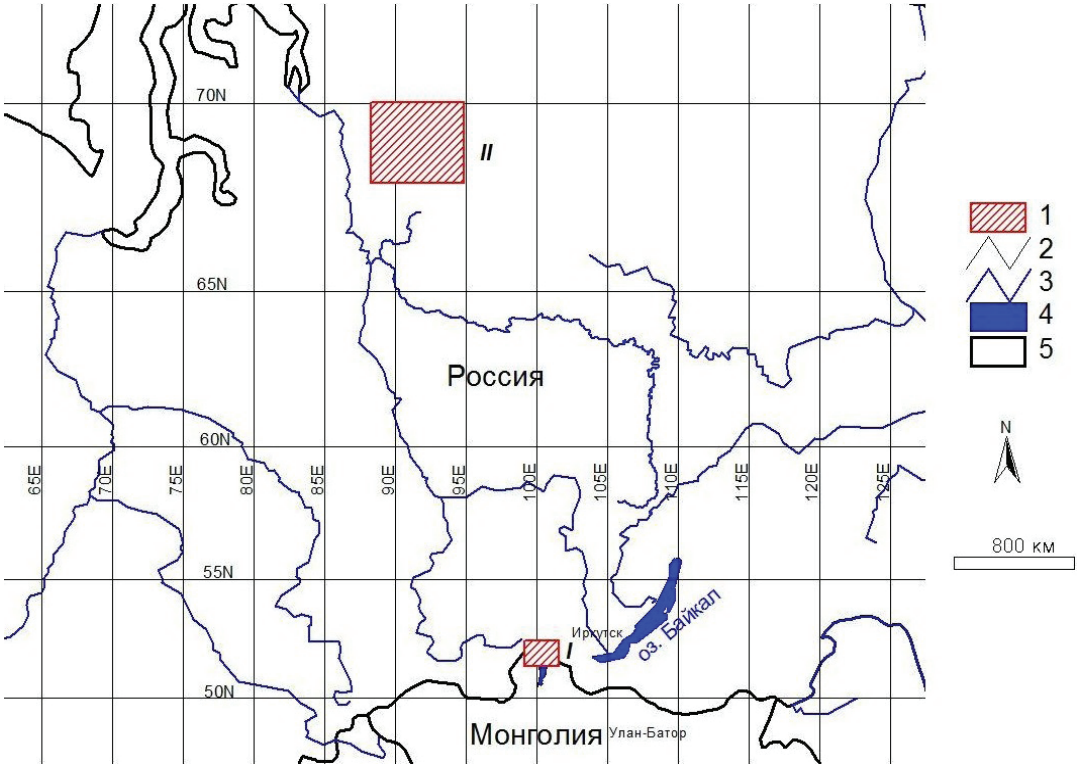


Рис. 1. Общий вид расположения участков: 1 — ключевые участки (районы исследования): I — массив Мунку-Сардык (Восточный Саян); II — плато Путорана; 2 — координатная сетка; 3 — реки; 4 — озера; 5 — государственные границы

Fig. 1. General view of the location of areas: 1 — key (research) areas: I — Munku-Sardyk massif (Eastern Sayan); II — Putorana Plateau; 2 — coordinate grid; 3 — rivers; 4 — lakes; 5 — state borders

Целью исследования явилось рассмотреть особенность представления характеристик ледников плато Путорана в базах данных и сравнение отдельных параметров уже изученных ледников массива Мунку-Сардык, Восточный Саян (рис. 1, ключевой участок I), с некоторыми ледниками названного плато (рис. 1, ключевой участок II).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ состояния ледников производился с использованием ГИС, а в качестве исходных данных рассматривались доступные топографические карты и данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Для плато Путорана доступной была топографическая карта м-ба 1: 200 000 (1960-х гг. издания) и данные Landsat-2, -5, -7, -8, с сайта Геологической службы США с 1979 по 2021 гг. (табл. 1). Использовались также международные базы данных GLIMS, RGI и ИГ РАН [*Хромова* и др., 2021; GLIMS, 2005].

Табл. 1. Пространственные данные на территорию плато Путорана
Table 1. Spatial data on the Putorana Plateau

Дата	Вид данных	Пространственное разрешение, м	Облачность, %
1960-е	Топографические карты R46	М-б: 1: 200 000	–
14.08.1979	Снимок Landsat-2	60	20
16.08.1979	Снимок Landsat-2	60	–
07.08.1985	Снимок Landsat-5	30	5
27.08.1987	Снимок Landsat-5	30	30
29.08.1987	Снимок Landsat-5	30	60
06.08.1988	Снимок Landsat-5	30	–
20.07.1990	Снимок Landsat-5	30	–
05.08.1990	Снимок Landsat-5	30	40
01.08.2000	Снимок Landsat-7	30	–
30.07.2000	Снимок Landsat-7	30	5
25.08.2009	Снимок Landsat-5	30	–
16.09.2011	Снимок Landsat-5	30	–
19.08.2013	Снимок Landsat-7	15	–
27.07.2013	Снимок Landsat-7	15	30
05.08.2013	Снимок Landsat-7	15	10
21.08.2013	Снимок Landsat-7	15	60
11.08.2013	Снимок Landsat-8	15	20
04.08.2013	Снимок Landsat-8	15	–
28.07.2013	Снимок Landsat-8	15	–
13.08.2013	Снимок Landsat-8	15	70
06.08.2014	Снимок Landsat-7	15	80
23.07.2014	Снимок Landsat-7	15	10
28.07.2014	Снимок Landsat-8	15	50
07.24.2015	Снимок Landsat-7	15	20
02.08.2015	Снимок Landsat-7	15	10
01.08.2015	Снимок Landsat-8	15	10
25.07.2015	Снимок Landsat-8	15	10
03.08.2015	Снимок Landsat-8	15	30
15.08.2020	Снимок Landsat-7	15	5
14.08.2020	Снимок Landsat-8	15	10
08.08.2021	Снимок Landsat-8	15	–

Вся территория оледенения плато Путорана покрывается 9 листами топографической карты и 4–6 кадрами Landsat. Для данного исследования в основном учитывались наиболее ранняя съемка (1979 г.) и данные, близкие или совпадающие с датой

БД GLIMS (2013 и 2020 гг.). Оптимальное временно́е окно, когда можно определить минимальное состояние ледника в сезоне, примерно с первых чисел до 20-х чисел августа. Это определяется климатическими условиями плато Путорана. Хотя наледи начинают разрушаться в конце мая и июне, но многие могут сохраняться до следующего ледообразования. Практически снег может пойти в течение всего лета, устойчивый снежный покров устанавливается с 28 августа [*Алексеев*, *Гиенко*, 2002]. Такие условия благоприятны для сохранения ледников, но затрудняют дешифрирование снимков из-за чрезмерной заснеженности. В связи с этим приходилось использовать снимки близких дат разных спутников, например, Landsat-5 и -7, или Landsat-7 и -8. После 2002 г. кадры Landsat-7 дефектны (с полосами, которые иногда закрывают ледник).

Космические снимки были приведены к единой системе координат WGS-84, проекция UTM, зона 46. Дешифрирование, векторизация границ объектов, измерения и составление БД выполнялись в ГИС-проекте с использованием программы ArcViewGIS-3.2a. В качестве подложки использовались RGB-синтезированные снимки: каналы 4–5–7 для Landsat-2, каналы 2–4–7 для Landsat-5 и 7 и 3–5–7 для Landsat-8 с улучшением до 15 м по каналу 8 (для Landsat-7, -8). Учитывая разрешение снимков 15 м/пикс. систематическая погрешность определения площади ледника оценивается в 0,12 км^2 или 5 % от измеряемой величины. Для снимков Landsat-2 и -5 с разрешением 60 и 30 м/пикс. точность определения площади — порядка 10–20 %.

Характеристики ледников вошли в международные БД GLIMS и RGI. Выделение границ ледников для указанных БД выполнялось автоматически по данным ДЗЗ ASTER 19.07.2013.[1] К сожалению, в это время, как было сказано выше, может быть много прошлогоднего снега, и размеры ледников могут быть завышены. Для БД ИГ РАН использовались снимки Sentinel-2 24.08.2018 (дата соответствует периоду абляции ледников). В последней версии БД GLIMS данные границ ледников скорректированы по данным ИГ РАН, но только для 70 ледников. В данной работе для анализа были выбраны первые 22 ледника, которые первоначально вошли в каталог ледников СССР [1981].

Число атрибутов, характеризующий ледник, в различных БД порядка 20–30. В БД RGI — 18, GLIMS — 31, ИГ РАН — 30, в каталоге ледников (основные таблицы) — 20. Многие поля БД часто не заполнены. В БД GLIMS много характеристик, представляющих ссылки на авторов, организации, даты анализа данных и т. п. Основными параметрами для мониторинга (отслеживания динамики) ледников являются площадь ледника, его длина, верхняя и нижняя высотные отметки, географические координаты центра, для идентификации код, или имя ледника. Пример атрибутов из каталога ледников СССР и соответственно электронного эквивалента представлен в табл. 2.

Поскольку в данной работе анализируется и используется для анализа динамики ледников различные БД, то решено было часть атрибутов сократить и расширить идентификацию объекта. Один и тот же ледник может иметь свое уникальное имя по разной системе каталогизации. Так, ледник Богатырь (№ 22) в системе WGI имеет код SU5C16106022, в GLIMS — G092189E69714N (в имени указаны широта и долгота), в БД ИГ РАН — Ru10-07.0051, в RGI — RGI50-10.00355. По имени (коду) ледника можно выделять ледники, входящие во все БД, и анализировать другие сочетания вхождения ледников в ту или иную базу.

Исследуя ледники по данным ДЗЗ, в основном под площадью ледника подразумевается его открытая часть, хорошо дешифрируемая на космоснимках. Длина открытой части ледника не всегда сопоставима в разных исследованиях, т. к. может

[1] The GLIMS Glacier Database. Электронный ресурс: http://glims.colorado.edu/glacierdata/ (дата обращения 03.03.2023).

зависеть от конфигурации кара. Не всегда понятно, как провести линию от главной вершины до конца языка ледника, если ледник извилистый или имеет несколько языков. Особенно это характерно для ледников плато Путорана, они могут быть больше вытянуты в ширину, чем вниз по склону. Учитывая также, что используются данные ДЗЗ, параметры Topo year, Photo type, Photo year должны отражать дату съемки и тип космического аппарата, как, например, для Landsat (табл. 1, 2).

Табл. 2. Основное описание ледника
Table 2. General description of the glacier

Название колонки	Тип данных	Описание
ID — Номер	Числовой	Номер объекта по порядку векторизации
Code	Текстовый	Международный (WGI) 12-ти символьный код ледника типа SU5B16000xxx, где xxx — номер ледника
Glacier name	Текстовый	Название ледника латинскими буквами или номер (xxx)
Lat	Числовой	Широта центра ледника
Long	Числовой	Долгота центра ледника
Topo year	Числовой	Год издания топографической карты. При отсутствии сведений ставится число −99
Photo type	Текстовый	Наличие (F) или отсутствие (N/A) аэрофотосъемки
Photo year	Текстовый	Дата аэрофотосъемки
Total area	Числовой	Общая площадь ледника, км^2
Area accuracy	Числовой	Точность определения общей площади, в %
Area exposed	Числовой	Площадь открытой части ледника, км^2
Area ablation	Числовой	Площадь области абляции ледника, км^2
Max length	Числовой	Длина ледника, км
Max length ex	Числовой	Длина открытой части ледника, км
Orientation ac	Числовой	Экспозиция области аккумуляции, °
Orientation ab	Числовой	Экспозиция области абляции, °
Max elev	Числовой	Высшая точка ледника, м н. у. м.
Mean elev	Числовой	Средняя высота ледника, м н. у. м.
Min elev	Числовой	Низшая точка ледника, м абсолютной высоты, м н. у. м.
Min elev ex	Числовой	Низшая точка открытой части ледника, м н. у. м.
Classification	Текстовый	«Классификация», состоит из 6 символов. 1-й и 2-й символы — морфологический тип; 3-й — 0; 4-й — уклон поверхности ледника; 5-й — тип питания ледника; 6-й — 0

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам обработки топографических карт м-ба 1: 200 000 было выделено 193 нивально-гляциальных объекта. Предположительно, это ледники исходного, наиболее раннего состояния инвентаризации. Эти объекты сопоставлялись с другими БД. Территория дистанционного исследования по топокартам и данным Landsat составляет 43 008 км^2; территория, на которой выявлены ледники ИГ РАН — 20 908 км^2; по БД GLIMS — 22 012 км^2 (рис. 2). Первоначально вошедшие в каталог ледников СССР 22 ледника в некоторых случаях трудно сопоставимы с выделенными на топокартах, как и представленные в современных БД. Некоторые ледники, вероятно, растаяли, а часть имеет неточные координаты. Видимо, с такой же трудностью встретились исследователи из Института географии РАН. По результатам автоматического анализа GLIMS, некоторые ледники выделены ошибочно, а некоторые не распознаны, и поэтому отсутствуют. Результаты сопоставления различных БД представлены в таблице 3.

Из таблицы видно, что площадь ледников при составлении каталога ледников СССР была оценена недостоверно. Даже без учета ледников, указанных в каталоге, но не

дешифрированных по современным данным ASTER и Sentinel-2, и довольно неточным данным по топокарте, составленной по аэросъемке 1960-х гг., общая площадь в настоящее время значительно больше, чем указанная в каталоге.

В предлагаемой БД на топокартах удалось найти соответствие ледникам из каталога с номерами: 1–3, 5, 7–15, 17 и 19–22. В БД ИГ РАН есть соответствие ледникам: 2–6, 8, 11–22, а ледники 8, 12 и 20 распались на 2 части. В БД GLIMS найдено соответствие ледникам 3, 5, 8, 11–15, 19–22, а ледники 20 и 21 распались на 2 части (табл. 3).

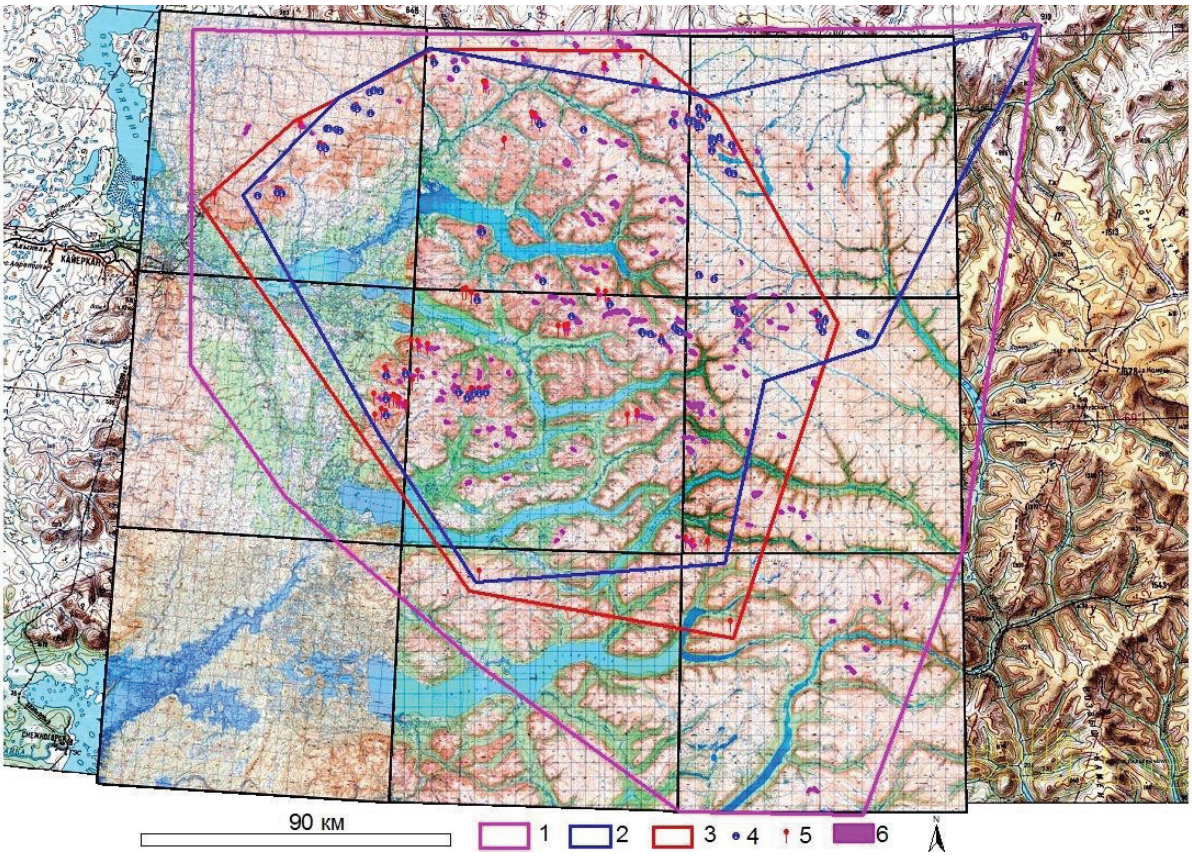


Рис. 2. Пример вида ГИС-проекта Плато Путорана: 1 — область исследования по топокартам; 2 — область ледников по БД GLIMS; 3 — область ледников по БД ИГ РАН; 4 — ледники БД GLIMS; 5 — ледники БД ИГ РАН; 6 — ледники по топокартам; фон — топокарты м-ба 1: 200 000, 1: 1 000 000

Fig. 2. Example of the View of GIS project of the Putorana Plateau: 1 — area of study on topographic maps; 2 — glacier area according to the GLIMS database; 3 — the area of glaciers according to the database of the IG RAS; 4 — glaciers of DB GLIMS; 5 — glaciers of DB IG RAS; 6 — glaciers on topographic maps; background — topographic maps of scale 1: 200 000, 1: 1 000 000

Общая площадь всех ледников плато Путорана по топокарте составила 103,2 км^2 (193 ледника), по данным Landsat 1979 г. — 56,5 км^2 (дешифрировано 204 ледника), по данным Landsat 1987 г. — 46,2 км^2 (202 ледника). Данные Landsat 1979 г., к сожалению, не покрывают всю территорию плато, поэтому общая площадь занижена. Наиболее полно ледники представлены данными Landsat 1987 г. Даже с учетом этих особенностей заполнения БД видно, что оледенение плато Путорана сокращается и уже к 1987 г. сократилось практически в 2 р.

Табл. 3. Динамика ледников плато Путорана по различным БД
Table 3. The dynamics of glaciers of the Putorana Plateau according to various databases

Код ледника *по каталогу ледников СССР [1981]*	**Площадь ледника, км^2**			
	Каталог [1981]	***Топокарта, 1960 г.***	***БД GLIMS, 2013 г.***	***БД ИГ РАН, 2018 г.***
SU5C16106001	0,10	0,75	0,03	0,03
SU5C16106002	0,03	0,43	0,03	–
SU5C16106003	0,33	1,50	0,45	0,22
SU5C16106004	0,15	–	0,32	0,32
SU5C16106005	0,18	0,96	0,23	0,23
SU5C16106006	0,07	–	0,07	0,07
SU5C16106007	0,05	0,34	–	–
SU5C16106008	0,06	0,36	0,12	0,07
SU5C16106009	0,06	0,26	–	–
SU5C16106010	0,06	0,24	–	–
SU5C16106011	0,11	0,01	0,20	0,10
SU5C16106012	0,04	0,43	0,10	0,04
SU5C16106013	0,12	0,19	0,18	0,09
SU5C16106014	0,04	0,38	0,25	0,12
SU5C16106015	0,12	0,14	0,32	0,28
SU5C16106016	0,10	–	0,36	0,36
SU5C16106017	0,07	0,16	0,52	0,52
SU5C16106018	0,05	–	–	–
SU5C16106019	0,15	0,17	0,39	0,36
SU5C16106020	0,14	0,91	0,88	0,36
SU5C16106021	0,37	0,50	0,62	0,37
SU5C16106022	0,14	0,26	0,39	0,52
Итого	**2,54**	**7,99**	**5,46**	**4,06**
Всего с поправкой[1]	**2,54**	**8,89**	**5,68**	**4,31**

Средствами ГИС можно делать выборки одних объектов БД объектами другой БД. Данные 1987 г. — это выборка по 1979 г. Такие выборки позволяют сравнивать подмножества совпадающих ледников. Варианты выборки ледников из рассматриваемых БД представлены в табл. 4.

В обеих выборках площадь оледенения по БД GLIMS занижена, но тенденция к сокращению ледников видна. К сожалению, из данных таблицы видно, что полного соответствия ледников друг другу найти затруднительно. Требуется дополнительная работа по обработке данных дешифрирования. Существует каталог и карта наледей плато Путорана [*Алексеев*, *Гиенко*, 2002], которую необходимо учитывать. Многие ледники схожи с наледями по тону и конфигурации. Пример выделения ледников для разных систем инвентаризации представлен на рисунке 3.

Ледник «Богатырь» — № 22, южнее вершины 1591, вошел во все БД. Расположение «звездочек» показывает точность указания координат центра ледника в каталоге при первичной инвентаризации. В ГИС-проекте, для сравнения с данными Landsat, границы ледника были нанесены в правильном месте с учетом площади, указанной в каталоге. По данным Landsat, нивально-гляциальные объекты совпали с изображением ледника на топокарте. Объекты севернее ледника «Богатырь» не были внесены в БД ИГ РАН. В БД

[1] Добавлена площадь ледников каталога для БД, где эти ледники отсутствуют.

GLIMS, кроме этих объектов, были выделены и ложные объекты в районе букв «ГО» и чуть юго-восточнее в истоках ручья (как ледник было распознано ледниковое озеро).

Табл. 4. Динамика выборки ледников плато Путорана
Table 4. Dynamics of a sample of glaciers of the Putorana Plateau

Выборка одних данных другими	Результат выборки данных разных лет и источников, км^2				
	Топокарта, 1960	***Landsat, 1979***	***Landsat, 1987***	***GLIMS, 2013***	***ИГ РАН, 2018***
Объектами 1979 г. из других БД	101,4	56,5	46,2	7,5	11,2
Объектами 1979 г. и объектами БД ИГ РАН из других БД	20,4	22,6	17,3	5,2	11,2

Сравнение динамики ледников в разных по природным условиям районах

Результаты составления БД плато Путорана и динамики ледников интересно сравнить с данными БД наиболее изученных ледников хребта Мунку-Сардык. Впервые ледники Мунку-Сардык детально исследовались С.П. Перетолчиным [1908] и представлены в каталоге ледников СССР [1973]. Динамика этих ледников изучалась с использованием топографических карт, разномасштабных данных ДЗЗ, полученных со спутников Quick Bird, Pleiades, Landsat-4, -5, -7, -8 [*Китов*, *Плюснин*, 2012; *Китов* и др., 2017]. В хребте Мунку-Сардык 4 ледника: Перетолчина северный и южный, Радде и Пограничный (табл. 5). В БД GLIMS все эти ледники занесены по данным ASTER 2002 г. В БД ИГ РАН допущена ошибка — ледник Пограничный из монгольского кара перенесен на российскую сторону в кар второго левого притока р. Жохой (рис. 4). Еще в 1906 г. С.П. Перетолчин видел с вершины Мунку-Сардык какой-то ледник, а В.Е. Максимов в 1963 г. обследовал эту местность, не найдя никаких ледников, предположил, что видимый С.П. Перетолчиным ледник перешел в стадию погребенного и находится у оз. Солярис третьего притока р. Жохой [*Максимов*, 1965]. Так этот ледник под № 29 попал в каталог ледников СССР [1973]. По данным разных БД изменение ледников массива Мунку-Сардык (табл. 5) имеет аналогичные тенденции к сокращению.

По данным С.П. Перетолчина и по моренным комплексам ледников (хорошо дешифрируются на снимке Quick Bird 2006 г.) построены реконструкции на 1900 г. Характеристики ледников по 1960 г. сняты с топографической карты м-ба 1: 100 000. В 2000 г. использованы данные Landsat, близкие ко времени БД GLIMS (2002 г.). В 2018 г. характеристики получены по данным Landsat, близким к данным БД ИГ РАН 2019 г. В общую площадь 0,58 км^2 добавлена площадь ледника Перетолчина (южного) из БД GLIMS (0,11 км^2), а ледник Пограничный учтен как ледник № 29.

Институт географии РАН обновил электронный вариант БД [*Хромова* и др., 2021] по данным спутника Sentinel-2 (съемка 27.08.2019). Соответственно, площадь ледника Перетолчина северного (Ru10-18.0037) — 0,24 км^2, а Радде (Ru10-18.0038) — 0,08 км^2 (табл. 5). В этой БД приведены только данные российских ледников, а ледник Пограничный (рис. 4) перемещен с монгольской стороны на российскую (Ru10-18.0039, по советской классификации SU5B16201029 [Каталог…, 1973]), его площадь — 0,15 км^2. Похоже, что автоматическое дешифрирование ледников дало заниженные результаты в 2002 г. А в 2019 г. получились завышенные результаты из-за ошибки с ледником № 29.

Данные о ледниках представляются в бюллетенях Всемирной службы мониторинга ледников [WGMS, 1991]. С 2000 г. можно найти масс-баланс и изменения ледников в 10 горных регионах, а с 2013 г. в Бюллетене отражены изменения ледников в 17 горных

регионах [WGMS, 2013; 2021]. Электронные БД ледников постоянно обновляются, но, к сожалению, динамику ледников отследить невозможно. В новых версиях уточняются параметры и границы ледников по данным первоначально сделанной спутниковой съемки. Для плато Путорана это съемка ASTER 2013 г., а для массива Мунку-Сардык — 2002 г. С 2020 г. данные БД ИГ РАН вошли в БД GLIMS. Границы ледников плато Путорана также были исправлены с учетом этих баз данных.

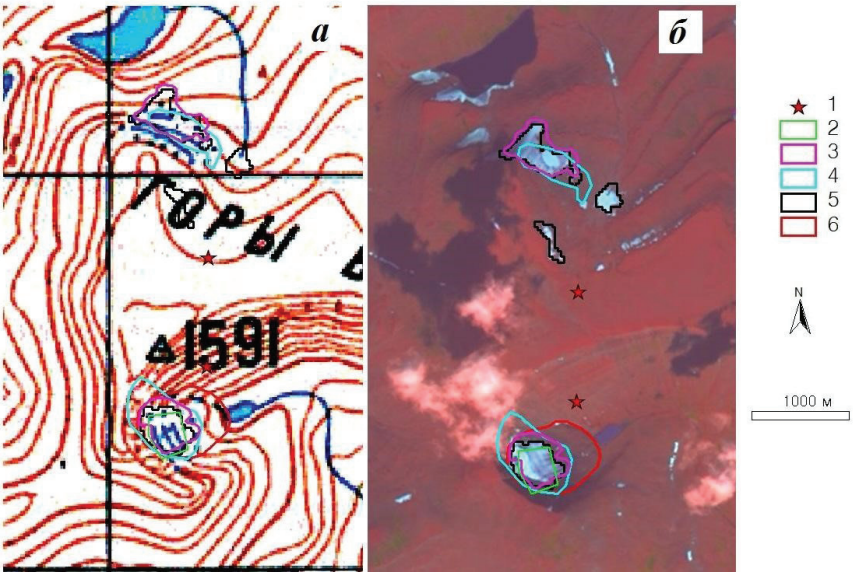


Рис. 3. Примеры представления ледников в различных БД: 1 — место расположения ледника по Каталогу [1981]; 2 — виртуальные границы ледника по данным Каталога; 3 — границы ледника по данным Landsat 1979 г.; 4 — границы ледника по данным Landsat 1987 г.; 5 — границы ледника по БД RGI (GLIMS) 2013 г.; 6 — границы ледника по БД ИГ РАН 2018 г. Фон — карта м-ба 1: 200 000 (а); данные Landsat-8 03.08.2015 г.(б)

Fig. 3. Examples of the representation of glaciers in various databases: 1 — the location of the glacier according to the Catalog [1981]; 2 — virtual boundaries of the glacier according to the Catalog; 3 — glacier boundaries according to Landsat 1979; 4 — glacier boundaries according to Landsat 1987; 5 — glacier boundaries according to the RGI database (GLIMS) 2013; 6 — boundaries of the glacier according to the database IG RAS 2018. Background — map of scale 1: 200 000 (a); Landsat-8 Data 8.3.2015(b)

Табл. 5. Изменение площади ледников массива Мунку-Сардык по данным БД, км²
Table 5. Change in the area of glaciers of the Munku-Sardyk massif according to DB, km²

Год	Пограничный	Радде	Перетолчина Северный	Перетолчина Южный	Все ледники
1900	0,4	0,48	0,83	0,63	2,34
1960	0,15	0,3	0,49	0,35	1,29
2000	0,12	0,19	0,43	0,2	0,96
2002	0,037	0,045	0,214	0,108	0,4
2018	0,06	0,10	0,26	0,09	0,51
2019	0,15	0,08	0,24	(0,11)	0,58*

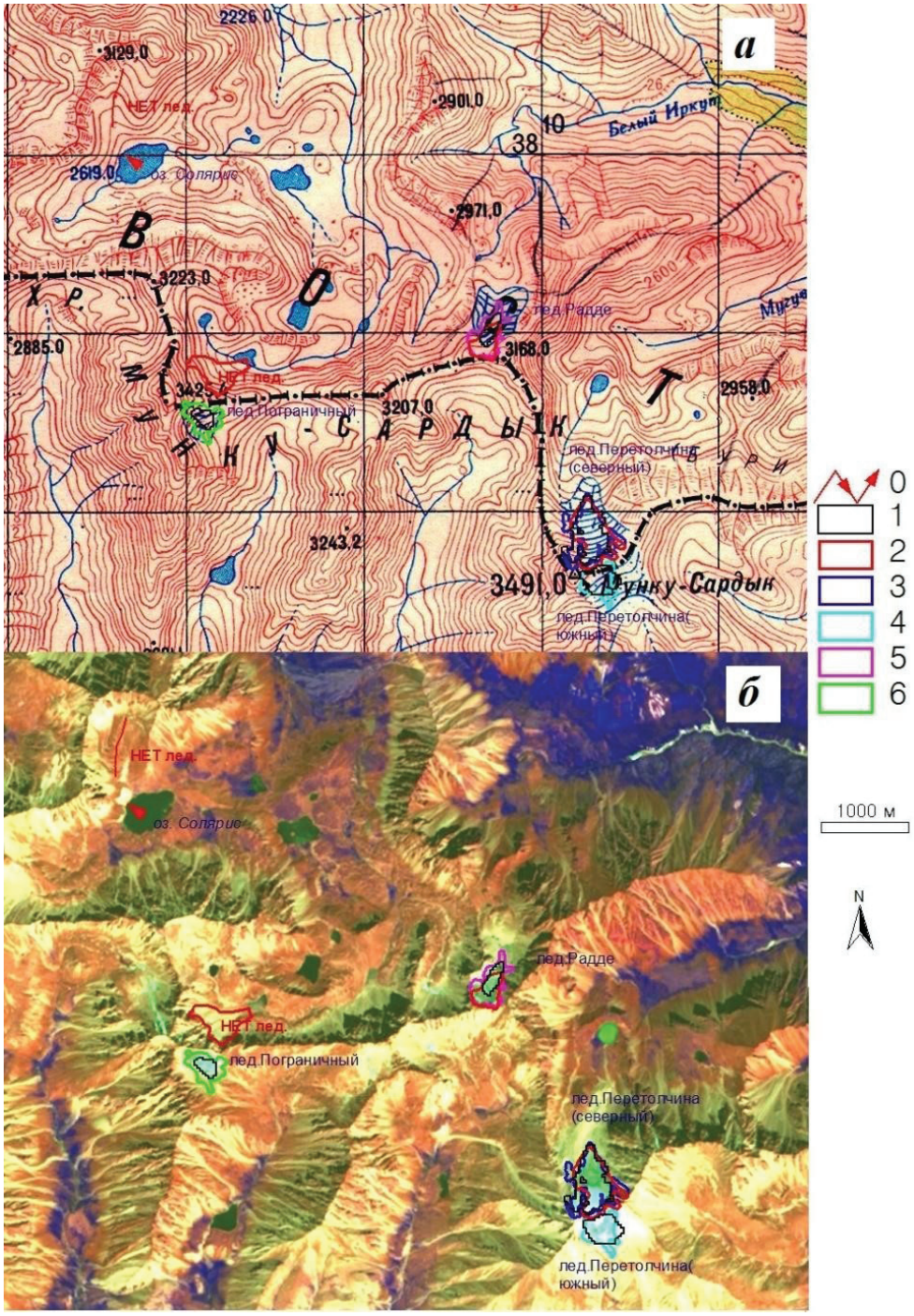


Рис. 4. Ледники Мунку-Сардык. 0 — кар несуществующего ледника № 29 по Максимову, красная стрелка — край ледника, выходящего к оз. Солярис; 1 — ледники по БД GLIMS 2002 г.; 2 — ледники по БД ИГ РАН 2019 г.; 3 — ледник Перетолчина (северный) по данным Landsat-8; 4 — ледник Перетолчина (южный); 5 — ледник Радде; 6 — ледник Пограничный. Фон топокарта 1960-е (а), данные Landsat-8 08.08.2015 г.(б)

Fig. 4. Munku-Sardyk glaciers. 1 — the car of the non-existent glacier No. 29 according to Maximov, the red arrow is the edge of the glacier facing the lake Solaris; 2 — glaciers according to the database IG RAS 2019; 3 — Peretolchina glacier (northern) according to Landsat-8; 4 — Peretolchina Glacier (southern); 5 — Radde Glacier; 6 — Pogranichny Glacier. Background topographic map 1960s (a), Landsat-8 08.08.2015(b)

ВЫВОДЫ

ГИС-анализ по данным ДЗЗ позволяет составлять БД, отражающую динамику ледников за период примерно с середины 1970-х гг. до настоящего времени. Полученные БД можно сопоставлять с другими данными о ледниках и выявлять допущенные ошибки при их составлении. Сравнивая данные БД, видна тенденция сокращения ледников как в массиве Мунку-Сардык, так и в более северном Плато Путорана.

Из-за небольшого объема данных и хорошей различимости ледников Мунку-Сардык, измерение и представление их характеристик в БД незатруднительно. На плато Путорана ледников значительно больше. Возникает необходимость редактирования БД для исключения ложных объектов, которыми могут быть многолетние снежники и наледи. Поэтому в БД ГИС-Путорана необходимо внести данные о наледях, используя соответствующую карту [*Алексеев*, *Гиенко*, 2002].

Учитывая большое количество объектов и данных ДЗЗ за большой промежуток времени, целесообразно было бы использовать автоматические методы обработки. Однако видно, что автоматический анализ дает заниженные результаты, особенно это проявляется на небольших ледниках. За основу целесообразно взять БД ИГ РАН, расширяя ее во времени по данным Landsat на более ранние сроки и в сторону настоящего времени.

В международных БД учитывается порядка 30 параметров ледников, но большинство полей, характеризующих ледники, остаются незаполненными. Главными параметрами являются площадь, длина ледника, верхняя и нижняя его границы. Даже на первом этапе составления БД для отслеживания динамики достаточно площади ледника.

В настоящее время база данных нивально-гляциальных объектов плато Путорана отражает изменение площади по топографическим картам на период середины прошлого века, по данным Landsat на 1979 и 1987 гг., а как дополнительные данные — БД GLIMS и ИГ РАН на период 2013 и 2018 гг.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет средств государственного задания (№ госрегистрации темы: АААА-А21-121012190017-5); при поддержке РФФИ, гранта № 20-05-00253А «Трансформация геосистем Байкальской природной территории».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was performed at the expense of the state task (subject No. AAAA-A21-121012190017-5); supported by the Russian Foundation of Basic Research, grant No. 20-05-00253A “Transformation of geosystems of the Baikal natural area”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев В.Р., Гиенко А.Я. Наледи плато Путорана. Иркутск: ИГ СО РАН, 2002. 101 с.

Каталог ледников СССР. Т. 16. Вып. 1. Ч. 3–5. Вып. 2. Ч. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 64 с.

Каталог ледников СССР. Т. 16. Вып. 1. Ч. 6. М.: Гидрометиздат, 1981. С. 7–12.

Китов А.Д., Плюснин В.М. Создание и использование базы данных ледников Южной Сибири. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Смоленск: Изд-во СмолГУ, 2012. С. 143–148.

Китов А.Д., Плюснин В.М., Иванов Е.Н., Батуев Д.А., Коваленко С.Н. Интернет-представление баз данных ледников юга Восточной Сибири. ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2017. Т. 23. Ч. 2. С. 228–242. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-2-23-228-242.

Котляков В.М., Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Попова В.В., Чернова Л.П., Муравьев А.Я., Рототаева О.В., Никитин С.А., Зверкова Н.М. Современные изменения ледников горных районов России. М.: Тов-во научных изданий КМК, 2015. 288 с.

Перетолчин С.П. Ледники хребта Мунку-Сардык. Известия Томского технического института. Томск: Типолитография Сибирского товарищества печатного дела, 1908. Т. 9. 60 с.

Сарана В.А. Ледники плато Путорана. МГИ, 2005. Вып. 98. С. 19–29.

Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф., Муравьев А.Я., Никитин С.А., Лаврентьев И.И. Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.). Лед и Снег, 2021. Т. 61. № 3. С. 341–358. DOI: 10.31857/S2076673421030093.

GLIMS Consortium. 2005. GLIMS Glacier Database, Version 1. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2005. DOI: 10.7265/N5V98602.

IPCC. Climate change 2007. The physical science basis. Contribution of working group 1 to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva: Published by IPCC, 2007. 996 p.

IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844.

Matveeva T.A., Semenov V.A. Regional features of the Arctic Sea ice area changes in 2000–2019 versus 1979–1999 periods. Atmosphere, 2022. V. 13. No. 1434. P. 1–14. DOI: 10.3390/atmos 13091434.

WGMS 1991. Glacier Mass Balance Bulletin No. 1 (1988–1989). IAHS (ICSI)-UNEP-UNESCO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 1991. 70 p.

WGMS 2013. Glacier Mass Balance Bulletin No. 12 (2010–2011). ICSU (WDS)-IUGG (IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2013. 106 p.

WGMS 2021. Global Glacier Change Bulletin No. 4 (2018–2019). Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2021. 278 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2021-05.

REFERENCES

Alekseev V.R., Gienko A.Ya. The icings of Putorana Plateau. Irkutsk: IG SB RAS. 2002. 101 p. (in Russian).

Catalogue of glaciers of the USSR. V. 16. Iss. 1. Part 3–5. Iss. 2. Part 1. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973. 64 p. (in Russian).

Catalogue of glaciers of the USSR. V. 16. Iss. 1. Part 6. Moscow: Gidrometizdat, 1981. P. 7–12 (in Russian).

GLIMS Consortium. 2005. GLIMS Glacier Database, Version 1. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2005. DOI: 10.7265/N5V98602.

IPCC. Climate change 2007. The physical science basis. Contribution of working group 1 to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva: Published by IPCC, 2007. 996 p.

IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844.

Khromova T.Y., Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Muraviev A.Ya., Nikitin S.A., Lavrentiev I.I. New inventory of the Russian glaciers based on satellite data (2016–2019). Ice and Snow, 2021. V. 61. No. 3. P. 341–358 (in Russian). DOI: 10.31857/S2076673421030093.

Kitov A.D., Plyusnin V.M. Creation and use of the database of glaciers of Southern Siberia. InterCarto. InterGIS. Smolensk: − Publishing House of Smolensk State University, 2012. P. 143–148 (in Russian).

Kitov A.D., Plyusnin V.M., Ivanov E.N., Batuev D.A., Kovalenko S.N. The Internet presentation of databases of glaciers of the south of Eastern Siberia. InterCarto. InterGIS, 2017. V. 23. Part 2. P. 228–242 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2017-2-23-228-242.

Kotlyakov V.M., Chernova T.E., Nosenko G.A., Popova V.V., Chernova L.P., Muraviev A.Ya., Rotataeva O.V., Nikitin S.A., Zverkova N.M. Modern changes in the glaciers of the mountainous regions of Russia. Moscow: Publishing House KMK, 2015. 288 p. (in Russian).

Matveeva T.A., Semenov V.A. Regional features of the Arctic Sea ice area changes in 2000–2019 versus 1979–1999 periods. Atmosphere, 2022. V. 13. No. 1434. P. 1–14. DOI: 10.3390/atmos 13091434.

Peretolchin S.P. Glaciers of the Munku-Sardyk Ridge. News of the Tomsk Technical Institute.Tomsk: Typolithography of the Siberian Printing Association, 1908. V. 9. 60 p. (in Russian).

Sarana V.A. Glaciers of the Putorana Plateau. MGI, 2005. V. 98. P. 19–29 (in Russian).

WGMS 1991. Glacier Mass Balance Bulletin No. 1 (1988–1989). IAHS (ICSI)-UNEP-UNESCO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 1991. 70 p.

WGMS 2013. Glacier Mass Balance Bulletin No. 12 (2010–2011). ICSU (WDS)-IUGG (IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2013. 106 p.

WGMS 2021. Global Glacier Change Bulletin No. 4 (2018–2019). Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2021. 278 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2021-05.

УДК: 912.44:341.2245 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-630-645**

А.Н. Демидов[1], **Т.В. Котова**[2]

МОРЯ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ В АТЛАСНОМ КАРТОГРАФИРОВАНИИ РОССИИ

АННОТАЦИЯ

Российская Арктика как неотъемлемая часть России на всем протяжении ее истории играет важную роль в развитии страны. Сегодня Арктика — регион особых геостратегических интересов государства и экономических интересов общества, обозначенных в ряде документов. Важное условие их реализации — информационные ресурсы общества, которые сегодня являются наиболее важным стратегическим фактором его развития. Их неотъемлемая часть — картографическая составляющая. Она реализуется в аналоговых и цифровых моделях знаний оперативных или долговременного охвата, наиболее ценных в случае их интеграции, в частности, в атласы. В атласном картографировании России арктическим морям, как особым объектам изучения, всегда уделялось большое внимание. К началу XXI в. уже были созданы фундаментальные атласные произведения по результатам многолетних исследований. В последние годы отмечается возрастание интереса к многостороннему картографированию морей с учетом их роли в ожидаемом потеплении климата, активизацией использования энергетических, минеральных, биологических и других ресурсов, появлением экологических проблем. Возникающие запросы стимулируют создание атласных произведений разного назначения, территориального, тематического и временного охвата, видам носителя и соотношения видов контента. Отмечаемые тенденции в атласном картографировании морей: расширение тематического спектра изучения, стремление к оперативности и актуализации содержания атласов через использование современных геоинформационных технологий (в т. ч. онлайн); активный переход к подготовке произведений, сочетающих информацию и знание в режиме реального масштаба времени, способных быстро реагировать на запросы навигации, экологии, экономики и т. д.; стирание грани между традиционными бумажными атласами и их интернет-версиями, позволяющее неограниченно расширять объемы представляемой информации; внимание к вопросам используемых семиотических систем и др. Цель настоящей статьи — представить развитие и современное состояние атласного картографирования морей Российской Арктики на базе основных произведений, созданных в последние полвека.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: атласы арктических морей, тенденции атласного картографирования морей

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991,
e-mail: **tuda@mail.ru**

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991,
e-mail: **tatianav.kotova@yandex.ru**

Alexander N. Demidov[1], **Tatiana V. Kotova**[2]

SEAS OF THE RUSSIAN ARCTIC IN THE ATLAS MAPPING OF RUSSIA

ABSTRACT

The Russian Arctic, as an integral part of Russia, has played an important role in the development of the country throughout its history. Today, the Arctic is a region of special geostrategic interests of the state and economic interests of society, outlined in a number of documents. An important condition for their implementation is the information resources of society, which today are the most important strategic factor in its development. Their integral part is the cartographic component. It is implemented in analog and digital models of operational or long-term knowledge coverage, the most valuable in case of their integration, in particular, into atlases. In atlas mapping, Arctic seas, as special objects of study, have always been given great attention. By the beginning of the XXI century, fundamental atlas works had already been created based on the results of many years of research. In recent years, there has been an increasing interest in the multilateral mapping of the seas, considering their role in the expected climate warming, increased use of energy, mineral, biological and other resources, the emergence of environmental problems. Emerging requests stimulate the creation of atlas works of various purposes, territorial, thematic and temporal coverage, types of media and the ratio of content presentation. The noted trends in the atlas mapping of the seas: the expansion of the thematic spectrum of study, the desire for efficiency and updating of the content of atlases through the use of modern geoinformation technologies (including online); active transition to the preparation of works combining information and knowledge in real time, capable of quickly responding to navigation, ecology, economics, etc.; blurring the line between traditional paper atlases and their Internet-versions, allowing unlimited expansion of the amount of information presented; attention to the issues of used semiotic systems, etc. The purpose of this article is to present the development and current state of atlas mapping of the seas of the Russian Arctic on the basis of the main works created in the last half century.

KEYWORDS: atlases of the Arctic seas, trends in atlas mapping of the seas

ВВЕДЕНИЕ

Российская Арктика как неотъемлемая часть России на всем протяжении истории играет важную роль в развитии страны. В последние десятилетия ее значение в экономической, военно-стратегической, гуманитарной и природных областях многократно возросло в связи с переменами в глобальных процессах и возрастанием интереса к ней со стороны международного сообщества. Сегодня Арктика — регион особых геостратегических интересов государства и экономических интересов общества, обозначенных в ряде документов [Арктическая политика…, 2021]. Важное условие их реализации — информационные ресурсы общества, которые сегодня являются наиболее важным стратегическим фактором его развития. Их неотъемлемая часть — картографическая составляющая. Многоплановому картографическому изучению Российской Арктики уделяется большое внимание [*Тетерин*, 2018], значимая часть которого — атласные произведения разного назначения, территориального и тематического охвата, соотношения видов контента. Интегрируя современные знания о регионе в

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **alik1@mail.ru**

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **tatianav.kotova@yandex.ru**

аналоговой или цифровой форме, атласы направлены на удовлетворение запросов как специалистов разных отраслей знания, управленцев, так и широкой аудитории, проявляющей интерес к региону.

В атласном картографировании арктическим морям и Арктическому бассейну, как особым объектам изучения, с учетом их роли в ожидаемом потеплении климата, активизацией использования энергетических, минеральных, биологических и других ресурсов, появлением экологических проблем уделяется все больше внимания.

Цель настоящей статьи — осветить современное состояние атласного картографирования морей Российской Арктики на основе произведений, созданных за последние 50 лет и отметить наблюдаемые тенденции в его развитии, в т. ч. отметить некоторые интернет-порталы, представляющие атласы.

При этом задачей исследования является не полнота обзора и подробного анализа атласов, что не позволяет объем статьи, но отметка этапных или представляющих интерес произведений и современных источников для изучения морской среды Арктики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основными источниками информации стали отечественные атласные произведения в основном конца XX – первой четверти XXI в., тиражированные в бумажном или электронном виде, а также публикации по вопросам атласного картографирования морей и их реализации в конкретных атласных произведениях. Материалами для обзора стали выводы исторического, системного и сравнительного анализа атласных произведений в части их назначения, территориального охвата, концепции, положенной в основу, структуры и содержания, пространственно-временного разрешения (основные масштабы, временной охват), семиотической системы, наличия пользовательского интерфейса и т. д.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты многолетних исследований Российской Арктики воплощены в целом ряде атласов, созданных в конце XX в. Среди них в первую очередь надлежит отметить научно-справочные фундаментальные произведения — «Атлас Северного Ледовитого океана» [1980], изданный в серии атласов океанов, и «Атлас Арктики» [1985].

В первом из них сконцентрированы знания об океане в системе взаимодействия Мирового океана, атмосферы и суши за всю историю его изучения. Атлас предназначался для научных работников, служащих Советской Армии, Военно-Морского, транспортного и промыслового флотов. Отмечалось его более широкое использование в познавательных целях. Карты, размещенные в 6 разделах и 11 подразделах, отображают историю исследования океана, характер дна, климатические, гидрологические и гидрохимические особенности, своеобразие растительного и животного мира. Масштаб основных карт: 1: 15 000 000–1: 45 000 000. Раздел с текстами (~10 % объема) дает описание методики и материалов разработки. Дополнительно помещены справочные карты. Они содержат сведения о магнитном поле Земли, движении северных магнитного и географического полюсов Земли, полярных сияниях, астрономии (восход и заход солнца, сумерки, звездное небо, часовые пояса). Особые графические приемы применены для характеристики детальности и достоверности информации, которые в последующих бумажных атласах практически не встречаются.

Вскоре вслед за Атласом Северного Ледовитого океана увидел свет «Атлас Арктики» [1985]. Атлас представляет моря Арктики в тесном единстве морских и наземных геосистем: специальное содержание на картах атласа дается в границах всей Арктики, за некоторым исключением карт социально-экономического содержания. 13 разделов Атласа

дают всестороннюю комплексную характеристику региона на основе последних достижений тематического комплексного картографирования:

1. Введение.
2. Общегеографические карты.
3. История исследования и открытия.
4. Аэрономия и физика Земли.
5. Геология.
6. Климат.
7. Типы синоптических процессов и аномалии режима погоды.
8. Гидрология.
9. Оледенение и вечная мерзлота.
10. Почвенно-растительный покров.
11. Животный мир.
12. Физико-географическое районирование.
13. Население и хозяйство.

Масштаб основных карт: 1: 10 000 000–1: 80 000 000. Карты дополняются автономным текстовым блоком. Выше отмеченные атласы остаются до настоящего времени непревзойденными комплексными произведениями в собрании атласов Арктики и примером классических мировых фундаментальных атласных произведений.

Появляются также тематические атласы мирового охвата, где затрагивается и Российская Арктика. В серии атласов океанов изданы атласы «Проливы Мирового океана» [1993] и «Человек и океан» [1996]. В первом из них — узко специализированном (из арктических включен только Берингов пролив) — содержится информация навигационно-географического (геоморфология, типы берегов, донные осадки, землетрясения и т. д.) и гидрометеорологического характера (облачность, туманы, осадки, ясное и пасмурное небо, видимость, температура и соленость воды, плотность воды, приливы, течения и др.), представленная на картах м-ба 1: 750 000 и 1: 1 500 000. В кратком описании проливов и портов дается экономическая характеристика и отмечаются особенности гидрометеорологического режима.

В отличие от фундаментальных научно-справочных атласов серии научно-популярный комплексный атлас «Человек и океан» адресован массовому читателю. Он привлекает беспрецедентной широтой охвата и трактовки обозначенной темы. Об этом можно судить по названиям разделов атласа:

1. Происхождение океана и жизни на Земле.
2. Познание океана.
3. Развитие судостроения.
4. Технические средства изучения океана.
5. Природа океана.
6. Биологические ресурсы.
7. Минеральные и химические ресурсы.
8. Энергетические ресурсы.
9. Судоходство и связь через океан.
10. Население побережий океана.
11. Опасные явления в океане.
12. Загрязнение и защита природы океана.
13. Океан и здоровье человека.
14. Морское право.
15. Взгляд в будущее.

Приоритет отдан многообразию графических, иллюстративных и текстовых видов отображения. Сравнительно небольшое количество сверхмелкомасштабных схематических карт, не претендующих на полноту информации, определяется не только назначением атласа, но и недостаточностью картографического вызревания многих тем, в него включенных.

В собрании вышеупомянутых атласов, представляющих достижения атласных исследований, нельзя обойти вниманием ранее изданный «Атлас ледовых образований» [1974] в контексте переосмысления подходов к использованию семиотических систем в современных атласах. Атлас подготовлен в Арктическом и Антарктическом научно-исследовательском институте и предназначен в качестве справочного пособия для работников, выполняющих ледовые наблюдения — гидрологов, водителей судов, гидрологов ледовой разведки, работников морских гидрометеостанций и т. д. Атлас не является собранием карт, но представляет большой научный и практический интерес. В качестве раскрытия характеристик наиболее типичных ледовых образований используются такие семантические переменные, как текстовые описания процессов образования, деформации и таяния морских льдов, рисунки и черно-белые плановые и перспективные фотографии. Он состоит из 4 частей:

1. Процессы образования, деформации и таяния морских льдов.
2. Ледовые термины, расположенные в тематическом порядке.
3. Фотографии льдов, встречающихся на морях.
4. Условные обозначения для ледовых карт.

Используемая в нем семиотическая система позволяет передать свойства ледовых образований, которые невозможно отобразить посредством традиционно используемой в картографии систем. Опыт создания подобного атласа заслуживает повторения с учетом современных достижений в визуальном воспроизведении характеристик природных объектов.

На протяжении последних десятилетий отмечается активная подготовка тематических атласов, концентрирующих знания в областях, представляющих первостепенный интерес для навигации и освоения этих регионов, решении связанных с ними проблем (в частности, климатическим, гидрометеорологическим и ледовым условиям и их изменению в связи с наблюдающимися тенденциями потепления климата). Кроме бумажных форм, широко практикуется их тиражирование на различного рода носителях типа CD/DVD, а также интернет-версий.

Электронный морской атлас «Климат морей России и ключевых районов Мирового океана» подготовлен в Лаборатории исследования морей Центра океанографических данных ГУ «ВНИИГМИ-МЦД». Он адресован широкому кругу пользователей, связанных с изучением и практическим использованием природных ресурсов океанов и морей. Атлас представляет собой динамически формируемое режимно-справочное пособие по морской природной среде [*Воронцов*, 2011]. Содержит многолетние сведения по климатическим характеристикам морей России и ключевых районов Мирового океана в виде картографических материалов и таблиц (температура воды и воздуха, соленость, условная плотность воды, содержание кислорода, скорость звука, уровень моря, характеристики ветра и волн). Они сосредоточены в следующих разделах:

1. Описание информационных ресурсов.
2. Режимно-климатические характеристики для прибрежной зоны и открытого моря.
3. Специальные вопросы гидрометеорологии, динамики и сопутствующих дисциплин.

С течением времени предполагается пополнение атласа новыми тематическими разделами («Гидродинамика», «Загрязнение», «Морская биология», «Экология и природопользование», «Сведения о портах» и др.). В разделе «Гидрометеорология» расширяется состав параметров.

В «Атласе климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013)» [2014] отображены большие морские экосистемы арктических морей и южных морей РФ (Океанографическая база данных; Регион I. Большие морские экосистемы Восточной Арктики; Регион II. Большие морские экосистемы Черного, Азовского и Каспийского морей). Атлас состоит из 7 разделов. В разделе I для наиболее полно представленных Баренцева и Белого моря даются океанографическая база данных и инвентаризация, база данных по планктону, временные ряды температуры и солености вод, ледового режима, рыболовства; для остальных морей — только океанографическая база данных и инвентаризация. Атлас включает результаты обработки первичных океанографических данных для выявления климатической изменчивости гидрологических процессов в Арктике, сезонные климатические карты вертикального распределения температуры и солености вод для ключевых гидрологических разрезов Баренцева моря, а также временные серии аномалий температуры и солености вод для каждого месяца каждого года или характерного периода. К бумажной версии прилагаются первичные океанографические данные.

«Атлас гидрометеорологических и ледовых условий морей Российской Арктики» [2015] — один из атласов, созданных по материалам фондов и экспедиционных исследований ООО «Арктический научно-проектный центр шельфовых разработок» за 2012–2014 гг. Структура атласа представлена 6 разделами:

1. Физико-географический очерк;
2. Исследования в Российской Арктике;
3. Режим освещенности;
4. Метеорология;
5. Гидрология;
6. Лед.

Из новейших атласных разработок сугубо прикладного плана отметим «Атлас погоды для выполнения гидрографических работ в Арктике на примере Баренцева моря» [*Шаронов*, *Шматков*, 2022]. Цель атласа — обеспечение планирования гидрографических работ в зависимости от характера погоды и состояния поверхности моря с использованием многолетних наблюдений гидрометеорологических факторов («климатических норм») и статистических характеристик в виде таблиц или графиков (повторяемость и обеспеченность скоростей ветра по отдельным районам моря по месяцам и за весь год, аналогичные характеристики высот волн 3 % обеспеченности по месяцам и за безледный период, длительность штормов и окон погоды для таких волн, скоростей ветра и т. д.). Атлас включает 4 раздела:

1. Физико-географическая характеристика объекта работ.
2. Метеорологический режим, в котором представляются статистические характеристики ветра и высот волн.
3. Ледовый режим акватории моря.
4. Влияние ледовых условий на работу гидрографических судов. Приведенные данные могут служить основой для выбора благоприятных месяцев года в целях выполнения гидрографических работ с наибольшей эффективностью.

Ценным вкладом в познание природы Арктики в ходе ее освоения стал тематический «Атлас абразионной и ледово-экзарационной опасности прибрежно-шельфовой зоны Российской Арктики» [2020], созданный сотрудниками Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова при поддержке Российского научного фонда и размещенный в открытом доступе на платформе https://arcticcoast.ru/.

Атлас предназначен широкому кругу специалистов, ученых и всем, кто занимается вопросами освоения побережья и шельфа арктических морей России. В основу концепции атласа положено понятие о природных опасностях, успешно развиваемое на Географическом факультете в течение многих лет. В нем отражены процессы, наиболее опасные для человеческой деятельности в этом регионе — разрушения берегов (абразии) и ледовой экзарации, организованные в два раздела:

I. Вводно-методический:
   1. Типы арктических берегов.
   2. Воздействие ледяных образований на берега и дно.
   3. Принципы построения легенд карт.
   4. Обзорные тематические карты побережья Российской Арктики.

II. Карты абразионной и ледово-экзарационной опасности прибрежно-шельфовой зоны морей Российской Арктики:
   1. Обзорный уровень — для всей прибрежно-шельфовой зоны Российской Арктики.
   2. Региональный уровень — Белое море, Баренцево море, Печорское море, Карское море, Море Лаптевых, Восточно-Сибирское море, Чукотское море.
   3. Ключевые районы нефтегазового освоения — Байдарацкая губа, Обская губа.

Карты дополняются аналитическими и фотоматериалами, которые наглядно отражают распространение в Российской Арктике процессов абразии и ледовой экзарации, наиболее опасных при строительстве инженерных сооружений в прибрежно-шельфовой зоне замерзающего моря.

Особое внимание в атласном картографировании арктических морей уделяется биогеографическим особенностям, проблемам биоразнообразия и его сохранению. Они находят отображение в виде отдельно разрабатываемых тематических атласов. Один из первых среди них — «Биологический атлас морей Арктики 2000: Планктон Баренцева и Карского морей».

В 2011 г. вышел «Атлас биологического разнообразия морей и побережий Российской Арктики» [2011]. Рассмотрим его 4 раздела:

1. Введение.
2. Районирование и биологическое разнообразие морей и побережий Российской Арктики.
3. Биотопы и биологическое разнообразие важнейших пограничных зон.
4. Особо охраняемые природные территории и другие признанные участки природоохранной значимости.

В данных разделах представлены материалы по федеральным и региональным особо охраняемым природным территориям, ключевым орнитологическим территориям в береговой зоне арктических морей, территориальным единицам физико-географического и биогеографического районирования, а также видовому разнообразию отдельных групп биоты. Значительное место в атласе отведено системам пограничных биотопов на границах раздела сред: море–морской лед, море–пресный сток, море–суша и компонентам их

биологического разнообразия. Он также содержит рекомендации по сохранению морской среды, биологического разнообразия и оптимальной организации природопользования.

Начиная с 2016 г. Арктический научный центр и негосударственный институт развития Иннопрактика при поддержке ПАО «Роснефть „Арктика“» активно работают над серией тематических комплексных атласов арктических морей в целом и отдельных морей. Широкому кругу пользователей адресованы атласы «Морские млекопитающие Российской Арктики и Дальнего Востока» [2017] и «Виды — биологические индикаторы состояния морских арктических экосистем» [2020]. Первый из них включает многостороннюю информацию об арктических морях и дает представление об особенностях экологии и популяционной структуре для 43 видов морских млекопитающих, а также природных и антропогенных угрозах для их обитания. Второй посвящен исследованию и описанию 61 вида, индицирующих состояние экосистем на примере лицензионных участков ПАО «НК „Роснефть“».

Реакцией на необходимость решения проблем экологии стало появление атласов с экологической проблематикой. Едва ли не первый среди них электронный «Атлас химического и радиоактивного загрязнения Баренцева моря», созданный сотрудниками отдела антропогенной экологии Мурманского морского биологического института РАН по данным экспедиционных исследований (1991–2001 гг.) и обобщения других имеющихся материалов. Он включает карты химического и радиоактивного загрязнения донных отложений для 3 районов Баренцева моря: побережье от Варангер-фьорда до м. Териберский, юго-восточная часть (Печорское море) и центральная часть. В Атлас вошли карты загрязнения донных отложений: тяжелыми металлами, хлорорганическими соединениями, полициклическими ароматическими углеводородами, радионуклидами.

Начиная с 2015 г. ведется последовательная работа над подготовкой и изданием серии экологических атласов морей, в т. ч. арктических. Среди них — «Экологический атлас. Карское море» [2016], «Экологический атлас. Море Лаптевых» [2017], «Экологический атлас. Баренцево море» [2020], созданные при поддержке ПАО «Роснефть „Арктика“». Атласы предназначены для широкого круга читателей, в т. ч. для студентов и специалистов, интересующихся изучением и практическим использованием природных ресурсов морей. Выстроенность содержания атласов по единому плану придает им информационную целостность и возможность сопоставлять между собой. Атласы содержат физико-географическую и океанографическую характеристику, характеристику биоразнообразия, и антропогенной нагрузки на акватории морей и прилегающие территории; представляют территории с особым охранным статусом и экологическую чувствительность берегов (новая оригинальная проблематика). Помимо большого количества карт, текста и инфографики, наглядность и привлекательность атласов для пользователей расширяется посредством отсылок к дополнительным видеоматериалам, визуально представляющим облик района изучения.

Ранее изданный ООО «Газпром нефть шельф» «Экологический атлас Печорского моря» (часть Баренцева моря) [2019] суммирует результаты многолетних исследований окружающей среды, флоры и фауны в районе Приразломного месторождения.

Несколько карт по экологической обстановке в арктических морях, включено в «Экологический атлас России» [2017]. В частности, на экологической карте Арктики отображены районы положения затонувших судов, кораблей военно-морского флота, сброса боеприпасов и взрывчатых веществ, грунтов с повышенным загрязнением.

Задача общего комплексного системного подхода к атласному картографированию отдельных морей сохраняется в повестке дня. Среди исследований, посвященных отдельным моря, в первую очередь следует выделить долголетние успешные работы по изучению Белого моря [*Филатов* и др., 2014], его разностороннее информационное

обеспечение посредством комплексных геоинформационных и экспертных систем. Это позволило приступить к подготовке электронного комплексного Атласа Белого моря и водосбора на основе обобщения многолетних данных, публикация которого планируется в ближайшее время. Разработчики атласа справедливо отмечают возможность распространения опыта его создания и на другие регионы Арктики. Основная цель электронного атласа — многоцелевое, широкое и разнообразное использование при принятии управленческих решений, проектировании, разработке научных рекомендаций рационального использования, управлении и охране ресурсами моря, а также решении научных и учебных задач. В атласе представлена комплексная эколого-социо-экономическая информация о море и бассейне его водосбора. Он будет содержать сведения об океанографических характеристиках, в т. ч. сведения по гидрологии, гидрохимии, гидробиологии, геологии моря, карты-схемы течений, температуры воды, солености для разного комплекса гидрометеорологических условий, полученные не только по данным измерений, но и по результатам численного моделирования. По бассейну водосбора будут включены географические, геологические, климатические, экологические карты, а также социо-экономические сведения.

В общих комплексных атласах Арктики разного назначения морям посвящаются, как правило, отдельные подразделы или разделы. Они передают специфические показатели объекта картографирования (температура вод, соленость, плотность, циркуляция и др.). Однако ценность общих комплексных атласов состоит в широкой интерпретации функционирования морских геосистем в составе геосистем более высокого уровня, их значимости и роли в контексте региональных особенностей всего Арктического региона, РФ и мира в целом.

Содержание Атласа «Российская Арктика в XXI веке: природные условия и риски освоения» [2013], разработанного учеными Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, ориентировано главным образом на цели образования. Он в доступной форме содержит не только комплексную всестороннюю характеристику региона, но и особенности его формирования и становления как части РФ. Атлас вмещает 8 разделов:

1. Вводный.
2. Границы и история освоения Российской Арктики.
3. Геологическое строение и рельеф Российской Арктики.
4. Климат Российской Арктики.
5. Вечная мерзлота и ледники Российской Арктики.
6. Моря Российской Арктики. Воды суши.
7. Растительный и животный мир Российской Арктики.
8. Население и экономика Российской Арктики.

Из них раздел «Моря Российской Арктики. Воды суши» и подраздел «Животный мир. Биоресурсы морей и рек» направлены на характеристику собственно морей. Масштаб основных карт — 1: 20 000 000. Карты дополняются текстами, фотографиями, рисунками. Атлас выложен на геопортале РГО (https://geoportal.rgo.ru/).

Большое место отводится теме арктических морей в «Национальном атласе России» [2017], где в подразделе «Моря Российского сектора Арктики» помещены общегеографические карты морей м-ба 1: 5 000 000–1: 12 500 000, бассейнов морей м-ба 1: 10 000 000–1: 25 000 000, карты океанографических и гидрометеорологических условий, геохимических особенностей, загрязнения морей, биологических и энергетических ресурсов, опасных природных явлений и др. м-ба 1: 2 000 000–1: 45 000 000, текстовые описания, рисунки и графика.

«Национальный атлас Арктики» [2017] — традиционный комплексный атлас; по сути, это современная энциклопедия региона. 22 раздела атласа представляют природные, историко-культурные, социально-экономические, экологические и геополитические особенности Российской Арктики в свете современного понимания и оценки проблем этого региона. Из них два («Океан, моря»; «Берега морей») отображают океанографические и геоморфологические особенности морей. Основной м-б карт — 1: 15 000 000–1: 40 000 000. Помимо аналоговой подготовлена расширенная электронная версия.

Доступность научной информации массовой аудитории достигается посредством атласов информационно-справочного и учебно-образовательного плана. В Атласе «Российская Арктика. Пространство. Время. Ресурсы» [2019] кроме традиционных геологических, гидрометеорологических и биологических характеристик морей включены такие темы, как Северный морской путь, особенности плавания морского судна во льдах, деятельность ПАО «НК „Роснефть“» в Арктике, охрана окружающей среды на шельфе арктических морей и др.

Следует полагать, что все возрастающее значение Российской Арктики и Арктики в мире потребует расширения изученности региона и будет способствовать созданию атласных произведений с освещением новых тем [*Мозговой*, 2021] и технологически сопряженных с требованиями и интересами разных категорий пользователей.

В последние время стирается грань между атласами, как картографическими полиграфическими изданиями и электронными ресурсами, и даже результатами визуализации данных посредством разных программ. С середины 1990-х гг. многие атласы имеют расширенную версию на компакт (или DVD) дисках, большая часть из которых впоследствии перенесена в открытый доступ в сети Интернет [Российская Арктика…, 2013; Национальный атлас Арктики, 2017; Национальный атлас России, 2017]. Такой подход упрощает поиск и позволяет делать тематические подборки только интересующих карт. В сети Интернет также доступны порталы, содержащие как готовые карты и картосхемы, так и инструментарий для их быстрого построения, например: NCEI, Copernicus, windy. Как правило, для построения используются ретроспективные анализы или прогнозы на регулярных сетках (для морей 1/12 — 1º пространственного разрешения, несколько десятков вертикальных уровней).

С другой стороны, имеется инструментарий, посредством которого можно построить и быстро визуализировать данные даже без доступа в сеть Интернет. Особенно это актуально для гидрометеорологических данных. Для их представления разработаны специальные форматы netCDF и grib, когда с помощью специализированных программ (например: Ocean Data View, Ferret, Panoply и др.) можно оперативно получать интересующие изображения, что делает их практически идентичными вышеупомянутым интернет-ресурсам. Их описание в статье не приводится, как по причине ограниченности ее объема, так и из-за того, что они уже слишком далеко отстоят от традиционных атласов.

С 2013 г. в России функционирует Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО)[1] — межведомственная информационная система для доступа к ресурсам морских информационных систем и комплексного информационного обеспечения морской деятельности. Она является крупнейшим российским порталом, посвященным морям Российской Арктики. ЕСИМО разрабатывается в рамках Федеральной целевой программы «Мировой океан». Во исполнение постановления Правительства Российской Федерации от 29.12.2005 г. № 836 «Об утверждении Положения о ЕСИМО» функционирует первая очередь системы.

[1] Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане. Электронный ресурс: http://www.esimo.ru/ (дата обращения: 06.06.2022).

На портале ЕСИМО представлены следующие сервисы для работы с информацией по гидрометеорологической обстановке в морях России:

Интерактивная карта. С помощью сервиса пользователь может получить информацию о текущей погоде в ближайшем к любой выбранной точке пункте наблюдений. Также доступны сведения о погоде в предыдущие сроки (в табличном и графическом виде), прогнозе погоды и климатических характеристиках.

Погодные условия по морям РФ. В разделе представлены сведения о наблюдаемых и прогнозируемых величинах следующих параметров: скорость ветра, волнение, температура воздуха, температура поверхности воды, атмосферное давление.

Штормовые оповещения и предупреждения. Посредством этого инструмента пользователь может получать информацию о штормовых оповещениях и предупреждениях за произвольный период времени и на произвольной территории.

Предрасчет приливов. Доступна информация о времени наступления малых и полных вод в пунктах на побережье арктических и дальневосточных морей России. В то же время на портале ЕСИМО подчеркивается, что представленная информация о приливах является ориентировочной и не может использоваться для судоходства и строительства; для таких целей необходимо использовать информацию из ежегодных таблиц приливов, издаваемых Управлением навигации и океанографии Министерства обороны России.

Климат морей России. В разделе собраны статистические данные и тренды для прибрежных и открытых акваторий морей России по следующим величинам: температура воды, температура воздуха, соленость, скорость ветра, высота волн, уровень моря, содержание растворенного кислорода. Для открытого моря информация доступна не только для поверхности моря, но и для стандартных горизонтов.

Атлас морей России. Раздел содержит преимущественно графическую информацию (карты, графики, диаграммы) о пространственно-временном распределении гидрометеорологических величин в морях России. Для прибрежных акваторий приводятся результаты обработки данных наблюдений на морских гидрометеорологических постах. Для открытого моря данные приводятся либо в виде карт с изолиниями для всего моря, либо в виде таблиц, содержащих информацию для одноградусных квадратов.

Мировым аналогом портала ЕСИМО в некотором роде служат продукты со средствами визуализации Национального центра данных об окружающей среде (National Centers for Environmental Information)[1] США. На портале представлены многочисленные продукты по различным параметрам (океанология, метеорология, геофизика, химия океана, морская биология и др.).

Один из самых интересных продуктов на портале — база данных Мирового океана (World Ocean Database, в дальнейшем — WODB) и создаваемый лабораторией климата океана НЦДОС США [*Boyer* et al., 2018] на ее основе «Атлас Мирового океана» (World Ocean Atlas, WOA). База данных Мирового океана содержит натурные данные измерений разного типа — батометрические; CTD, теряемых (XBT), механических (MBT) и цифровых батитермографов (DBT); профилографов (PFL); дрейфующих буев (DRB); заякоренных буев (MRB); автономных батитермографов, размещенных на животных (APB); данные регистратора волнения (UOR); поверхностных термосалинографов (SUR); данные глайдеров (GLD).

На основе указанных выше океанологических данных созданы базы осредненных как по времени, так и по пространству данных (т. н. объективный анализ), прежде всего WOA. Они являются хорошим материалом для характеристики типичного состояния океана и часто служат начальными условиями для модельных расчетов. На портале центра данных

[1] National Centers for Environmental Information. Web resource: https://www.ncei.noaa.gov/ (accessed 02.06.2022).

[NOAA…][1] присутствует средство визуализации гидрологических и гидрохимических параметров. Центр данных также открыл доступ к региональной климатологии для Арктического региона [*Boyer* et al., 2015] с интернет-средствами визуализации (правда, только термохалинных характеристик). Региональную климатологию Арктики (PHC 3.0) со средствами визуализации предоставляет также Полярный научный центр США (Polar science center of Hydrographic Climatology)[2].

Следует отметить специализированный портал Copernicus[3], обладающий, пожалуй, лучшей функциональностью для визуализации данных онлайн, где для Арктики можно визуализировать около 50 различных показателей. К сожалению, доступ на него из России закрыт. В основном это упоминаемые реанализы и прогнозы по различным параметрам арктических морей (океанология, гидрохимия, лед, волнение и уровень, планктон, спутниковые данные). Существуют версии визуализации как для начинающих, так и опытных пользователей.

В последнее время появились порталы, визуализирующие данные, рассчитанные на начинающих пользователей и даже на мобильные телефоны. В качестве примера можно привести сайт[4] и приложение windy.com, обладающее, пожалуй, наилучшей функциональностью. На них с помощью управления слоями можно отобразить метеорологическую информацию, состояние поверхности воды и ряд биологических параметров в виде накладываемых слоев.

ВЫВОДЫ

Арктические моря России остаются одним из объектов, наиболее представленных в атласном картографировании России. Созданные атласы с их огромным информационным потенциалом, аккумулирующим результаты многолетнего и текущего изучения, свидетельствуют о значительном продвижении в обзорном картографировании арктических морей в широком тематическом спектре. Они направлены на решение возникающих проблем и удовлетворение научных, практических и образовательных запросов общества, которые реализуются посредством расширения и углубления тематики и содержания атласов, актуализации информации и обеспечения доступа к ней через подготовку электронных произведений на базе достижений информационных технологий.

Знакомство с современным атласным картографированием морей Российской Арктики позволяет отметить тенденции его поступательного развития:

- расширение тематического спектра изучения в соответствии с запросами развития региона;
- стремление к оперативности и актуализации содержания атласов через использование современных геоинформационных технологий, позволяющих сочетать информацию и знание с большим диапазоном временного разрешения (гг.–дни) в режиме реального масштаба времени, возможностью ре- и перспективного анализа для быстрого реагирования на запросы навигации, экологии, экономики и т. д.;
- создание специализированных порталов и программ с возможностью быстрой визуализации большого ряда параметров, что делает их конечные продукты практически неотличимыми от карт и атласов;

---

1 Arctic regional climatology. Электронный ресурс: https://www.ncei.noaa.gov/products/arctic-regional-climatology (accessed 15.03.2023).

2 Polar science center of Hydrographic Climatology. Электронный ресурс: http://psc.apl.washington.edu/nonwp_pr ojects/PHC/Climatology.html (accessed 02.06.2022).

3 Copernicus. Электронный ресурс: https://marine.copernicus.eu (accessed 15.03.2023).

4 Электронный ресурс: https://windy.com (accessed 02.06.2022).

- стирание грани между традиционными бумажными атласами и их интернет-версиями, позволяющее неограниченно расширять объемы представляемой информации;
- внимание к оптимизации семиотических систем атласов, расширение спектра видов контента и их целенаправленный отбор в соответствии с назначением и тематикой произведения для достижения оптимальной визуализации содержания;
- создание атласов на разных носителях (бумажные, компакт диски и т. д.) в зависимости от категории и компетенции пользователей (ученые, специалисты, учащиеся и т. д.) в стремлении к обеспечению наибольшего доступа к знаниям о морях и Арктике в целом.

Накопленный опыт разработки атласов будет способствовать подготовке более совершенных атласных произведений, повышению их информационной емкости и выход на более крупные масштабы картографирования посредством перехода на региональный и подрегиональный уровень (отдельные моря), привлечению новых видов представления контента, всецело ориентированных на решение фундаментальных и прикладных задач освоения Арктики в XXI в.

БЛАГОДАРНОСТИ

Статья подготовлена при поддержке гранта РНФ 19-17-00110-П.

ACKNOWLEDGEMENTS

The article was prepared with the support of the RSF grant 19-17-00110-P.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Арктическая политика России**:** международные аспекты. Докл. к XXII Апр. междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества, 2021. М.: Издательский дом Высшей школы экономики, 2021. 56 с.

Атлас абразионной и ледово-экзарационной опасности прибрежно-шельфовой зоны Российской Арктики. РАН, 2020. 69 с.

Атлас Арктики. М.: ААНИИ и ГУГК, 1985. 204 с.

Атлас биологического разнообразия морей и побережий российской Арктики. М.: WWF России, 2011. 64 с.

Атлас гидрометеорологических и ледовых условий морей Российской Арктики. М.: Нефтяное хозяйство, 2015. 128 с.

Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013). Регион 1. Моря Восточной Арктики. Регион 2. Черное, Азовское и Каспийское моря. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2014. 256 с.

Атлас ледовых образований. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 140 с.

Атлас океанов. Проливы Мирового океана. СПб.: Главное управление навигации и океанографии, 1993. 402 с.

Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. М.: М-во обороны СССР. Главное управление навигации и океанографии, 1980. 190 с.

Атлас океанов. Человек и океан. СПб.: Главное управление навигации и океанографии, 1996. 328 с.

Атлас химического и радиоактивного загрязнения Баренцева моря, 2002. Электронный ресурс: http://pollution.mmbi.info/ (дата обращения 06.06.2022).

Биологический атлас морей Арктики 2000: планктон Баренцева и Карского морей. Мурманск, 2000. 270 с. Электронный ресурс: ftp://ftp.nodc.noaa.gov/ (дата обращения 3.08.22).

Виды — биологические индикаторы состояния морских арктических экосистем. М.: Фонд «НИР», 2020. 383 с.

Воронцов А.А. Создание электронных атласов по морской природной среде на основе ГИС- технологий в ЕСИМО. Труды VI Российской конференции «Современное состояние и проблемы навигации и картографии». СПб.: ГНИНГИ, 2007. С. 497–501.

Мозговой С.А. Морское культурное наследие России: изучение, сохранение, музеефикация. М.: Институт Наследия, 2021. 434 с. DOI: 10.34685/HI.2021.84.37.007.

Морские млекопитающие Российской Арктики и Дальнего Востока. М.: Арктический научный Центр, 2017. 311 с.

Морской атлас «Климат морей России и ключевых районов Мирового океана». Электронный ресурс: http://data.oceaninfo.ru/atlas/index_atlas.html (дата обращения 02.06.2022).

Национальный атлас Арктики. М.: Роскартография, 2017. 496 с.

Национальный атлас России. Т. 2. М.: Роскартография, 2007. 495 с.

Российская Арктика в XXI веке: природные условия и риски освоения. М.: Феория, 2013. 143 с.

Российская Арктика. Пространство. Время. Ресурсы. М.: Иннопрактика, Феория, 2019. 796 с.

Тетерин Г.Н. Картографическое обеспечение Российской Федерации XXI в. Электронный ресурс: https://istgeodez.com/kartograficheskoe-obespechenie-rossiyskoy-federatsii-xxi-v/ (дата обращения 3.08.22).

Филатов Н.Н., Толстиков А.В., Богданова М.С., Литвиненко А.В., Меншуткин В.В. Создание информационной системы и электронного атласа по состоянию и использованию ресурсов Белого моря и его водосбора. Арктика: экология и экономика, 2014. № 3 (15). С. 18–29.

Шаронов А.Ю., Шматков В.А. Атлас погоды для выполнения гидрографических работ в Арктике на примере Баренцева моря. Российская Арктика, 2022. № 19. С. 34–52.

Экологический атлас. Баренцево море. М.: Фонд «НИР», 2020. 450 с.

Экологический атлас. Карское море. М.: Арктический научный центр, 2016. 271 с.

Экологический атлас. Море Лаптевых. М.: Арктический научный центр, 2017. 303 с.

Экологический атлас Печорского моря, 2019. 142 с.

Экологический атлас России. М.: Феория, 2017. 509 с.

Boyer T.P., Baranova O.K., Biddle M., Johnson D.R., Mishonov A.V., Paver C., Seidov D., Zweng M.M. Arctic Ocean regional climatology (NCEI Accession 0115771), 2015. NOAA National Centers for Environmental Information. Электронный ресурс: https://www.ncei.noaa.gov/products/arctic-regional-climatology (дата обращения 15.03.2023). DOI: 10.7289/V5QC01J0.

Boyer T.P., Hernan E.G., Locarnini R.A., Zweng M.M., Mishonov A.V., Reagan J.R., Weathers K.W., Baranova O.K., Seidov D., Smolyar I.V. World Ocean Atlas 2018. NOAA National Centers for Environmental Information. Dataset. Электронный ресурс: https://www.ncei.noaa.gov/archive/accession/NCEI-WOA18 (дата обращения 15.03.2023).

REFERENCES

Atlas of abrasion and ice-exaration hazards of the coastal shelf zone of the Russian Arctic. RAS, 2020. 69 p. (in Russian).

Atlas of biological diversity of the seas and coasts of the Russian Arctic. Moscow: WWF Russia, 2011. 64 p. (in Russian).

Atlas of chemical and radioactive contamination of the Barents Sea. 2002. Web resource: http://pollution.mmbi.info/ (accessed 06.06.2022) (in Russian).

Atlas of climate change in large marine ecosystems of the Northern Hemisphere (1878–2013). The Region 1. Sea of The Eastern Arctic. The Region 2. Black, Azov and Caspian Seas. Rostov-on-Don: Publishing House of SSC RAS, 2014. 256 p. (in Russian).

Atlas of glacial formations. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1974. 140 p. (in Russian).

Atlas of hydrometeorological and ice conditions of the seas of the Russian Arctic. Moscow: Publishing House “Neftyanoe Khozyaystvo” (Oil Industry), 2015. 128 p. (in Russian).

Atlas of the Arctic. Moscow: AARI and MDGC, 1985. 204 p. (in Russian).

Atlas of the Oceans. Man and the ocean. St. Petersburg: Main Directorate of Navigation and Oceanography, 1996. 328 p. (in Russian).

Atlas of the Oceans. Straits of the World Ocean. St. Petersburg: Main Directorate of Navigation and Oceanography, 1993. 402 p. (in Russian).

Atlas of the Oceans. The Arctic Ocean. V. 3. Moscow: Ministry of Defense of the USSR. Main Directorate of Navigation and Oceanography, 1980. 190 p. (in Russian).

Biological Atlas of the Arctic Seas 2000: Plankton of the Barents and Kara Seas. Murmansk, 2000. 270 p. Web resource: ftp://ftp.nodc.noaa.gov/ (accessed 3.08.22)

Boyer T.P., Baranova O.K., Biddle M., Johnson D.R., Mishonov A.V., Paver C., Seidov D., Zweng M.M. Arctic Ocean regional climatology (NCEI Accession 0115771), 2015. NOAA National Centers for Environmental Information. DATA GOV. DOI: 10.7289/V5QC01J0 (accessed 15.03.2023).

Boyer T.P., Hernan E.G., Locarnini R.A., Zweng M.M., Mishonov A.V., Reagan J.R., Weathers K.W., Baranova O.K., Seidov D., Smolyar I.V. World Ocean Atlas 2018. NOAA National Centers for Environmental Information. Dataset. Web resource: https://www.ncei.noaa.gov/archive/accession/NCEI-WOA18 (accessed 15.03.2023).

Ecological Atlas. Barents Sea. Moscow: NIR Foundation, 2020. 450 p. (in Russian).

Ecological atlas. Kara Sea. Moscow: LLC “Arctic Scientific Center”, 2016. 271 p. (in Russian).

Ecological atlas. Laptev Sea. Moscow: LLC “Arctic Scientific Center”, 2017. 303 p. (in Russian).

Ecological Atlas of Russia. Moscow: Feoria, 2017. 509 p. (in Russian).

Ecological atlas of the Pechora Sea, 2019. 142 p. (in Russian).

Filatov N.N., Tolstikov A.V., Bogdanova M.S., Litvinenko A.V., Menshutkin V.V. Creation of an information system and an electronic atlas on the state and use of the resources of the White Sea and its catchment area. Arctic: Ecology and Economics, 2014. No. 3 (15). P. 18–29 (in Russian).

Marine atlas "Climate of the seas of Russia and key regions of the World Ocean". Web resource: http://data.oceaninfo.ru/atlas/index_atlas.html (accessed 06.02.2022) (in Russian).

Marine mammals of the Russian Arctic and the Far East. Moscow: LLC "Arctic Scientific Center", 2017. 311 p. (in Russian).

Mozgovoy S.A. Maritime cultural heritage of Russia: Study, preservation, museification. Moscow: Heritage Institute, 2021. 434 p. (in Russian). DOI: 10.34685/HI.2021.84.37.007.

National atlas of Russia. V. 2. Moscow: Roscartography, 2007. 495 p. (in Russian).

National Atlas of the Arctic. Moscow: Roscartography, 2017. 496 p. (in Russian).

Russia's Arctic policy: International aspects. Report to the XXII April international scientific conference on problems of economic and social development, 2021. Moscow: Publishing House of the Higher School of Economics, 2021. 56 p.

Sharonov A.Yu., Shmatkov V.A. Weather atlas for hydrographic work in the Arctic on the example of the Barents Sea. The Russian Arctic, 2022. No. 19. P. 34–52 (in Russian).

Species — biological indicators of the state of marine Arctic ecosystems. Moscow: "NIR" Foundation, 2020. 383 p. (in Russian).

Teterin G.N. Cartographic support of the Russian Federation of the XXI century. Web resource: https://istgeodez.com/kartograficheskoe-obespechenie-rossiyskoy-federatsii-xxi-v/ (accessed 3.08.22) (in Russian).

The Russian Arctic in the XXI century: Natural conditions and risks of development. Moscow: Feoria, 2013. 143 p. (in Russian).

The Russian Arctic. Space. Time. Resource. Moscow: Innopraktika, Feoria, 2019. 796 p. (in Russian).

Vorontsov A.A. Creation of electronic atlases on the marine environment based on histological data. Proceedings of the VI Russian Conference "The current state and problems of navigation and cartography". St. Petersburg: State Research Navigation and Hydrographic Institute (SRNHI), 2007. P. 497–501 (in Russian).

УДК: 551.467.3+265.53 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-646-656**

В.А. Романюк[1], **В.М. Пищальник**[2], **И.В. Шумилов**[3], **И.В. Никулина**[4]

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ТАТАРСКОГО ПРОЛИВА (ЯПОНСКОЕ МОРЕ)

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены особенности отдельных элементов ледового режима юго-восточной части Татарского пролива за период стандартной климатической нормы 1991–2020 гг. Выполнен анализ межсезонной и внутрисезонной изменчивости ледовитости, определены даты основных ледовых фаз. На основе данных спутниковых наблюдений и геоинформационных технологий выполнен анализ и построена карта пространственного распределения продолжительности ледового периода в юго-восточной части Татарского пролива. Установлено, что ее северная подзона имеет более суровые ледовые условия, которые обусловлены географическим положением и особенностями ледового режима Татарского пролива. Отмечено, что северная подзона в отдельные годы может покрываться льдом на 100 %, в то время как максимальная ледовитость южной подзоны не превышает 24 %. Вместе с тем, в среднем за период стандартной климатической нормы 1991–2020 гг. стадия максимального развития ледовых процессов в северной подзоне длится около 23 суток — с 10 февраля по 5 марта, а на кривой внутрисезонной изменчивости отчетливо выделяются 2 сезонных максимума ледовитости — 10 февраля и 5 марта. Абсолютные значения внутрисезонной изменчивости ледовитости южной подзоны в разы ниже, чем в северной: фаза интенсивного развития здесь длится с 15 по 28 февраля, фаза разрушения с начала марта по середину марта. В среднем за исследуемый период наибольшее количество дней со льдом (55–60 сут.) наблюдается на участке побережья от с. Красногорск до с. Ильинское, продолжительность периода со льдом от 20 до 35 суток характерна для отрезка побережья от мыса Старомаячный до мыса Яблоновый.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ледовитость, ГИС, климатические нормы, Татарский пролив, Японское море

1 ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет», ул. Ленина, д. 290, Южно-Сахалинск, Россия, 693000,
e-mail: **varomanyuk2020@gmail.com**

2 ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет», ул. Ленина, д. 290, Южно-Сахалинск, Россия, 693000,
e-mail: **vpishchalnik@rambler.ru**
ФГБУН «ИМГИГиГ ДВО РАН», ул. Науки, д. 1Б, Южно-Сахалинск, Россия, 693000,
e-mail: **vpishchalnik@rambler.ru**

3 ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет», ул. Ленина, д. 290, Южно-Сахалинск, Россия, 693000,
e-mail: **ilyarolevik1@yandex.ru**

4 ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет», ул. Ленина, д. 290, Южно-Сахалинск, Россия, 693000,
e-mail: **irinkaeremenko@yandex.ru**

Valery A. Romanyuk[1], **Vladimir M. Pishchal'nik**[2], **Ilya V. Shumilov**[3], **Irina V. Nikulina**[4]

ANALYSIS OF THE PECULIARITIES OF THE ICE REGIME IN THE SOUTHEASTERN PART OF THE TATAR STRAIT (SEA OF JAPAN)

ABSTRACT

The article considers the features of the ice regime of the southeastern part of the Tatar Strait during the period of the standard climatic norm 1991–2020. The analysis of inter-seasonal and intra-seasonal variability of ice cover was carried out, the dates of the main ice phases were determined. Based on satellite observations and the developed software package, the analysis was performed and maps of the spatial distribution of the ice period in the southeastern part of the Tatar Strait were constructed. It is established that the northern subzone of the southeastern part of the Tatar Strait has more severe ice conditions, which are due to its geographical location and the peculiarities of the ice regime of the Tatar Strait. It is noted that the northern subzone in some years can be filled with ice by 100 %, while the maximum occupancy of the southern subzone does not exceed 24 %. At the same time, on average for the period of the standard climatic norm of 1991–2020. the stage of maximum development of ice processes in the northern subzone lasts on average about 23 days — from February 10 to March 5, and on the intra-seasonal variability curve, 2 seasonal ice maxima are clearly distinguished — February 10 and March 5. The absolute values of the intra-seasonal variability of the ice cover of the southern subzone are several times lower than in the northern one: the phase of intensive development here lasts from February 15 to February 28, the phase of destruction from early March to mid-March. On average, during the study period, the largest number of days with ice is observed on the coast from the village of Krasnogorsk to the village of Ilyinskoye, the duration of the period with ice from 20 to 35 days is typical for the segment of the coast from Cape Staromayachny to Cape Yablonovy.

KEYWORDS: ice coverage, GIS, climatic norms, Tatar Strait, Sea of Japan

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Сахалинской области проводится эксперимент по контролю за выбросом парниковых газов[5]. В рамках государственного задания «Углеродный баланс биоморфолитосистем побережья и прилегающих морских акваторий окраинных морей Дальнего Востока (FEFF-2022-0027)» планируется создание карбонового полигона и размещение на нем марикультурной фермы, на которой будет оцениваться фоновое значение поглощающей способности CO_2 морскими экосистемами и его изменение. Одним из наиболее перспективных районов проведения исследований, с точки зрения климатических и логистических условий, является юго-западное побережье о. Сахалин. Однако, наличие здесь в зимний период времени ледяного покрова ограничивает

1 Sakhalin state University, 290, Lenina str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russia, *e-mail:* **varomanyuk2020@gmail.com**

2 Sakhalin state University, 290, Lenina str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russia, *e-mail:* **vpishchalnik@rambler.ru**
FSBI "IMGIG FEB RAS",1B, Nauki str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russia, *e-mail:* **vpishchalnik@rambler.ru**

3 Sakhalin state University, 290, Lenina str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russia, *e-mail:* **ilyarolevik1@yandex.ru**

4 Sakhalin state University, 290, Lenina str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russia, *e-mail:* **irinkaeremenko@yandex.ru**

5 Федеральный закон от 06.03.2022 № 34-ФЗ «О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации»

функционирование объектов марикультурных хозяйств, сокращает период проведения морских исследований, а также повышает вероятность повреждения технологического оборудования. Именно поэтому актуальным является вопрос исследования особенностей отдельных элементов ледового режима юго-восточной части Татарского пролива.

Согласно ледово-географическому районированию, акватория Татарского прол. включает в себя северный, юго-западный и юго-восточный районы [*Минервин* и др., 2015]. Формирование ледяного покрова начинается в северной зоне в конце ноября, которая является основной областью генерации льда в проливе и отражает общую динамику его ледовитости. Дальнейшее образование льда отмечается в юго-западной (третья декада декабря) и, в последнюю очередь (как правило, в январе) — в юго-восточной зоне. Условия формирования ледяного покрова в Татарском прол. зависят от орографии береговой линии, географического положения, гидрологических условий и метеорологической обстановки [*Якунин*, 2012]. Более 90 % ледовитости Японского моря сосредоточено на акватории Татарского прол. [*Плотников*, 2002, 2010]. В течение зимне-весеннего периода преобладающий ветер северных румбов обусловливает постоянный дрейф льда в южном и юго-восточном направлениях, при этом в юго-восточной части пролива происходит разрушение льда под действием теплого Цусимского течения (рис. 1.) [*Якунин*, 2012; *Минервин* и др., 2015,]. Несмотря на общую тенденцию снижения ледовитости Татарского прол., которая за период с 1882 по 2018 гг. составляет около 8 % [*Пищальник* и др., 2019] и средней величине ледовитости, равной 34 %, в отдельные годы значения среднезимней ледовитости могут достигать 56 %, а ледовый период может длиться до 190 сут. [*Плотников*, 1990; *Якунин*, 2012].

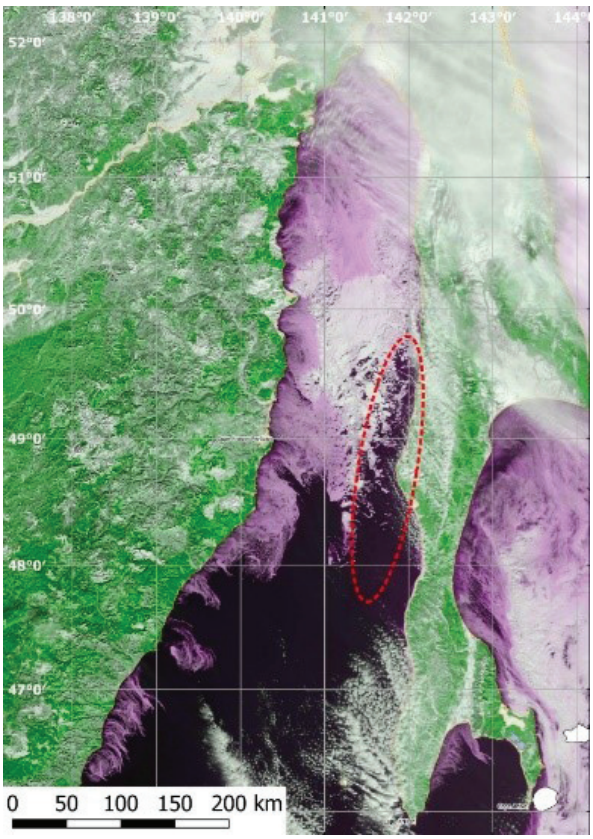


Рис. 1. Разрушение ледяного покрова ветвью теплого Цусимкого течения. Спутниковый снимок Terra-MODIS, 27 января 2023 г.
Fig. 1. Destruction of the ice cover by a branch of the warm Tsushima current. Terra-MODIS satellite image, January 27, 2023

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ элементов ледового режима юго-восточной части Татарского прол. выполнен на основе ледовых карт-схем Японского метеорологического агентства с пентадной дискретностью, подготовленных на основе спутниковых наблюдений в микроволновом, инфракрасном и видимом диапазонах спектра за период современной климатической нормы с 1991 по 2020 гг. [Руководящие указания…, 2017]. Результаты сравнительного анализа подробно рассмотрены в [*Минервин* и др., 2015]. Расчеты ледовых характеристик производились с использованием ПК «Лед»[1] в границах юго-восточной части Татарского прол., которая для удобства анализа была разделена на северную и южную подзоны [*Минервин* и др., 2015; Границы…, 2000] (рис. 2).

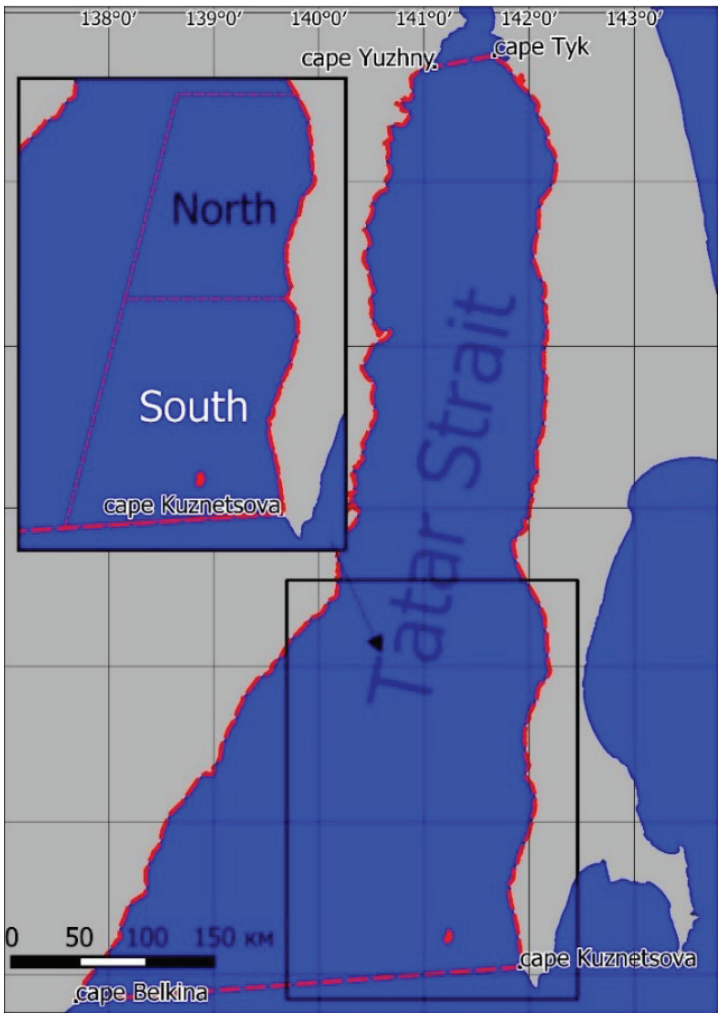


Рис. 2. Границы исследуемого района [Границы…, 2000]
Fig. 2. Boundaries of the study area [Boundaries…, 2000]

Значения ледовитости исследуемых акваторий вычислялись в виде отношения площадей, занятых льдом, к площади акватории в целом и представлялись в процентах. Среднезимнее значение ледовитости за ледовый сезон рассчитывалось путем усреднения месячных значений площадей ледяного массива с декабря по апрель.

[1] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015660472. Программный комплекс для расчета площади ледяного покрова в Охотском и Японском морях по данным ДЗЗ (ПК «ЛЕД»). Дата гос. регистрации в Росреестре программ для ЭВМ 01 октября 2015 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Межсезонная изменчивость ледовитости

Характерной особенностью многолетнего хода ледовитости северной подзоны юго-восточной части Татарского прол. является значительный размах колебаний значений ледовитости (рис. 3). Так, за период с 1991 по 2020 гг. размах среднезимней и максимальной ледовитости составляет 29 и 99 % соответственно. За весь исследуемый период значение среднезимней ледовитости составляет 7 %, при этом ее наибольшие значения отмечались в 2001 (24 %), 2012 (18 %) и 2019 гг. (28 %). Самой малоледовитой были зимы 1991 г., когда среднезимняя ледовитость составляла 2 %. За рассматриваемый 30-летний период в северной подзоне наблюдается тенденция увеличения среднезимней ледовитости, величина положительного линейного тренда составляет 9 %.

Рис. 3. Изменчивость среднезимней ледовитости в юго-восточной части Татарского пролива за период 1991–2020 гг.
Fig. 3. Variability of the average winter ice cover in the southeastern part of the Tatar Strait for the period 1991–2020

Величина среднезимнего значения ледовитости южной подзоны за исследуемый период составляет 0,2 %. Наиболее ледовитыми были зимы 2001 (2,6 %), 2008 (0,5 %) и 2019 гг. (0,9 %). Отдельно стоит отметить, что в 23 % случаев (в ледовые сезоны 1991–1993, 1995, 1997, 1998, 2011 гг.) на акватории южной подзоны ледяной покров отсутствовал, а среднее значение максимальных величин ледовитости составляет 2,5 %.

Для решения вопроса выбора места размещения марикультурных хозяйств крайне важной является информация о наличии ледяного покрова. Анализ графика максимальных значений ледовитости позволяет сделать вывод, что в отдельные годы максимальное заполнение дрейфующим льдом северной подзоны достигает 60–100 % (среднее значение 39 %) и только в одном случае за 30-летний период (1991 г.) наблюдалось полное отсутствие льда (рис. 4).

Во внутрисезонной изменчивости среднезимней ледовитости северной подзоны за период 1991–2020 гг. отчетливо выделяются две волны интенсивного ледообразования. Первая — с конца декабря по середину января, вторая — с конца января по первую декаду февраля (рис. 5). Вероятно, пауза в развитии ледовитости связана с активизацией циклонической активности в это время и, как следствие, сменой направления

господствующих ветров [*Шатилина*, 2006; *Плотников*, 2015]. Стадия максимального развития ледовых процессов продолжается немногим более 20 сут. — с 10 февраля по 5 марта. В этот период значения средней ледовитости варьируются в диапазоне 15–19 %. Следует обратить внимание на тот факт, что повышение ледовитости северной подзоны > 90 % происходит в период с 10 февраля по 28 февраля. На кривой внутрисезонной изменчивости также отчетливо выделяются 2 сезонных максимума ледовитости — 10 февраля и 5 марта. Уменьшение ледовитости на стадии разрушения происходит неравномерно со средней скоростью ~2 % за пентаду. Во второй половине марта наблюдается кратковременный рост ее значений, связанный с началом перестройки атмосферной циркуляции.

Абсолютные значения внутрисезонной изменчивости ледовитости южной подзоны в разы ниже, чем северной. Фаза интенсивного заполнения местным (образующимся в прибрежной полосе) и дрейфующим из северной части пролива льдом здесь приходится на вторую половину февраля (рис. 6). За ней следует не менее интенсивная фаза разрушения ледяного покрова. Окончательное разрушение льда в южной подзоне происходит в середине марта. Максимальные внутрисезонные значения ледовитости в среднем не превышают 24 %. На участке побережья от м. Лопатина до м. Кузнецова, находящегося под влиянием Цусимского течения, льды полностью отсутствуют. В отдельные годы во второй половине апреля возможен вынос отдельных полос охотоморского льда из пролива Лаперуза, представленного активно разрушающимися обломками торосов и ледяной кашей.

Рис. 4. Изменчивость максимальной ледовитости
в юго-восточной части Татарского пролива за период 1991–2020 гг.
Fig. 4. Variability of maximum ice cover
in the southeastern part of the Tatar Strait for the period 1991–2020

Рис. 5. Внутрисезонная изменчивость средней ледовитости юго-восточной части Татарского пролива за период 1991–2020 гг.
Fig. 5. Intraseasonal variability of the average ice cover of the southeastern part of the Tatar Strait for the period 1991–2020

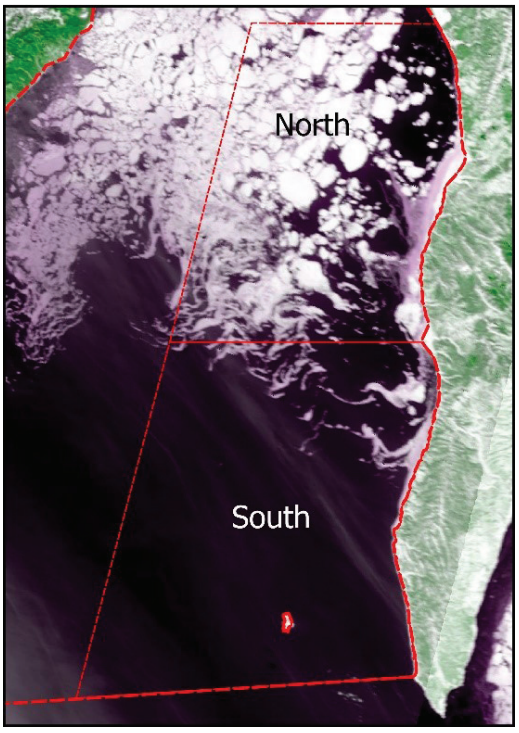


Рис. 6. Ледовая обстановка в юго-восточной части Татарского пролива 27 февраля 2001 г. (Terra-MODIS)
Fig. 6. Ice conditions in the southeastern part of the Tatar Strait on February 27, 2001 (Terra-MODIS)

Даты наступления ледовых фаз и продолжительность ледового периода

В табл. 1 представлены статистические характеристики дат наступления основных ледовых фаз в северной и южной подзонах юго-восточной части Татарского прол. В среднем за период 1991–2020 гг. в северной подзоне первое появление морского льда происходило на 11 сут. раньше, чем в южной — 18 и 29 января соответственно. Следует отметить, что фактические даты наступления основных ледовых фаз в северной и южной подзонах могут колебаться в широких пределах. Так, самое раннее устойчивое образование льда в северной подзоне зафиксировано 5 декабря 2018 г., самое позднее — на 77 сут. позже, 20 февраля 1996 г. В южной подзоне разброс между ранними и поздними датами устойчивого образования льда составляет 54 сут. (15 января 2019 г. и 10 марта 2012 г.). Окончательное очищение ото льда на исследуемых акваториях в среднем происходит с разницей в 19 сут.: в северной подзоне 20 марта, в южной — 1 марта. Среднемноголетняя продолжительность ледового периода в северной подзоне длится на 50 сут. дольше, чем в южной и составляет 60 и 10 сут. соответственно.

Табл. 1. Даты наступления основных ледовых фаз
в юго-восточной части Татарского пролива за период с 1991 по 2020 гг.
Table 1. The dates of the onset of the main ice phases
in the south-eastern part of the Tatar Strait for the period from 1991 to 2020

	Северная подзона	**Южная подзона**
Средняя дата первого появления льда	***18 янв.***	***29 янв.***
Ранняя дата первого появления льда	5 дек.	31 дек.
Поздняя дата первого появления льда	20 фев.	28 фев.
Средняя дата устойчивого образования льда	***18 янв.***	***9 фев.***
Ранняя дата устойчивого образования льда	5 дек.	15 янв.
Поздняя дата устойчивого образования льда	20 фев.	10 мар.
Средняя дата окончательного очищения ото льда	***20 мар.***	***1 мар.***
Ранняя дата окончательного очищения ото льда	5 фев.	20 янв.
Поздняя дата окончательного очищения ото льда	15 апр.	20 мар.

При выборе места размещения объектов марикультурных хозяйств также необходимо учитывать время наличия ледяного покрова, т. е. периода со времени даты первого появления льда на акватории по дату окончательного очищения акватории ото льда. С использованием данных дистанционного зондирования Земли был выполнен расчет пространственного распределения средней за период 1991–2020 гг. продолжительности ледового периода на акватории юго-восточного района Татарского прол. (рис. 7). По результатам анализа расчетов наибольшая продолжительность ледового периода (55–60 сут.) отмечается на участке побережья от с. Красногорск (48°25' с. ш., 142°05' в. д.) до с. Ильинское (47°59'31" с. ш., 142°12' в. д.). На участке побережья от м. Старомаячный до м. Яблоновый продолжительность периода с наличием льда варьирует от 20 до 35 сут. Минимальная продолжительность ледового периода от 5 до 10 сут. характерна для прибрежной зоны от с. Яблочное (47°09' с. ш., 142°03' в. д.) до м. Кузнецова — здесь количество дней со льдом варьирует от 5 до 10 сут.

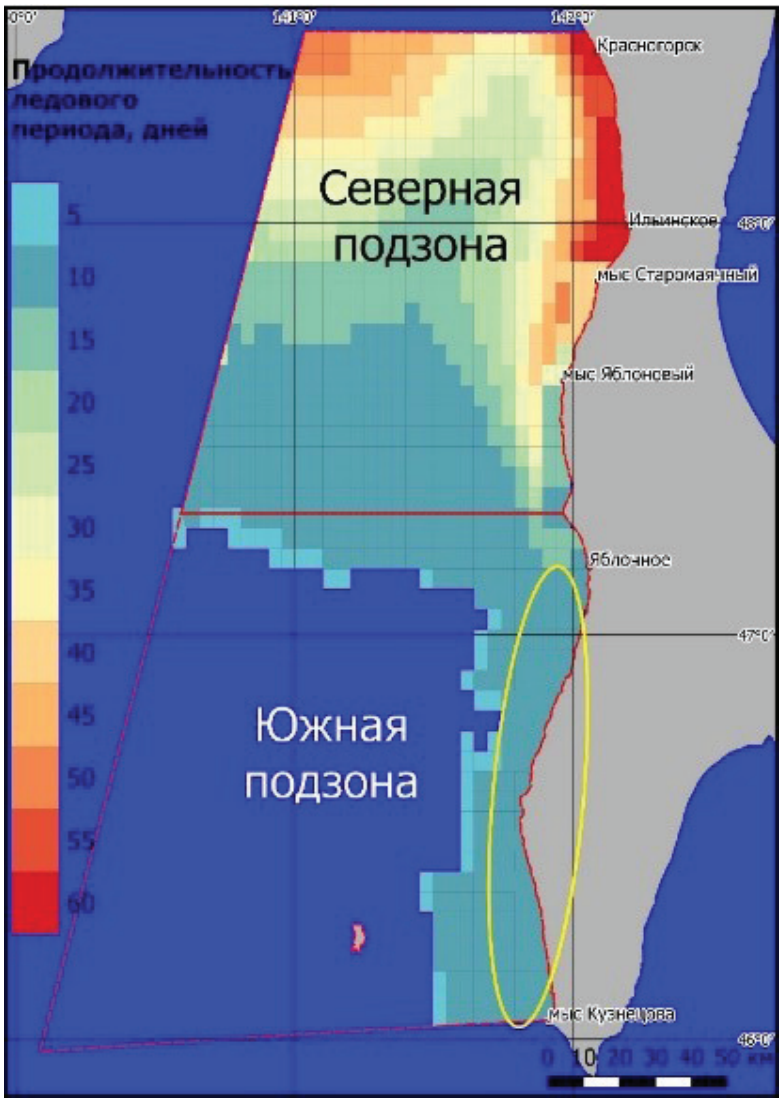


Рис. 7. Пространственное распределение продолжительности ледового периода (сутки) в юго-восточной части Татарского пролива за период 1991–2020 гг.
Fig. 7. Spatial distribution of the duration of the ice period (day) in the southeastern part of the Tatar Strait for the period 1991–2020

ВЫВОДЫ

На основе данных дистанционного зондирования Земли с использованием геоинформационных технологий выполнен анализ отдельных элементов ледового режима юго-восточной части Татарского пролива за период стандартной климатической нормы 1991–2020 гг. В результате исследований установлено, что: среднезимняя величина ледовитости в северной и южной подзонах, составляет 7 и 0,2 % соответственно; в северной подзоне наблюдается тенденция увеличения среднезимней ледовитости на 9 %, в южной подзоне наклон линейного тренда отсутствует.

Наиболее сложные ледовые условия в северной подзоне юго-восточной части Татарского пролива наблюдаются с 10 февраля по 5 марта — в этот период ледовитость акватории составляет в среднем 15–19 %; однако в отдельные годы максимальные значения ледовитости могут достигать 100 %. Южная подзона имеет более мягкие ледовые условия, что вызвано воздействием теплых вод ветви Цусимского течения. Максимальные значения

средней ледовитости наблюдается 28 февраля и составляет 1,3 %. В отдельные годы максимальная ледовитость может достигать 24 %.

Благоприятными участками для ведения марикультурного хозяйства является юго-западное побережье о. Сахалин от с. Яблочное до м. Кузнецова, где количество дней со льдом варьирует от 5 до 10 сут.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного задания «Углеродный баланс биоморфолитосистем побережья и прилегающих морских акваторий окраинных морей Дальнего Востока (FEFF-2022-0027)».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out within the framework of the state task “Carbon balance of biomorpholithosystems of the coast and adjacent marine areas of the marginal seas of the Far East (FEFF-2022-0027)”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Границы океанов и морей. СПб.: ГУНиО МО (Управление навигации и океанографии Министерства обороны), 2000. № 9031. С. 127–137.

Минервин И.Г., Пищальник В.М., Бобков А.О., Романюк В.А. Основные принципы работы программного комплекса «ЛЕД»: Девятый Всероссийский симпозиум «Физика геосфер». Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 556–561.

Пищальник В.М., Дорофеева Д.В., Минервин И.Г. Межгодовая динамика аномалий ледовитости Татарского пролива с 1882 по 2018 г. Известия ТИНРО, 2019. Т. 196. С. 114–122.

Плотников В.В. Сезонная и межгодовая изменчивость ледовитости дальневосточных морей. Труды ДВНИГМИ, 1990. Вып. 40. С. 65–75.

Плотников В.В. Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей России и их прогноз. Владивосток: Федеральное государственное унитарное предприятие, 2002. 167 с.

Плотников В.В., Мезенцева Л.И., Дубина В.А. Циркуляция атмосферы над Дальним Востоком и ее отражение в ледовых процессах. Владивосток: Тихоокеанский океанологический ин-т им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН, 2015. 159 с.

Плотников В.В., Четырбоцкий А.Н., Гордейчук Т.В. Оценка состояния ледяного покрова Японского моря. Метеорология и гидрология, 2010. № 3. С. 46–55.

Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм. Женева: ВМО, 2017. № 1203. 32 с.

Шатилина Т.А., Цициашвили Г.Ш., Радченкова Т.В. Опыт использования метода интервального распознавания для прогноза экстремальной ледовитости Татарского пролива (Японское море). Метеорология и гидрология, 2006. № 10. С. 65–73.

Якунин Л.П. Атлас основных параметров ледяного покрова Охотского моря. Владивосток: ДВФУ, 2012. 118 с.

REFERENCES

Minervin I.G., Pishchal’nik V.M., Bobkov A.O., Romanyuk V.A. Basic principles of operation of the “ICE” software package. Ninth All-Russian Symposium “Physics of Geospheres”. Vladivostok: Dalnauka, 2015. P. 556–561 (in Russian).

Pishchal'nik V.M., Dorofeeva D.V., Minervin I.G. Interannual dynamics of anomalies in the arctic of the Tatar Strait from 1882 to 2018. Izvestiya TINRO, 2019. V. 196. P. 114–122.

Plotnikov V.V. Seasonal and interannual variability of the ice cover of the Far Eastern seas. Proceedings of the FERHRI, 1990. Iss. 40. P. 65–75 (in Russian).

Plotnikov V.V. Variability of ice conditions of the Far Eastern seas of Russia and their forecast. Vladivostok: Federal State Unitary Enterprise, 2002. 167 p. (in Russian).

Plotnikov V.V., Chetyrbotsky A.N., Gordeychuk T.V. Assessment of the state of the ice cover of the Sea of Japan. Russian Meteorology and Hydrology, 2010. No. 3. P. 46–55 (in Russian).

Plotnikov V.V., Mezentseva L.I., Dubina V.A. Atmospheric circulation over the Far East and its reflection in ice processes. Vladivostok: V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, 2015. 159 p. (in Russian).

Shatilina T.A., Tsitsiashvili G.Sh., Radchenkova T.V. Experience of using the interval recognition method for predicting the extreme iciness of the Tatar Strait (Sea of Japan). Russian Meteorology and Hydrology, 2006. No. 10. P. 65–73 (in Russian).

The boundaries of oceans and seas. St. Petersburg: UNO MD (Department of Navigation and Oceanography of the Ministry of Defense), 2000. No. 9031. P. 127–137 (in Russian).

WMO guidelines for the calculation of climate standards. Geneva: WMO, 2017. No. 1203. 32 p.

Yakunin L.P. Atlas of the main parameters of the ice cover of the Sea of Okhotsk. Vladivostok: FEFU, 2012. 118 p. (in Russian).

УДК: 551.467 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-657-667**

И.В. Шумилов[1], **В.А. Романюк**[2], **Д.В. Зарубина**[3], **В.М. Пищальник**[4], **И.В. Никулина**[5]

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КАРТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ВСТРЕЧИ С МОРСКИМ ЛЬДОМ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЕЙ

АННОТАЦИЯ

В работе представлено описание разработанного программного модуля для построения карт распределения вероятности встречи с морским льдом. Модуль позволяет производить обработку коллекций файлов растровых карт, составляемых по спутниковым данным, и получать на их основе векторные карты распределения вероятности встречи с морским льдом. В качестве исходных данных могут использоваться карты Japan Meteorological Agency (JMA), предоставляемые в формате растра без географической привязки, и карты National Snow and Ice Data Center (NSIDC) в формате GeoTIFF с географической привязкой. В модуле реализован алгоритм, позволяющий вычислять вероятность появления льда заданного интервала сплоченности в каждой точке (пикселе) растровой карты, и затем на основе полученного массива вероятностей строить полигональные векторные карты в SHP-формате. Алгоритм построения полигональных объектов заключается в последовательном переборе всех горизонтальных смежных пар элементов массива вероятностей с последующим определением границ полигона. Обнаружение первых точек границы полигона позволяет перейти к цикличному поиску смежных точек, подходящих под условие наличия границы, и составлению полного списка точек замкнутого полигона. Аналогично происходит поиск всех остальных полигонов в пределах заданной цветовой маской акватории. На последнем этапе производится преобразование списков декартовых координат точек в географические координаты. На их основе формируются полигональные объекты в формате SHP-файла. Полигональные объекты определяют области значений вероятности встречи со льдом, принадлежащие одному интервалу, и включают числовые атрибуты со значениями границ интервалов вероятности. Сформированные векторные карты позволяют производить дальнейший

[1] ФГБОУ ВО Сахалинский государственный университет, ул. Ленина, д. 290, Южно-Сахалинск, Россия, 693000,
e-mail: **ilyarolevik1@yandex.ru**

[2] ФГБОУ ВО Сахалинский государственный университет, ул. Ленина, д. 290, Южно-Сахалинск, Россия, 693000,
e-mail: **varomanyuk2020@gmail.com**

[3] ФГБОУ ВО Сахалинский государственный университет, ул. Ленина, д. 290, Южно-Сахалинск, Россия, 693000,
e-mail: **dariadorofeyeva26@gmail.com**

[4] ФГБОУ ВО Сахалинский государственный университет, ул. Ленина, д. 290, Южно-Сахалинск, Россия, 693000,
e-mail: **vpishchalnik@rambler.ru**
ФГБУН Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, ул. Науки, д. 1Б, Южно-Сахалинск, Россия, 693000,
e-mail: **vpishchalnik@rambler.ru**

[5] ФГБОУ ВО Сахалинский государственный университет, ул. Ленина, д. 290, Южно-Сахалинск, Россия, 693000,
e-mail: **irinkaeremenko@yandex.ru**

анализ данных в ГИС-приложениях. Разработанный программный модуль был применен для построения карт распределения вероятности встречи со льдом в акваториях дальневосточных морей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: карты вероятности встречи со льдом, ледяной покров, дальневосточные моря, дистанционное зондирование Земли, Python

Ilya V. Shumilov[1], **Valery A. Romanyuk**[2], **Darya V. Zarubina**[3],
Vladimir M. Pishchal'nik[4], **Irina V. Nikulina**[5]

DEVELOPMENT OF THE PROGRAMM MODULE FOR MAPPING THE PROBABILITY DISTRIBUTION OF ENCOUNTER WITH SEA ICE FOR RESEARCH OF THE FAR EASTERN SEAS

ABSTRACT

The article presents a description of the developed software module for creating maps of the probability distribution of encountering sea ice. The module allows to process collections of raster map files based on satellite data and obtain vector maps of the probability distribution of encountering sea ice. Source data is Japan Meteorological Agency (JMA) maps provided in raster format without georeferencing, and National Snow and Ice Data Center (NSIDC) maps provided in GeoTIFF format with georeferencing. The module implements an algorithm that allows to calculate the probability of ice occurrence of a given concentration interval at each point (pixel) of a raster map, and then build polygonal vector maps in SHP-format based on the array of probabilities. The algorithm for constructing polygonal objects provides for a sequential enumeration of all horizontal adjacent pairs of elements of the array of probabilities, followed by determining the boundaries of the polygon. Detection of the first points of the polygon boundary allows to start a cyclic search for adjacent points that meet the boundary condition and creating a complete list of points of a closed polygon. Similarly, all other polygons are searched within the water area specified by the color mask. At the last stage, the lists of Cartesian coordinates of points are converted into geographical coordinates. Based on them, polygonal objects are formed in the SHP-file format. Polygon features define areas of probability of encountering ice that belong to the same interval, and include numeric attributes with values for the boundaries of the probability intervals. The generated vector maps allow further data analysis in GIS applications. The developed software was used to build maps of the probability distribution of encountering ice in the waters of the Far Eastern seas.

KEYWORDS: ice encounter probability maps, ice cover, Far Eastern seas, Earth remote sensing, Python

[1] Sakhalin state University, 290, Lenina str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russia, *e-mail:* **ilyarolevik1@yandex.ru**

[2] Sakhalin state University, 290, Lenina str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russia, *e-mail:* **varomanyuk2020@gmail.com**

[3] Sakhalin state University, 290, Lenina str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russia, *e-mail:* **dariadorofeyeva26@gmail.com**

[4] Sakhalin state University, 290, Lenina str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russia, *e-mail:* **vpishchalnik@rambler.ru**
Institute of Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, 1B, Nauki str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russia, *e-mail:* **vpishchalnik@rambler.ru**

[5] Sakhalin state University, 290, Lenina str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russia, *e-mail:* **irinkaeremenko@yandex.ru**

ВВЕДЕНИЕ

Технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют производить мониторинг и получать данные для составления карт сплоченности ледяного покрова [*Плотников* и др., 1998; *Якунин* и др., 1998; *Митник* и др., 2015; *Тихонов* и др., 2016]. Одной из задач анализа ледовых условий является определение границ зон различной вероятности встречи со льдом [*Крындин*, 1964; *Якунин*, 1995; 2012; *Плотников*, 1997], что имеет большое прикладное значение для обеспечения безопасности судоходства и морских работ для замерзающих морей.

Для проведения исследований в области ледового режима и оперативного мониторинга ледовой обстановки дальневосточных морей разработан пакет программного обеспечения для обработки данных ДЗЗ, полученных из различных источников, и представления их в виде ледовых карт. Программный модуль для построения карт распределения вероятности [*Венцтель*, 1969; *Гмурман*, 1972] встречи с морским льдом является одним из основных инструментов, позволяющих получать векторные картографические данные для их дальнейшего анализа и работы в современных геоинформационных системах (ГИС).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Построение карт распределения вероятностей встречи с морским льдом производится на основе коллекций карт-схем ледяного покрова, публикуемых в открытом доступе Японским метеорологическим агентством (Japan Meteorological Agency)[1] (JMA) (рис. 1), и GeoTIFF-карт из архива Национального центра данных по снегу и льду (National Snow and Ice Data Center)[2] (NSIDC) (рис. 2). Ледяной покров на примере карты-схемы акватории Охотского и Японского морей представляется в цветовой гамме градаций сплоченности по шкале Всемирной метеорологической организации (World Meteorological Organization)[3] (WMO, 2017) на фоне пространства чистой воды, выделенной синим цветом. GeoTIFF-файл NSIDC содержит один канал с данными о сплоченности ледяного покрова, наличие которого обозначается целочисленными значениями от 1 до 1000. В режиме визуализации GeoTIFF-карты NSIDC ледяной покров разной сплоченности представляется в собственной цветовой гамме от белого к синему на фоне пространства чистой воды, выделенной темно-синим цветом.

Для разработки программного модуля построения карт распределения вероятности встречи с морским льдом использовался язык программирования Python 3.9[4]. В процессе разработки также были использованы библиотеки GDAL[5], GeoPandas[6], Shapely[7] (для

---

1 Официальный сайт Японского метеорологического агентства (Japan Meteorological Agency). Электронный ресурс: https://www.jma.go.jp/ (дата обращения 30.01.2023).

2 Официальный сайт Национального центра данных по снегу и льду (National Snow and Ice Data Center). Электронный ресурс: https://nsidc.org/ (дата обращения 30.01.2023).

3 Номенклатура ВМО по морскому льду/WMO/OMM/BMO — № 259. Издание 1970–2019. Электронный ресурс: http://old.aari.ru/resources/nomen/wmo_259.php?lang0=2 (дата обращения 30.01.2023).

4 Официальный сайт языка программирования Python. Электронный ресурс: https://www.python.org/ (дата обращения 30.01.2023).

5 Официальный сайт библиотеки GDAL. Электронный ресурс: https://gdal.org/ (дата обращения 30.01.2023).

6 Официальный сайт библиотеки GeoPandas. Электронный ресурс: https://geopandas.org/ (дата обращения 30.01.2023).

7 Сайт с официальной документацией библиотеки Shapely. Электронный ресурс: https://shapely.readthedocs.io/ (дата обращения 30.01.2023).

обработки геоданных), Pillow[1] (для обработки растровых данных), NumPy[2] (для обработки числовых массивов), PyQt5[3] (для разработки интерфейса программы).

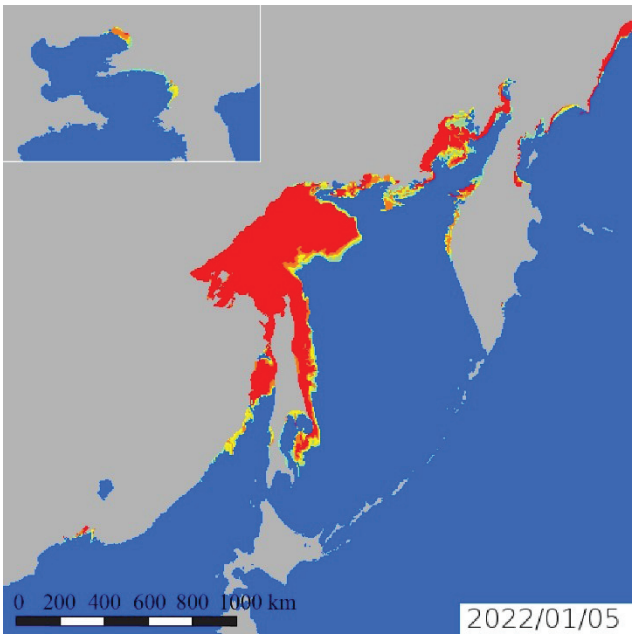


Рис. 1. Пример карты-схемы JMA на 5 января 2022 г.
Fig. 1. An example of JMA map-scheme on January 5, 2022

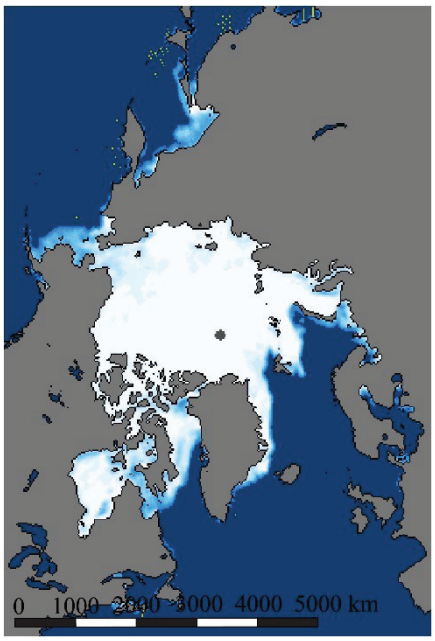


Рис. 2. Пример карты NSIDC на 5 января 2022 г.
Fig. 2. An example of NSIDC map on January 5, 2022

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для формирования карты распределения вероятности встречи со льдом предварительно задается количество градаций вероятности и диапазон вероятностей [p_{min}, p_{max}] (где p_{min}, p_{max} — минимальное и максимальное значения вероятности соответственно), на основе которых определяются интервалы значений вероятности, заданных неравенствами вида (1):

$$p_k < p \leq p_{k+1} \quad (1),$$

где p — вероятность,
p_k, p_{k+1} — нижняя и верхняя границы интервала вероятности,
k — порядковый номер интервала вероятности.

Опционально границы интервала [p_{min}, p_{max}] могут входить в него или исключаться из значений, а для нулевой вероятности (при p = 0) может быть задан отдельный интервал [0, 0]. Задается интервал значений сплоченности ледяного покрова [c_{min}, c_{max}] (где

[1] Сайт с официальной документацией библиотеки Pillow. Электронный ресурс: https://pillow.readthedocs.io/ (дата обращения 30.01.2023).
[2] Официальный сайт библиотеки NumPy. Электронный ресурс: https://numpy.org/ (дата обращения 30.01.2023).
[3] Официальный сайт разработчиков библиотеки PyQt5. Электронный ресурс: https://riverbankcomputing. com/ (дата обращения 30.01.2023).

c_{min}, c_{max} — минимальное и максимальное значения сплоченности ледяного покрова по шкале WMO[1] (2017) для их учета при построении карт вероятности встречи со льдом.

На следующем этапе обработки считывается двухцветный черно-белый файл растровой маски, определяющей границы исследуемой акватории, размерностью n на m, где n — ширина растра в пикселях, m — высота растра. Белый цвет маски соответствует исследуемой акватории, черный — незначимым пикселям, которые не должны обрабатываться. На основе двухцветного файла растровой маски, формируется двумерный массив A класса ndarray (библиотека NumPy) аналогичной размерности. Элементы массива принимают значение 0, в случае если пиксель соответствует исследуемой акватории, и −1, если пиксель является незначимым.

Далее происходит последовательная обработка файлов карт: пиксели каждой карты проверяются поочередно по строкам и столбцам, результат записывается в отдельный массив совпадений B_q (q — номер карты) размерностью n на m. В случае, если пиксель b_{qij} (i, j — координата пикселя по высоте и ширине растра соответственно) принадлежит морскому льду со сплоченностью из интервала [c_{min}, c_{max}] и соответствует пикселю исследуемой акватории на растровой маске, то соответствующий элемент b_{qij} (i — номер строки элемента, j — номер столбца) массива B_q принимает значение 1. В случае обработки карт JMA определение принадлежности пикселя происходит на основе его значения цветовой модели RGB с помощью библиотеки Pillow. В случае карт NSIDC, которые имеют формат привязанных GeoTIFF-растров, данные из файла предварительно считываются в объект класса DataSet (библиотеки GDAL) и преобразуются в массив C_q значений растра, каждый элемент которого соответствует пикселю карты. Массив заполнен целочисленными значениями, на основе которых происходит определение соответствия пикселя морскому льду со сплоченностью из заданного интервала [c_{min}, c_{max}].

На следующем этапе происходит вычисление двумерного массива вероятности встречи со льдом D с помощью универсальных функций библиотеки NumPy [*Вандер Плас*, 2018]. В ходе обработки карт-схем значения всех массивов B_q суммируются в цикле поэлементно, делятся на количество h файлов карт в коллекции и поэлементно складываются с двумерным массивом маски A (2):

$$d_{ij} = \frac{\sum_{q=1}^{h} b_{\mathrm{qij}}}{h} + a_{ij}, \qquad (2),$$

где d_{ij} — элемент массива вероятностей D,
b_{qij} — элемент массива совпадений B_q,
q — порядковый номер массива B_q,
a_{ij} — элемента массива маски A,
i — номер строки элемента,
j — номер столбца элемента,
h — количество карт в коллекции.

Приведенный далее алгоритм позволяет сформировать полигональный SHP-файл в соответствии со стандартами ESRI[2]: полигон — фигура, определяемая одним или несколькими контурами, где контур — это путь, который начинается и заканчивается в

[1] Номенклатура ВМО по морскому льду/WMO/OMM/BMO — № 259. Издание 1970–2019. Электронный ресурс: http://old.aari.ru/resources/nomen/wmo_259.php?lang0=2 (дата обращения 30.01.2023).

[2] Официальный сайт ESRI. Электронный ресурс: https://support.esri.com/en-us/gis-dictionary/polygon (дата обращения 30.01.2023).

одной и той же точке. Если полигон имеет более одного контура, контуры могут быть отделены друг от друга, содержаться один в другом, но не пересекаться.

Для вычисления точек границ полигонов происходит последовательный обход элементов массива D распределения вероятности по строкам. Для идентификации начальных точек границ полигона, содержащего значения вероятности, принадлежащие одному интервалу, в цикле производится поочередное сравнение значений смежных элементов массива в строках и столбцах. В процессе перебора выделяются пары элементов, подходящие под условие наличия границы полигона — значение первого элемента не входит в интервал вероятности $[p_k, p_{k+1}]$, а значение второго, соответственно, входит. Таким образом происходит вычисление декартовых координат двух начальных точек, соответствующих угловым точкам пикселей растра, внешних полигонов.

В случае, если граница установлена, применяется модифицированный алгоритм обхода элементов массива [*Шумилов* и др., 2018] для получения последовательного списка декартовых координат всех точек полигона, содержащего элементы, принадлежащие одному интервалу значений вероятности $[p_k, p_{k+1}]$: последовательно производится перебор смежных элементов в соответствии с вариантом расположения пары элементов — в одной строке (A, B, C, D) или в одном столбце (E, F, G, H), элемента d_{ij}, принадлежащего диапазону вероятности — слева (A, C), справа (B, D), сверху (E, G) или снизу (F, H), а также области поиска границы — вверху (A, B) или внизу (C, D), справа (E, F) или слева (G, H) (рис. 3). Обход смежных элементов массива производится по или против часовой стрелки в зависимости от перечисленных условий. Операции поиска производятся циклично до момента нахождения всех точек замкнутого полигона (возврата в начальную точку). Все комбинации смежных элементов массива, подошедшие под условие наличия границы полигона, исключаются из всех дальнейших проверок. Аналогично производится формирование списков координат остальных внешних полигонов на всей исследуемой акватории для всех интервалов значений вероятности.

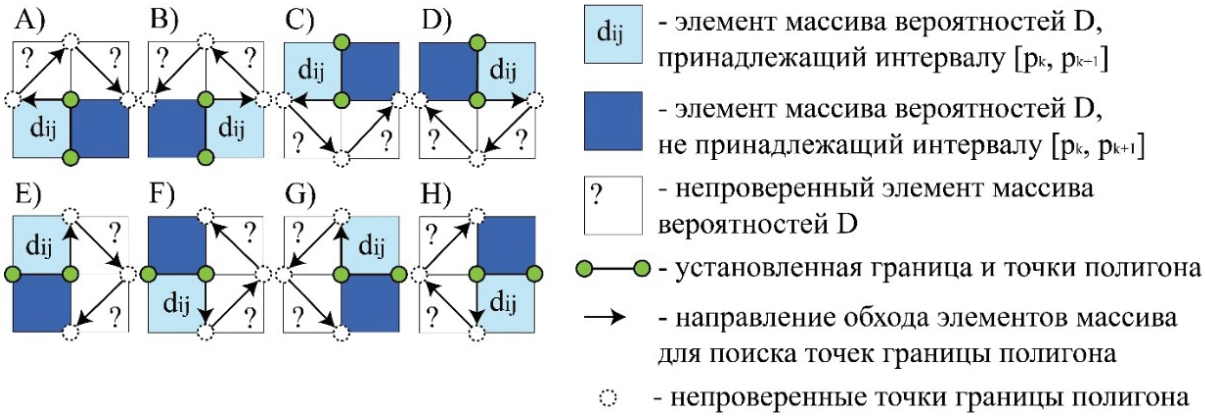


Рис. 3. Схема обхода элементов массива вероятности встречи со льдом для получения списка координат полигона, содержащего значения вероятности, принадлежащие одному интервалу
Fig. 3. Scheme of bypassing the elements of the ice encounter probability array to obtain a list of polygon coordinates containing probability values of the same interval

Описанный процесс обработки массива D повторяется для формирования списков координат внутренних полигонов. При этом на этапе перебора элементов массива, в цикле по строкам выделяются пары элементов, подходящие под условие наличия границы

внутреннего полигона — значение первого элемента входит в интервал вероятности (p_k, p_{k+1}), а второго, соответственно, не входит.

На следующем этапе происходит преобразование списков декартовых координат внешних и внутренних полигонов в географические. Для карт JMA применяются формулы последовательного перевода из декартовых в полярные координаты, затем в географические в универсальной полярной стереографической проекции (UPS) [*Вахрамеева* и др., 1986] с учетом смещения центра полярной координатной сетки и ее расширения в направлении с севера на юг.

В случае GeoTIFF-карт из файла предварительно считываются метаданные в виде списка значений, содержащего географические координаты пикселя левого нижнего угла растра и значения высоты и ширины растра в градусах.

Это позволяет установить однозначное соответствие между декартовыми и географическими координатами в полярной стереографической проекции NSIDC[1] с помощью формул (3, 4):

$$lat = y * y_s + y_{min}, \quad (3),$$
$$lon = x * x_s + x_{min}, \quad (4),$$

где lat и lon — географические координаты широты и долготы,
x и y — декартовы координаты,
x_s и y_s — значения ширины и высоты растра в градусах,
x_{min} и y_{min} — географические координаты пикселя левого нижнего угла растра.

На последнем этапе из полученных списков координат формируются полигональные объекты класса geometry.Polygon (библиотеки Shapely). При этом внешние полигоны с наименьшей площадью и содержащиеся в их границах внутренние полигоны формируют один и тот же объект геометрии. Все полученные объекты геометрии помещаются в поле «geometry» отдельных записей объекта класса GeoDataFrame (библиотеки GeoPandas). В дополнительные числовые поля для каждого объекта геометрии заносятся значения границ соответствующего интервала вероятности. На основе GeoDataFrame формируется результирующий SHP-файл, совместимый с ГИС, а в атрибуты его записей включаются значения границ соответствующих интервалов вероятности. SHP-файл приводится к заданной в настройках программы проекции.

Предложенный программный модуль позволяет строить карты как для крупных регионов, так и для локальных акваторий. На рис. 4 представлена построенная по данным NSIDC карта распределения вероятности встречи со льдом в акваториях Охотского, Японского и Берингова морей на наиболее вероятную дату наступления сезонного максимума ледовитости [*Шумилов* и др., 2019].

Для построения карт распределения вероятностей использовались предварительно отобранные коллекции растров одной и той же даты, но разных сезонов за период 1991–2020 гг. Цветовая классификация полигонов по значению числового атрибута для визуализации зон, соответствующих различным интервалам вероятности, производилась с помощью свободной кроссплатформенной геоинформационной системы QGIS[2].

---

[1] Официальный сайт NSIDC, описание полярной стереографической проекции NSIDC. Электронный ресурс: https://nsidc.org/data/user-resources/help-center/guide-nsidcs-polar-stereographic-projection (дата обращения 30.01.2023).

[2] Официальный сайт геоинформационной системы QGIS. Электронный ресурс: https://www.qgis.org/ (дата обращения 30.01.2023).

Карты распределения вероятности встречи со льдом могут быть использованы как в практической деятельности при осуществлении судоходства в зимнее время, так и при разработке методик прогноза ледовых условий. Применение подобного справочного материала производится для оценки рисков и материальных затрат при построении маршрутов ледового плавания.

Так, на примере Татарского пролива выполнен анализ карт среднемноголетней вероятности встречи со льдом, построенным по данным JMA. Установлено, что наиболее сложные условия ледового плавания характерны для периода максимального развития ледяного покрова (15 февраля) (рис. 5) [*Зарубина* и др., 2022].

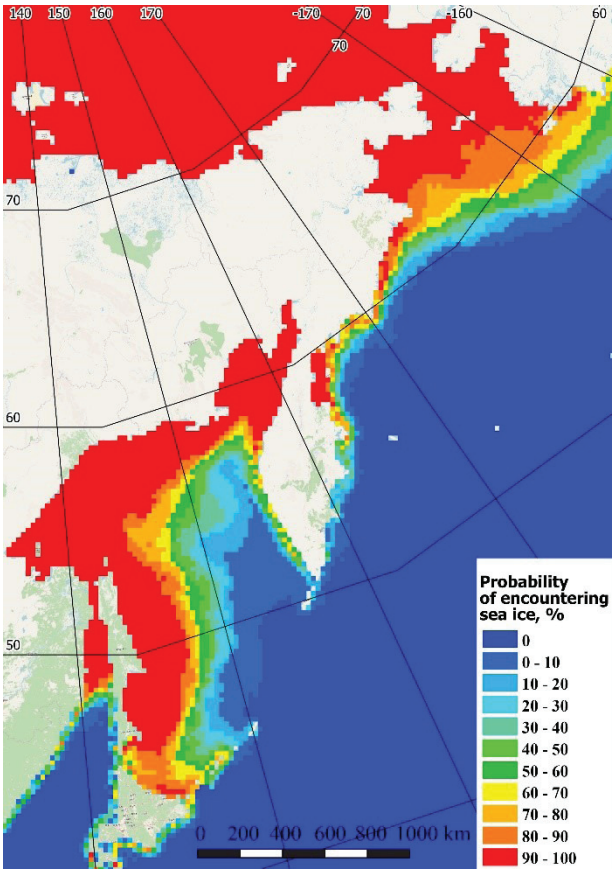


Рис. 4. Среднемноголетние вероятности встречи с морским льдом в дальневосточных морях на 5 марта в период 1991–2020 гг.
Fig. 4. Long-term average probabilities of encountering sea ice in the Far Eastern seas on March 5 in the period 1991–2020

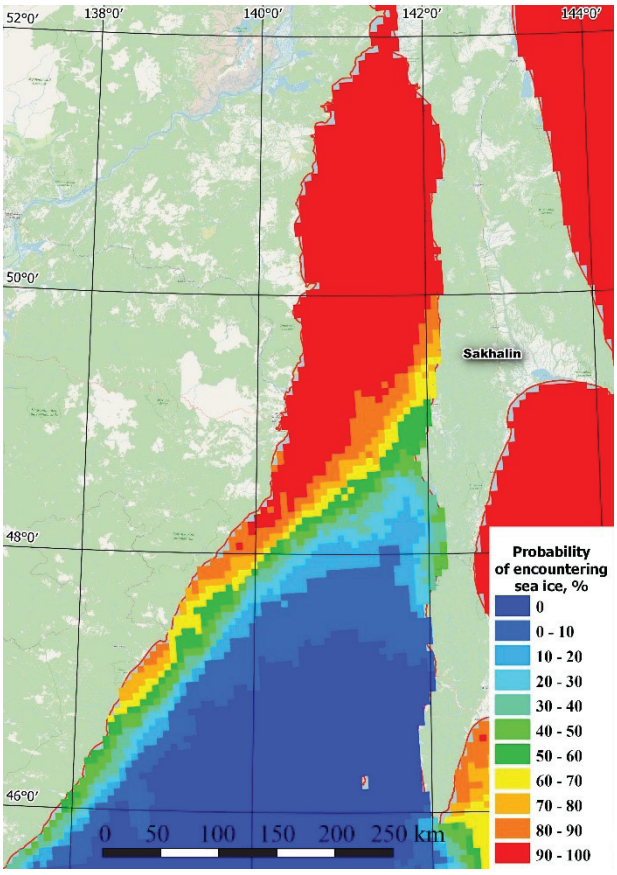


Рис. 5. Среднемноголетние вероятности встречи с морским льдом в Татарском проливе на 15 февраля в период 1991–2020 гг.
Fig. 5. Average long-term probabilities of encountering sea ice in the Tatar Strait on February 15 in the period 1991–2020

Вероятность существования в феврале зон чистой воды минимальна. По мере продвижения на юг, вероятность встречи со льдом снижается. Вдоль материкового побережья отмечается более южное распространение зон высокой вероятности встречи со льдом (> 50 %) и наиболее сложные ледовые условия (сплоченность 9–10 баллов, торосистость два балла, толщина льда до 40 см), что обусловлено поступающими теплыми

водами северной ветви Цусимского течения в восточный сектор пролива. Учитывая потерю скорости движения судов в более сложных ледовых условиях, данное обстоятельство может стать решающим при выборе маршрута. Зоны, соответствующие наименьшей вероятности встречи со льдом (0–20 %) распространяются в восточной части пролива уже начиная с 48°30' с. ш. Комплекты вероятностных карт, построенные по данным карт (схем) ледяного покрова для каждого зимнего месяца, могут использоваться в качестве справочного материала специалистами, осуществляющими прокладку рекомендованных маршрутов плавания судов во льдах.

ВЫВОДЫ

Разработан электронный инструмент в виде программного модуля построения карт вероятности встречи с морским льдом на основе коллекций данных ДЗЗ. Программный модуль может применяться для режимных исследований ледяного покрова в произвольных районах дальневосточных морей, в частности Берингова, Охотского и Японского, а также для оперативного мониторинга, что имеет важное значение при обеспечении безопасности судоходства и проведении морских работ на шельфе.

Примененный в программном модуле алгоритм построения полигональных объектов может быть использован для векторизации любых данных растрового формата или двумерных массивов значений. Формируемые в результате полигональные векторные файлы содержат геометрию, соответствующую стандартам ESRI, и имеют формат, совместимый с современными ГИС-приложениями.

На примере акватории Татарского пролива выполнен анализ карт среднемноголетней вероятности встречи с морским льдом в период максимального развития ледяного покрова (февраль). Вдоль материкового побережья выявлены зоны с наибольшей вероятностью встречи со льдом — более 50 %, в восточной части пролива отмечены зоны, соответствующие наименьшей вероятности — до 20 %.

Инструмент в составе пакета программного обеспечения для обработки данных ДЗЗ из различных источников планируется использовать для создания электронного атласа дальневосточных морей. Решение данной задачи позволит выявить особенности пространственно-временной изменчивости ледового режима дальневосточных морей с использованием данных ДЗЗ и обобщить полученные результаты в виде информационно-аналитического ГИС-атласа.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование было выполнено в рамках государственного задания «Углеродный баланс биоморфолитосистем побережья и прилегающих морских акваторий окраинных морей Дальнего Востока (FEFF-2022-0027)» и при поддержке гранта Правительства Сахалинской области молодым ученым.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the state assignment “Carbon balance of biomorpholithosystems of the coast and adjacent marine areas of the marginal seas of the Far East (FEFF-2022-0027)” and with the support of a grant from the Government of the Sakhalin Region to young scientists.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вандер Плас Дж. Python для сложных задач: наука о данных и машинное обучение. Серия: «Бестселлеры O’Reilly». СПб.: Питер, 2018. 576 с.

Вахрамеева Л.А., Бугаевский Л.М., Казакова З.Л. Математическая картография: Учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 286 с.

Венцтель Е.С. Теория вероятностей (4-е изд.). М.: Наука, 1969. 576 стр.

Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика (4-е изд.). М.: Высшая школа, 1972. 479 с.

Зарубина Д.В., Пищальник В.М., Романюк В.А. Оценка вероятности встречи со льдом в Татарском проливе на маршруте Де-Кастри — кромка. Морские интеллектуальные технологии, 2022. № 2. Ч. 1. С. 35–41. DOI: 10.37220/MIT.2022.56.2.004.

Крындин А.Н. Сезонные и межгодовые изменения ледовитости и положения кромки льда на дальневосточных морях в связи с особенностями атмосферной циркуляции. Труды ГОИН, 1964. Вып. 71. С. 5–80.

Митник Л.М., Трусенкова О.О., Лобанов В.Б. Дистанционное радиофизическое зондирование океана и атмосферы из космоса: достижения и перспективы (обзор). Вестник ДВО РАН, 2015. № 6. С. 21–22.

Плотников В.В. Аналого-статистическая модель прогноза положения кромки, сплоченности, возраста и форм льда на дальневосточных морях. Метеорология и гидрология, 1997. № 10. С. 59–68.

Плотников В.В., Якунин Л.П., Петров В.А. Ледовые условия и методы их прогнозирования. Проект «Моря». Гидрология и гидрохимия морей. Охотское море. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. Т. IX. Вып. 1. С. 291–340.

Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм. Женева: ВМО, 2017. № 1203. 32 с.

Тихонов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Репина И.А., Комарова Н.Ю. Спутниковая микроволновая радиометрия морского льда полярных регионов. Обзор. Исследование Земли из космоса, 2016. № 4. С. 65–84.

Шумилов И.В., Минервин И.Г., Пищальник В.М., Никонова Е.В., Терентьев Н.С. Разработка прогностического правила внутрисезонной динамики ледяного покрова: фаза развития. Физика геосфер: XI Всероссийский симпозиум, 9–14 сентября 2019, г. Владивосток, Россия. Владивосток: Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН), 2019. С. 214–219.

Шумилов И.В., Минервин И.Г., Пищальник В.М., Терентьев Н.С. Разработка программного модуля для вычисления кромок ледяного покрова по данным дистанционного зондирования Земли. Материалы Международной конференции ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2018. Т. 24. Ч. 2. С. 171–177. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-171-177.

Якунин Л.П. Атлас границ распространения и крупных форм льда дальневосточных морей России. Препринт. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 1995. 58 с.

Якунин Л.П. Атлас основных параметров ледяного покрова Японского моря. Владивосток: Издательский дом Дальневосточного Федерального университета, 2012. 84 с.

Якунин Л.П., Плотников В.В., Петров А.Г. Ледовые условия. Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей. Японское море. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. Т. VIII. Вып. 1. С. 347–394.

REFERENCES

Gmurman V.E. Probability theory and mathematical statistics (4th ed.). Moscow: Higher school, 1972. 479 p. (in Russian).

Kryndin A.N. Seasonal and interannual changes in ice extent and ice edge in the Far Eastern seas due to the peculiarities of atmospheric circulation. Proceedings of the State Oceanographic Institute, 1964. Iss. 71. P. 5–80 (in Russian).

Mitnik L.M., Trusenkova O.O., Lobanov V.B. Microwave remote sensing of ocean and atmosphere from space: achievements and prospects (review). Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, 2015. No. 6. P. 21–22 (in Russian).

Plotnikov V.V. Analog-statistical model for predicting the position of the ice edge, concentration, age and forms of ice in the Far Eastern seas. Russian Meteorology and Hydrology, 1997. No. 10. P. 59–68 (in Russian).

Plotnikov V.V., Yakunin L.P., Petrov V.A. Ice conditions and methods of their forecasting. Project "Seas". Hydrology and hydrochemistry of the seas. Sea of Okhotsk. Hydrometeorological conditions. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1998. V. IX. Iss. 1. P. 291–340 (in Russian).

Shumilov I.V., Minervin I.G., Pishchal'nik V.M., Nikonova E.V., Terentyev N.S. Development of a predictive rule for intra-seasonal ice cover dynamics: development phase. Physics of the Geospheres: XI All-Russian Symposium, September 9–14, 2019, Vladivostok, Russia. Vladivostok: V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute. Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (POI FEB RAN), 2019. P. 214–219 (in Russian).

Shumilov I.V., Minervin I.G., Pishchal'nik V.M., Terentyev N.S. Development of a software module for calculating ice cover edges based on Earth remote sensing data. Proceedings of the International Conference "InterCarto. InterGIS", 2018. V. 24. Part 2. P. 171–177 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-171-177.

Tikhonov V.V., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Repina I.A., Komarova N.Yu. Satellite microwave radiometry of sea ice in the polar regions. Review. Issledovanie Zemli iz kosmosa (Research of the Earth from space), 2016. No. 4. P. 65–84 (in Russian). DOI: 10.7868/S0205961416040072.

Vakhrameeva L.A., Bugaevsky L.M., Kazakova Z.L. Mathematical cartography: Textbook for universities. Moscow: Nedra, 1986. 286 p. (in Russian).

VanderPlas J. Python for complex tasks: Data science and machine learning. Series: "Bestsellers O'Reilly". St. Petersburg: Piter, 2018. 576 p. (in Russian).

Venztel E.S. Probability theory (4th ed.). Moscow: Nauka, 1969. 576 p. (in Russian).

WMO guidelines for the calculation of climate standards. Geneva: WMO, 2017. No. 1203. 32 p. (in Russian).

Yakunin L.P. Atlas of the boundaries of distribution and large forms of ice in the Far Eastern seas of Russia. Preprint. Vladivostok: POI FEB RAN, 1995. 58 p. (in Russian).

Yakunin L.P. Atlas of the main parameters of the ice cover of the Sea of Japan. Vladivostok: Publishing House of the Far Eastern Federal University, 2012. 84 p. (in Russian).

Yakunin L.P., Plotnikov V.V., Petrov A.G. Ice conditions. Project "Seas". Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Japanese Sea. Hydrometeorological conditions. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1998. V. VIII. Iss. 1. P. 347–394 (in Russian).

Zarubina D.V., Pishchal'nik V.M., Romanyuk V.A. Estimation of the probability of encountering ice in the Tatar Strait on the route De-Kastri — the edge. Marine intellectual technologies, 2022. No. 2. Part 1. P. 35–41 (in Russian). DOI: 10.37220/MIT.2022.56.2.004.

УДК: 574.9+598:599.742.712 **DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-668-681**

В.Н. Бочарников[1], **А.И. Труфанов**[2], **Л.Г. Емельянова**[3]

СЕТЕВОЙ ПОДХОД В ИЗУЧЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭКОЛОГИИ КРУПНЫХ ХИЩНИКОВ И КОПЫТНЫХ ЮГО-ВОСТОЧНОГО СИХОТЭ-АЛИНЯ (ПРИМОРСКИЙ КРАЙ)

АННОТАЦИЯ

Сетевой анализ зарекомендовал себя как эффективный инструмент для понимания закономерностей и прогнозирования последствий разрушения естественных экологических условий в исследовании сложных природных систем в локальном, региональном и глобальном масштабе. Теоретическое исследование с установлением пространственных схем распределения в зимний период амурского тигра и основных объектов его пищевого интереса — копытных выполнено на модельном участке горнолесной территории Юго-Восточного Сихотэ-Алиня (Приморский край). Здесь обитают уникальные по природоохранному значению виды, к числу которых относится амурский тигр (*Panthera tigris altaica*). Результаты исследования показывают взаимопроникновение мест человеческой деятельности и инфраструктуры в основные места обитания крупных животных в зимний период. Факторы, угрожающие существованию крупных хищников, можно условно разделить на три вида: антропогенные (связанные с присутствием человека и его хозяйственной деятельностью), техногенные (обусловленные внедренными технологическими системами, например — транспортной и топливно-энергетической инфраструктурой) и природные (стихийные бедствия, а также рельефные и ландшафтные условия, препятствующие существованию живых организмов дикой природы). В работе представлены: 1) сетевые модели и геоинформационное отображение зимнего распределения амурского тигра, представляющее собой результат использования порога близости как ключевого варьируемого параметра сетевой модели; 2) составленные карты распределения копытных путем пересчета общего числа зверей на их плотность населения в охотничьих угодьях; 3) подготовленные сетевые модели освоенного человеком пространства (дороги, населенные пункты) модельной территории и распределения охотничьих хозяйств. Исповедуемая синергия геоинформационного моделирования и сетевого анализа обеспечивается применением эффективного аналитического инструментария в исследованиях пространственной экологии животных.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пространственная экология, крупные хищники, угрозы популяции, геоинформационное моделирование, сетевой анализ

[1] Тихоокеанский институт географии, ул. Радио, д. 7, Владивосток, Россия, 690041,
e-mail: **vbocharnikov@mail.ru**

[2] Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, д. 83, Иркутск, Россия, 664074,
e-mail: **troufan@gmail.com**

[3] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991,
e-mail: **biosever@yandex.ru**

Vladimir N. Bocharnikov[1], **Andrey I. Trufanov**[2], **Lyudmila G. Emelyanova**[3]

NETWORK APPROACH TO STUDYING SPATIAL ECOLOGY OF APEX PREDATORDS AND UNGULATES OF SOUTHEASTERN SIKHOTE-ALIN RANGE (PRIMORSKY KRAI)

ABSTRACT

Network analysis has proven to be an effective tool for understanding patterns and predicting consequences in the study of complex systems on a local, regional and global scale. In the south of the Russian Far East exists one of the highest levels of biodiversity in Russia. This paper presents mainly theoretical study, its results includes maps and of spatial structure distribution schemes in the winter of the Amur tiger and the main objects of its food interest — ungulates. The research model area situated within the mountain-forest territory of Southeastern Sikhote-Alin Mountains (Primorsky Krai). This region is home to species of worldwide conservation significance, including the Amur tiger (*Panthera tigris altaica*). The results of the study show the interpenetration of places of human activity and infrastructure into the main habitats of large animals in winter. The factors threatening the existence of large predators can be divided into three types: anthropogenic (related to the presence of man and his economic activity); technogenic (caused by implemented technological systems, for example, transport and fuel and energy infrastructure); natural (natural disasters, as well as relief and landscape conditions that prevent the existence of living organisms of wildlife). The work presents: 1) network models and geoinformation mapping of the winter distribution of the Amur tiger, which is the result of using the proximity threshold as a key variable parameter of the network model; 2) maps of the distribution of ungulates have been compiled by recalculating the total number of animals by their population density in hunting grounds; 3) network models of the human-occupied space (roads, settlements) of the model territory have been prepared and distribution of hunting enterprises. The applied synergy of geoinformation modeling and network analysis provides effective analytical tools for research in the spatial ecology of animals.

KEYWORDS: spatial ecology, apex predators, population threats, geoinformation modeling, network analysis

ВВЕДЕНИЕ

Для изучения геосистем и схожих по сложности объектов В.Б. Сочава предложил и разработал подход, в котором «предметом… являются не столько компоненты природы сами по себе, сколько присущие им связи, посредством которых формируются соподчиненные друг другу целостности — геосистемы» [*Сочава*, 1978]. Изначально изучение систем, участниками которых являются природа, хозяйство и население, представлялось излишне сложной задачей, но в современных условиях развития методов моделирования анализ взаимосвязей между множеством различных компонентов вполне осуществим. Концепция сетевого подхода (в частности, в рамках теории графов) применительно к экологическим исследованиям фокусирует внимание на снижении

[1] Pacific Geographical Institute FEB RAS, 7, Radio str., Vladivostok, 690041, Russia,
e-mail: **vbocharnikov@mail.ru**

[2] Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontova str., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: **troufan@gmail.com**

[3] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia,
e-mail: **biosever@yandex.ru**

связности отдельных участков, что получило признание в ряде работ [*Carter* et al., 2014; *Besson* et al., 2019]. Доказательно утверждалось, что многие экологические реакции можно понять только с сетевой точки зрения [*Gawecka*, *Bascompte*, 2021].

Недавними исследованиями было подтверждено, что сопоставление сетевых топологических параметров с реально наблюдаемыми и фиксируемыми процессами и явлениями позволяет использовать объективные меры, метрики и индикаторы для оценки угрозы фрагментации и состояния устойчивости природных систем в целом [*Tiang* et al., 2021]. Сетевой подход также оказывается в сфере внимания исследователей, увязывающих восстановление среды обитания со сдерживанием сокращения биоразнообразия и восстановлением экосистемных услуг [*Fenu*, *Pau*, 2016]. При этом признано, что влияние угроз биоразнообразию в значительной мере обусловлено нарушением связности местообитаний, затрудняющим миграцию их обитателей между ресурсными участками [*Taylor* et al., 1993; *Gray* et al., 2014; *Maguire* et al., 2015; *Shi* et al., 2020]. Полагаем, что топологические параметры сети и их сопоставление между собой дают возможность выявить структурные особенности сети, в основе которых лежат явления, связывающие отдельные процессы, угрожающие существованию популяций крупных хищников. Следовательно, изучение топологии экологических систем, о чем заявляют эксперты [*Bergsten*, *Zetterberg*, 2013], дает представление об основополагающих законах и процессах, регулирующих формирование, поддержание и функционирование экосистем.

Целью данного исследования являлось рассмотрение существования крупных хищников в наблюдаемом социально-экономическом и природном окружении и представленном на исследуемой территории. Для достижения поставленной в работе цели рассматривалась как необходимая задача трансформации социально-экономических и природных сведений в сетевые структуры. Затем для каждого тематического набора полученных сетей проводился топологический анализ, результирующие сетевые метрики которых подвергались сравнению.

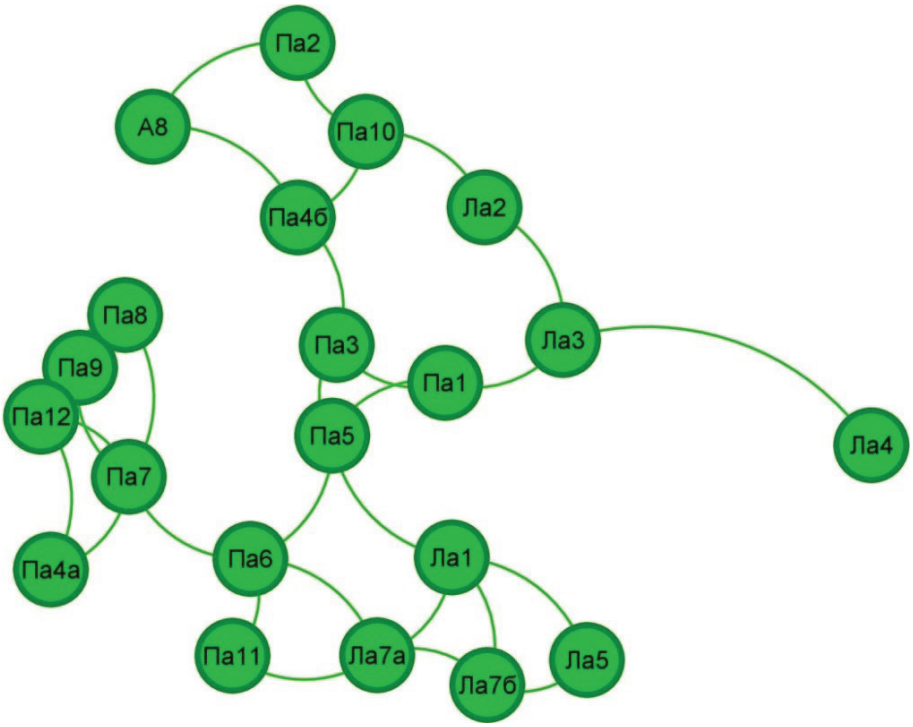


Рис. 1. Связность охотхозяйств (R_0=25 км)
Fig. 1. Connectivity of hunting farms (R_0 = 25 km)

Таким образом, перед авторами была поставлена и решена задача сравнения и оценки данных совершенно разной природы на заданной территории. Изучались популяции крупных хищников (в настоящей работе рассматривается амурский тигр), в первом приближении устанавливались их зависимости от состояния кормовой базы, которой являлись копытные — кабан, пятнистый олень, изюбрь. Структура модели расположения участков охотхозяйств при пороге связности $R_0 = 25$ км представлена на рисунке 1. Расположение охотничьих хозяйств и ООПТ в пределах модельного участка показано на рисунке 2.

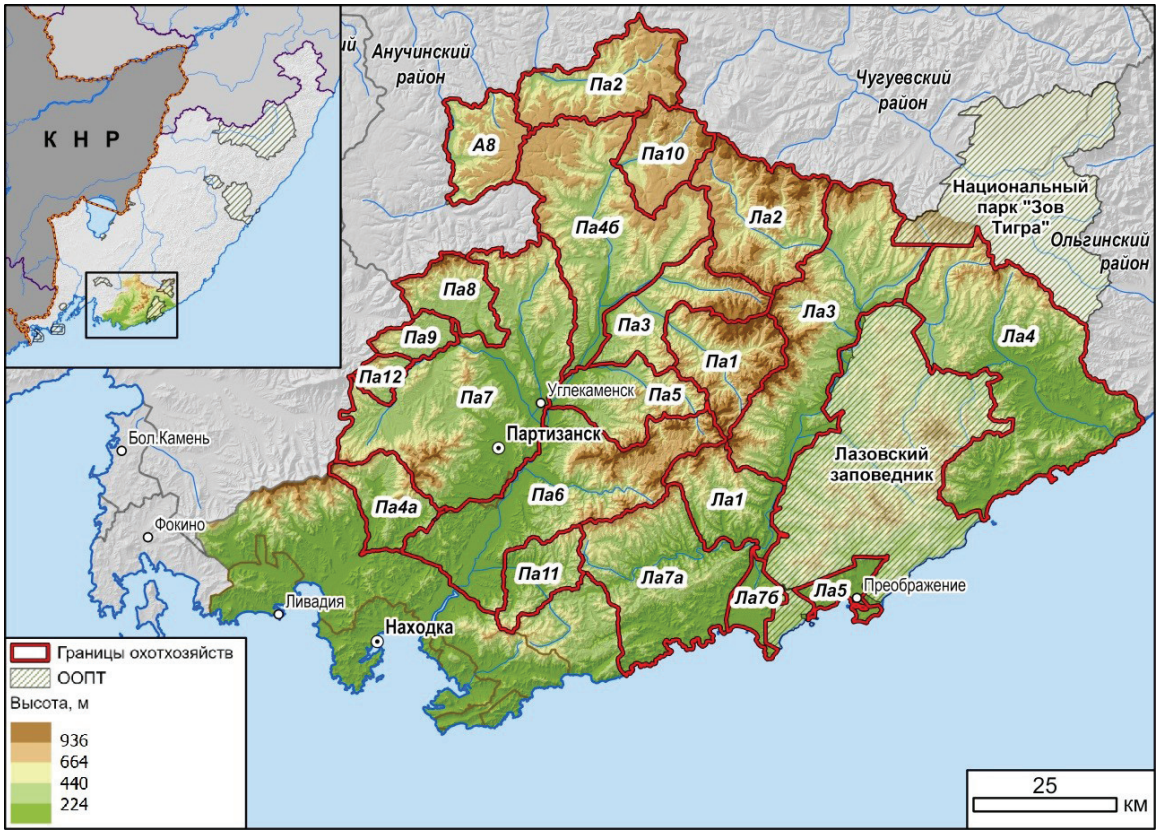


Рис. 2. Расположение охотничьих хозяйств и ООПТ в пределах модельного района на территории Приморского края
Fig. 2. Location the model area with hunting enterprises and federal protected areas within Primorsky Krai

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Принципиальной основой разработанных топологических моделей являются сетевые онтологии, которые имеют вид полного сетевого описания и содержат тезаурус, таксономию, семантическую сеть, правила. В представляемой здесь работе устанавливается связность выборки следов амурского тигра (крупного хищника, регулирующего численность копытных животных [изюбрь, косуля, кабан, пятнистый олень]) в охотничьих угодьях. Первичные материалы по численности тигра были получены[1] большим

[1] Общие работы по организации учета амурского тигра 2004–2005 гг. осуществлялся Управлением Росприроднадзора по Приморскому и краю и по Хабаровскому краям, Приморкрайохотуправлением, Хабаровскккрайохотуправление, Тихоокеанским институтом географии и Биолого-почвенным институтом ДВО РАН с финансовой поддержкой и участием Общества сохранение диких животных (WCS) и WWF России. Первичные данные учета были обработаны в лаборатории экологии и охраны животных ТИГ ДВО РАН под руководством д.б.н. Д.Г. Пикунова, оригиналы хранятся в архиве ТИГ ДВО РАН.

коллективом ученых, специалистов-охотоведов и охотников [*Пикунов* и др., 2010]. Авторами статьи на основе ограниченной выборки[1] для расчетов следов тигра в пределах модельной территории охотничьих хозяйств Партизанского и Лазовского административных районов Приморского края был подготовлен геоинформационный слой. На основании анализа координат зафиксированных следов амурского тигра подготовлены исходные данные для реализации сетевой структуры и разработана оригинальная сопровождающая сетевая онтология. В качестве основного инструмента для создания сетевых моделей использован бесплатный программный пакет с открытым исходным кодом Gephi[2].

По данным натурных исследований (несетеподобные исходные данные) на заданной территории формируется сеть, где узлом является отдельная координатная точка (x, y) фиксации следов тигра. Картографическая основа позволяет сформировать таблицы формата .csv с координатами отпечатков следов в качестве узлов. Связь устанавливается по близости узлов в евклидовом пространстве. Для создания сети используется характерный псевдокод генерации связей между узлами u и v с идентификаторами v.Id и u.Id и координатами (v.lx, vl.y) и (u.lx, ul.y) для значения порога близости R_0:

```
for u in g.nodes:
for v in g.nodes:
sqrt=((v.lx-u.lx)**2 + (v.ly-u.ly)**2)**(0.5)
if(sqrt<R0 and v.Id>u.Id):
g.addEdge(u, v)
```

Рабочая версия Gephi 0.10.1[3] со множеством плагинов и консолью для ввода команд на языке программирования Gython дает возможность организовать связи между узлами в соответствии со значениями порога пространственной близости узлов. В рамках пакета для анализа доступны сети с числом узлов до 100 000 и числом связей до 1 000 000. Расчеты выполнены с использованием параметра «разделения расстояния» между зафиксированными следами, а также путем определения рубежа или «порога преодоления» для выявления общих размеров участков обитания хищника. В этой модели узлами являлись точки с координатами центральных поселений в охотугодьях. Сетевой отпечаток отчетливо демонстрирует ключевые взаимосвязи и взаимовлияние охотхозяйств на модельной территории. Для сопоставления общего числа следов и численности хищников были взяты сведения, полученные для национального парка «Зов тигра» и Лазовского государственного заповедника [*Керли*, *Борисенко*, 2017; *Салькина*, *Поддубная*, 2019].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Использование порога близости как ключевого варьируемого параметра сетевой модели предполагает, что зафиксированные места присутствия тигра (координаты следов или снимки фотоловушек), представляемые узлами (вершинами), связываются ребрами в том случае, если расстояние между участками не затрудняет (т. е. не превышает пороговое

1 При подготовке выборки для расчетов с целью большей объективности была исключена тематическая атрибутивная информация, за исключением зафиксированных географических координат месторас-положения следов.

2 The Open Graph Viz Platform. Электронный ресурс: https://gephi.org/features/ (дата обращения: 01.02.2022).

3 Gephi 0.10.1. Электронный ресурс: https://github.com/gephi/gephi/releases/tag/v0.10.1 (дата обращения 01.02.2022).

значение R_0) миграцию обитателей этих участков. Подобным же образом была сконструирована сетевая модель расположения охотничьих хозяйств на обследуемой территории. Важной представляется интерпретация зависимостей сетевых метрик от порога связности. Так, детализация влияния значения порога на топологические метрики (диаметр сети и среднюю длину пути) позволяет выявить особые метрические параметры, которые скорее всего определяют как размеры территории обитания тигра, так и коридоры между участками. Отмеченные особые точки соответствуют значениям метрических расстояний 35 и 70 км (рис. 3).

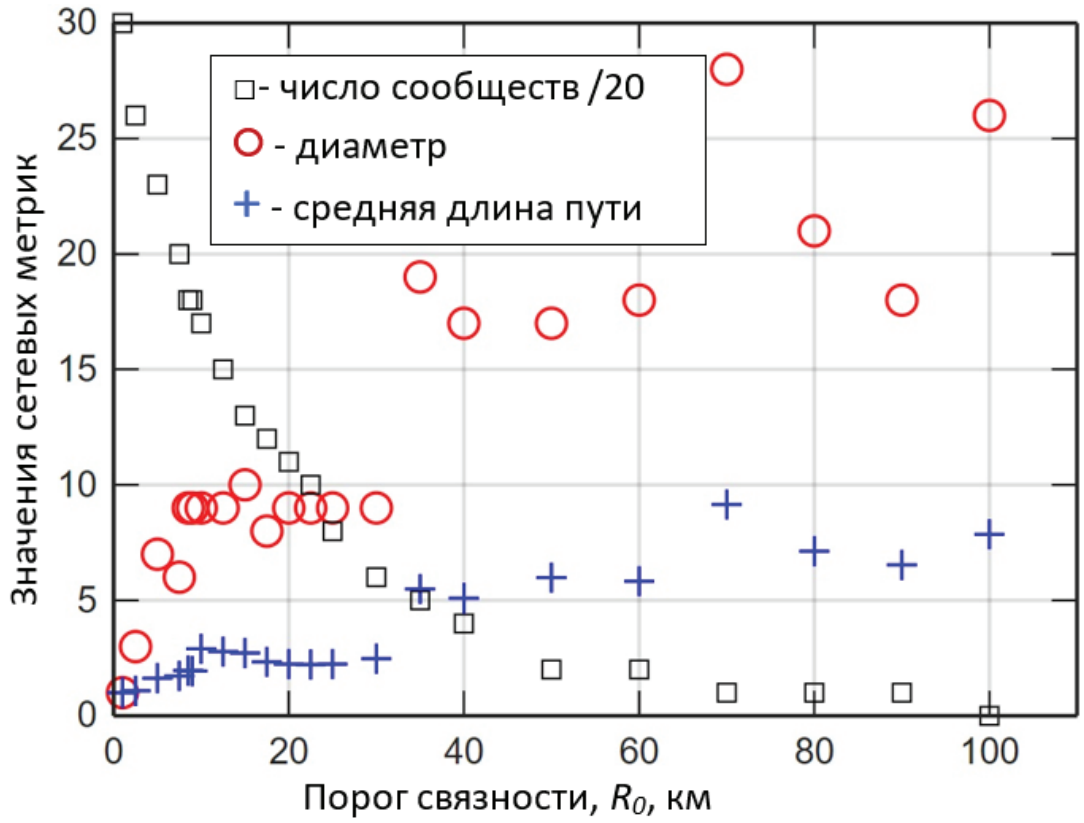


Рис. 3. Зависимость сетевых параметров от порогового значения R_0 для модельной территории
Fig. 3. Dependence of network parameters on the R_0 threshold value for model area

Варьирование (последовательный подбор порога R_0) дает возможность оценить пространственное распределение тигра, в т. ч. последующие размеры территории, занимаемые особями, перекрытие этих территорий, а также его численность. При задании порогового значения R_0 формируется уникальный экземпляр сетевой модели. При этом значения метрик соответствующего графа (например — средней длины пути, числа сообществ и др.) характеризуют связность и ландшафт, как места обитания тигра и могут отражать те или иные детали поведения хищника. Для выявления пространственных закономерностей распределения амурского тигра по территории были построены сети при десяти значениях порога близости R_0 рассматриваемой модели. Сюжетно важным элементом в исследованиях пространственной экологии животных является ключевой (keystone) вид, определяющий структурный характер определенной экосистемы; таковым для территории Юга Российского Дальнего Востока следует признать амурского тигра. В данном исследовании для отображения пространственных особенностей были взяты

точки фиксации следов тигров в охотхозяйствах Партизанского и Лазовского районов Приморского края, показанные в контексте основных типов охотничьих угодий (рис. 4).

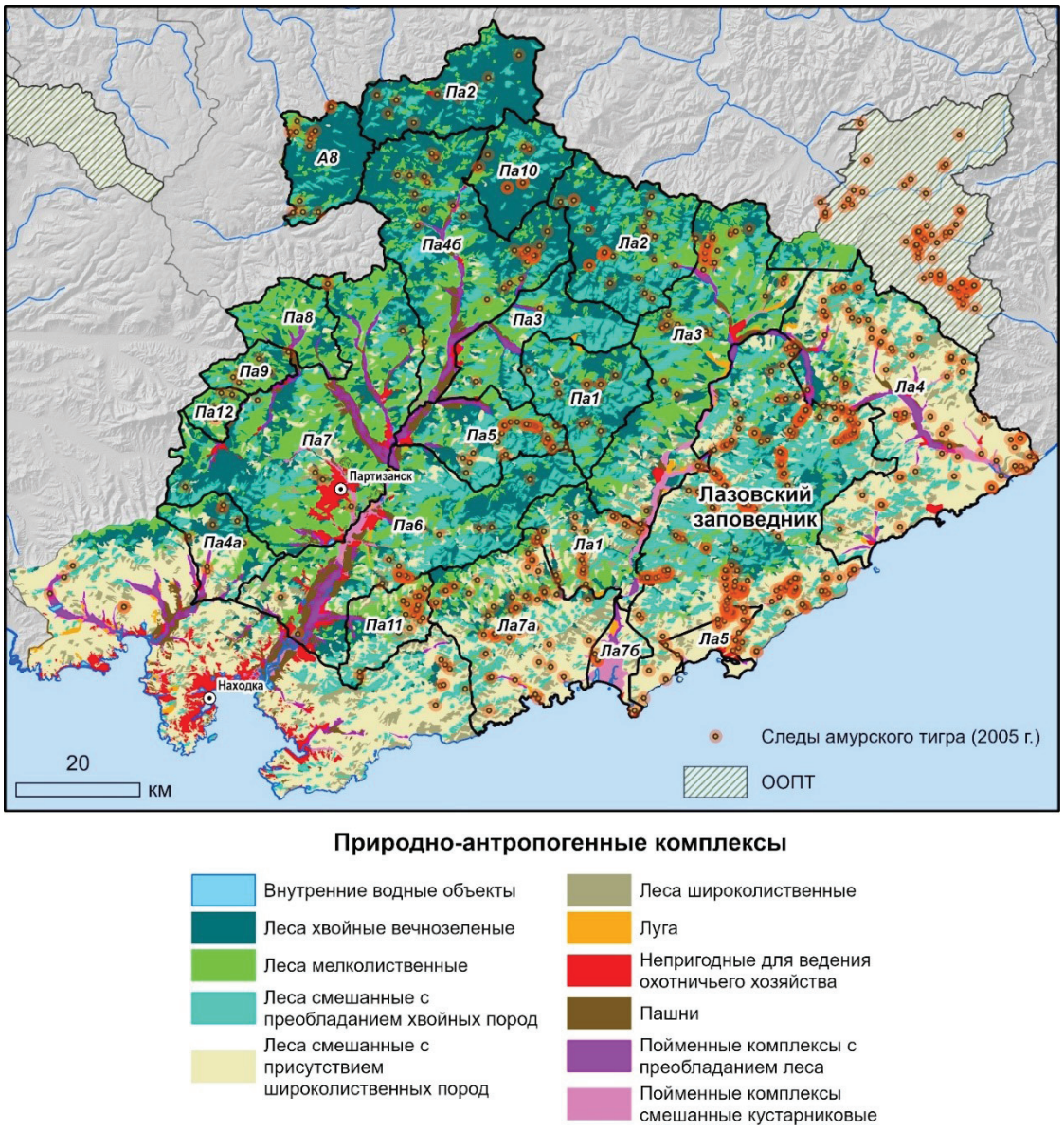


Рис. 4. Типы охотничьих угодий модельного района с показом точечной фиксации следов амурского тигра (выборка сделана на основе сведений единовременного учета тигра в 2004–2005 гг.)
Fig. 4. Types of hunting grounds of model area accompanied with demonstration of point fixation of Amur tiger traces (the sample is based on one-time recording of the tiger in 2004–2005)

При обращении к карте местообитаний амурского тигра можно отметить весьма существенное различие в фактически зафиксированных следах тигра в пределах групп типов охотничьих угодий, выделенных охотоведом П.В. Барановым. Из всего потенциального многообразия к настоящему времени проанализированы только пороговые значения отдельно при максимальных значениях отдельного топологического параметра — средней геодезической λ.

Второй локальный максимум λ свидетельствует о достижении порога, при котором происходит основное формирование сообществ (кластеров). В качестве оценки численности тигра принимается число кластеров за минусом отбракованных, тех, у которых число узлов составляет менее двух процентов от общего числа узлов в сети. Нижней границей являлось число связных компонентов сети при $R_0 = 100$ км (выше этого значения происходит формирование графа, практически представляющего один гигантский кластер). Сеть, демонстрирующая связность следов амурского тигра при пороговом значении $R_0 = 10$ км (с координатной привязкой к обследованной территории), представлена на рис. 5.

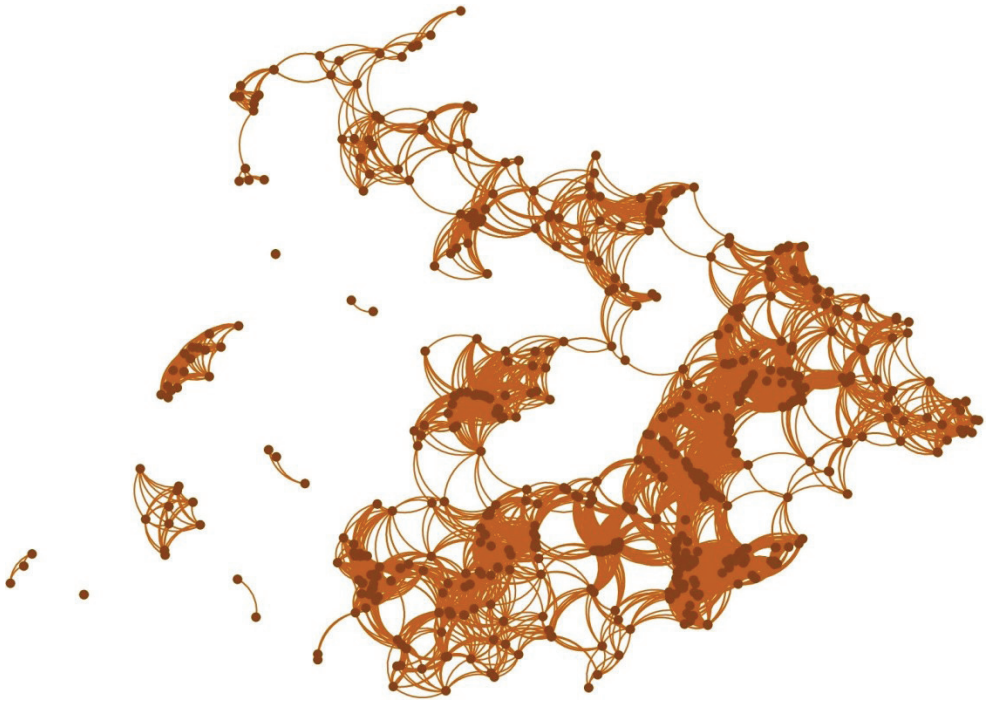


Рис. 5. Связность следов амурского тигра ($R_0 = 10$ км)
Fig. 5. Connectivity of Amur tiger traces ($R_0 = 10$ km)

На заповедной территории «Зов Тигра» по данным 2005 г. оцениваемая численность тигра — 6 (−2) = 4, и не ниже 3. В Лазовском заповеднике по данным 2005 г. оцениваемая численность тигра — 37 (−26) = 11, и не ниже 8. Исследования тигриных местообитаний [*Керли*, *Борисенко*, 2017; *Салькина*, *Поддубная*, 2019] были выполнены с использованием фотоловушек (в Лазовском заповеднике с 2008 по 2017 гг. и в НП «Зов тигра» с 2011 по 2017 гг.). Минимальная численность хищников во время зимних учетов разных лет составляла от 2 до 8 особей в НП «Зов тигра» и от 6 до 13 особей в Лазовском госзаповеднике. Предполагая, что за пятилетний срок не произошло резких изменений в популяции тигра, результаты наших расчетов для 2005 г. находятся в хорошем согласии с вышеприведенными данными.

Итак, на модельной территории по данным 2005 г. оцениваемая нами численность тигра — 32 (−12) = 20, но не ниже 18. Значения соответствующих порогов сетевизации дают оценки значения расстояний от центра участка обитания одного тигра до границ участка обитания его соседа — 10 км (Лазовский госзаповедник), 12.5 км (национальный парк «Зов тигра») и 35 км (модельная территория). Наши расчеты территории обитания в 314 км^2 и 491 км^2 также не противоречат заявляемым [*Керли*, *Борисенко*, 2017; *Салькина*, *Поддубная*, 2019] размерам потенциальных участков взрослой тигрицы в 200–400 км^2.

Важно, что это расстояние включает не только радиус кругового участка обитания хищника, но и ширину незаселенной зоны. В нашем примере вполне очевидно, что расстояние в 35 км, являются характерным масштабом для радиусов условных круговых участков мест обитания тигров (с включением зоны, где хищник не бывает), что не противоречит наблюдениям зоологов.

Для всеобъемлющего и междисциплинарного анализа угроз существованию крупных хищников (на примере амурского тигра) через фрагментацию мест его обитания предполагается перспективным сетевое описание стихийных бедствий и изменений ландшафта, заселенности территорий, хозяйственной деятельности и транспортного освоения и других факторов. Безусловно, необходимо дальнейшее сопоставление заявленных метрик связности, в т. ч. и дополнительных, с наблюдаемыми явлениями в мире тигров для установления непосредственной связи топологических характеристик и самих явлений. Напрашивается глубокое сопоставление сетевых, топологических параметров (в т. ч. комбинаций метрик) при разных порогах с реально наблюдаемыми и фиксируемыми процессами и явлениями, что способствовало бы выявлению (расшифровке) скрытых и к настоящему времени и не до конца понимаемых взаимосвязей (например, свидетельств об истощении кормовой базы, фрагментации ландшафта, отклике на иные угрожающие факторы).

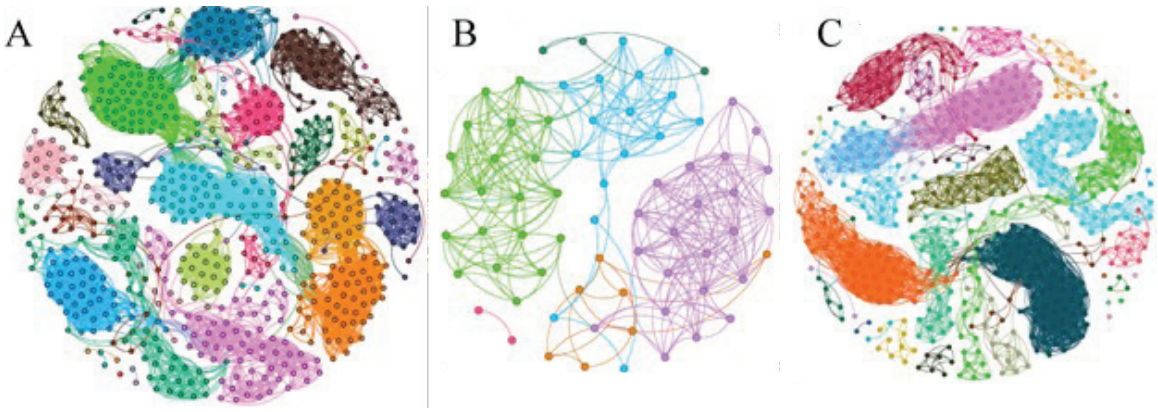


Рис. 6. Сообщества сетевой структуры модели, отвечающие пиковым значениям диаметра и средней геодезической для модельной (охотхозяйства Партизанского и Лазовского районов — A) и заповедных территорий (национальный парк «Зов тигра» — B и Лазовский заповедник — C). Узлы, принадлежащие разным сообществам, размечены разными цветами

Fig. 6. Model network structure communities corresponding to peak values of diameter and mean geodesic for model (hunting grounds of Partizansky and Lazovsky district — A) and protected areas (Zov Tigra "Call of the Tiger" National Park — B, Lazovsky Reserve — C). Nodes belon ging to different communities are marked with different colors

На рисунке 6 представлены сообщества сетевой структуры моделей, отвечающие пиковым значениям средней геодезической для модельной и заповедных территорий. Оценка территории обитания тигра в предположении, что в идеальном варианте она имеет форму круга и при отсутствии незаселенной зоны, в НП «Зов тигра» и Лазовском госзаповеднике составляет 314 км^2 и 491 км^2.

Для изучения проблемы в наибольшей степени подходит пространственная экология животных. Во многих работах демонстрируется относительная успешность анализа оценки связности в применении к проблеме устойчивости дикой природы [*Maguire* et al., 2015].

Предстает актуальной проблема выявления географического распределения охотничьих животных, являющихся объектом конкурентного интереса человека и крупных хищников. Она имеет полисистемный (междисциплинарный) формат, что подчеркивается многоплановостью задач по ее решению (как научно-технических, так и правовых, организационных), множественностью участников, наличием разного рода барьеров (ведомственных, территориальных и междисциплинарных). Несомненно, особую важность имеют сетевые измерители — метрики и индикаторы, свидетельствующие об угрожающем состоянии популяции тигров, но не менее важным для сопоставления являются карты плотности населения копытных животных — основных объектов питания тигра.

Для набора порогов в диапазоне 1–100 км в датасете узлов и связей проведены расчеты ключевых сетевых метрик модели: N — число узлов, M — число связей, λ — среднее кратчайшее расстояние (далее — среднее геодезическое), n_c — число сообществ (табл. 1).

Табл. 1. Метрики связности обитания амурского тигра на модельной и заповедных территориях по данным 2005 г.
Table 1. Metrics of amur tiger habitat connectedness in model and protected areas based on 2005 data

314, км	**Модельная территория**				**Зов тигра**				**Лазовский заповедник**			
	N	**M**	**λ**	**N_c**	**N**	**M**	**λ**	**N_c**	**N**	**M**	**λ**	**N_c**
1	664	74	1	607								
2.5	664	198	1.08	535								
5	664	331	1.633	465	70	64	1.547	22	536	771	2.858	188
7.5	664	545	1.728	400	70	103	1.689	23	536	1373	5.504	118
10	664	748	2.899	346	70	132	2.839	16	**536**	**1864**	**6.908**	**83**
12.5	664	926	2.778	315	**70**	**168**	**4.167**	**12**	536	2387	5.194	60
15	664	1116	2.72	278	70	201	3.398	11	536	2861	4.569	51
17.5	664	1355	2.332	245	70	243	2.879	8	536	3436	3.847	44
20	664	1557	2.237	229	70	272	3.005	8	536	3856	3.907	39
22.5	664	1770	2.225	205	70	304	2.679	8	**536**	**4337**	**5.104**	**37**
25	664	1974	2.235	179	**70**	**329**	**4.624**	**6**	536	4756	6.034	33
30	664	2396	2.478	130	70	403	3.622	7	536	5642	5.062	23
35	**664**	**2928**	**5.491**	**106**	70	465	3.078	6	536	6503	4.169	20
40	664	3452	5.097	88	70	518	2.768	5	536	7296	3.697	19
50	664	4518	5.984	59	70	640	2.374	4	536	8836	3.253	12
60	664	5448	5.831	42	70	734	2.053	4	536	10408	2.687	9
70	**664**	**6406**	**9.146**	**32**	70	841	1.813	3	536	12068	2.344	9
80	664	7433	7.13	25	70	945	2.295	3	536	13562	2.184	9
90	664	8750	6.534	21	70	1057	1.993	3	536	15104	1.997	7
100	664	10348	7.856	18	70	1145	1.857	3	536	16683	2.192	8

Второй локальный максимум λ свидетельствует о достижении порога, при котором происходит основное формирование сообществ (кластеров). В качестве оценки численности тигра принимается число кластеров за минусом отбракованных, тех, у которых число узлов составляет менее 2 % от общего числа узлов в сети. Нижней границей являлось число связных компонентов сети при $R_0 = 100$ км. Сигнальной сетевой метрикой может служить λ-среднее кратчайшее расстояние (геодезическая). Ее первый локальный максимум соответствует значению порога, когда происходит объединение сетевого кластера следов отдельного участка со следами следов соседнего. Специальной работой должно быть исследования, в котором результаты сетевого моделирования можно использовать для

оценок площади участков совместного обитания тигра, лучших по качеству охотничьих угодий путем сопоставления таковых с необходимыми расчетами территориального распределения копытных животных, которые мы приводим здесь (рис. 7).

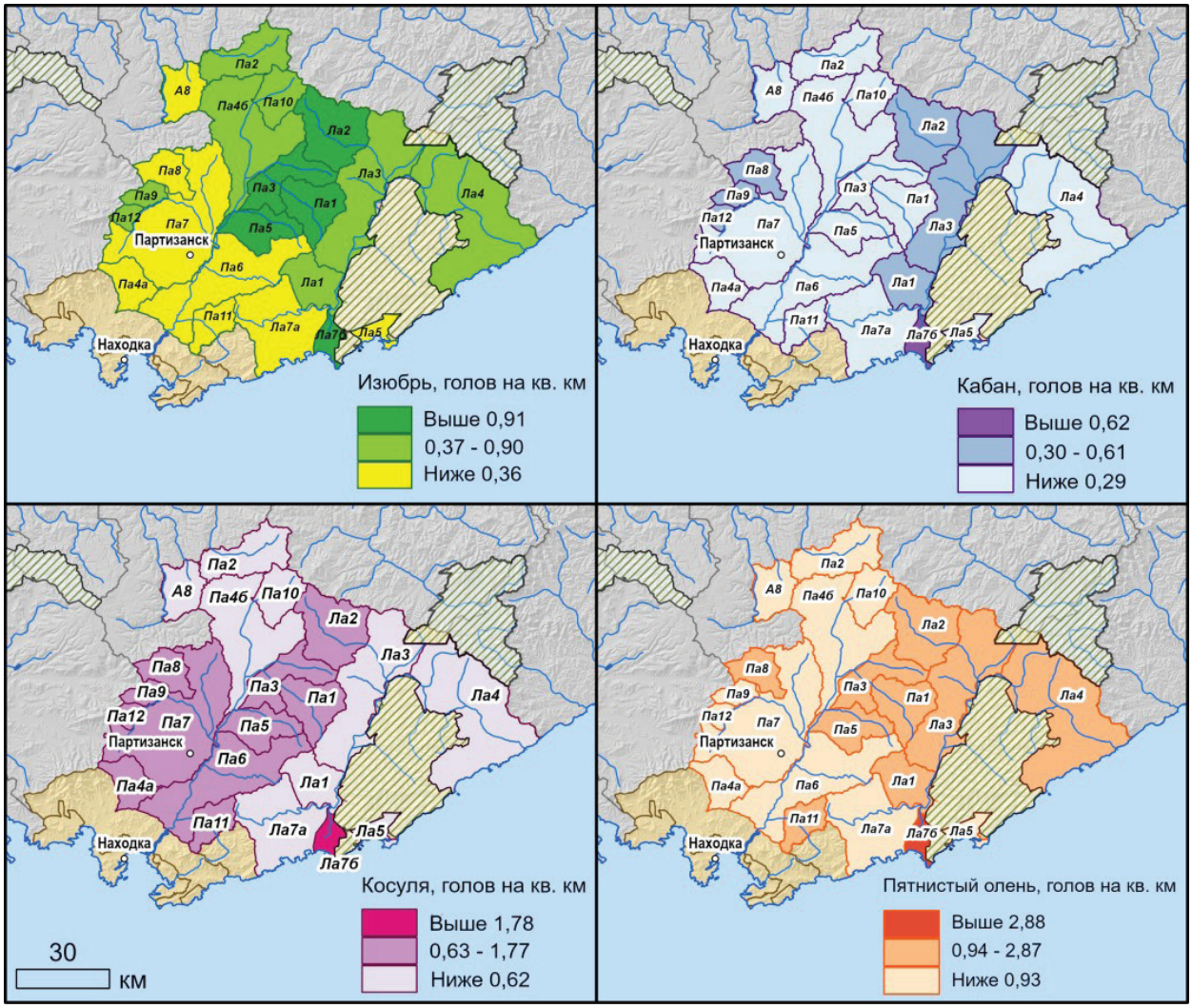


Рис. 7. Распределения копытных животных на модельной территории
Fig. 7. Distributions of ungulates in model area

Применяемая синергия геоинформационного моделирования и сетевого анализа обеспечивает эффективным аналитическим инструментарием исследования в области пространственной экологии животных. В сетевых моделях оказываются «зашифрованными» такие характеристики, как площадь обитания особей, коридоры между участками обитания, в более сложной связи — достаточность ресурсов, различные неблагоприятные факторы, влияющие на популяцию хищника. Полученные нами результаты указывают, что сетевые метрики, определяющие связность (или, наоборот, фрагментарность) чувствительны к тем или иным наблюдаемым процессам или явлениям. Главное — наши результаты исследования показывают глубокое взаимопроникновение мест человеческой деятельности и инфраструктуры в основные места обитания крупных животных в зимний период [*Bocharnikov* et al., 1998].

Здесь следует заметить, что тигр выступает как естественный конкурент охотникам, поскольку главной задачей ведения охотничьего хозяйства является обеспечение успешной

охоты для лиц, приобретающих разрешения на добычу охотничьих животных. Не следует исключать и факты нелегальной охоты, а также гибель копытных от неблагоприятных климатических условий, вследствие болезней и зимней бескормицы. Необходим поиск баланса между поддержанием высокого уровня численности охотничьих объектов с поддержанием оптимальных условий для амурского тигра; полагаем, что в этом отношении хорошим инструментом является сетевой подход.

ВЫВОДЫ

Геоинформационный и сетевой подход способны успешно дополнять и наглядно демонстрировать достаточно сложные закономерности, которые наблюдались авторами применительно к крупным харизматичным объектам животного мира на территории Приморского края. Для модельного участка территории Юго-Восточного Сихотэ-Алиня (Приморский край) подготовлены сетевые модели и геоинформационное отображение зимнего распределения амурского тигра, представляющее собой результат использования порога близости как ключевого варьируемого параметра сетевой модели; рассчитана плотность населения, основанная на ядерной оценке плотности; созданы карты распределения копытных, основанные на пересчете общего числа зверей, оцененных охотпользователями на территории охотничьих угодий; составлены базовые сетевые модели естественного присутствия крупных животных. Следующим этапом должно быть уточнение освоенного человеком пространства (дороги, населенные пункты), сложившихся систем землепользования и фактическим и оптимальным распределением крупных животных. На основании объемных результатов проведенного исследования и их анализа можно заключить, что сетевой подход и используемые модели топологии продемонстрировали свою адекватность в предметной области проблематики угроз существованию крупных хищников. Так, отмечено, что метрики сетевой модели находятся в согласии с наблюдаемыми количественными и качественными показателями популяции амурского тигра, в т. ч. такого, как размер участка обитания хищника. Оцениваемая его численность также не противоречит данным наблюдений. Выявленные пиковые значения сетевых метрик дают ориентиры на поиск слабых мест и территорий, критичных к выживанию тигра. Подтверждено как обоснованное использование порога близости в качестве базового варьируемого параметра сетевой модели. Несомненна перспективность подхода и сопутствующих моделей для прояснения скрытых сложных взаимосвязей численности хищника и происходящих изменений в технологических и природных компонентах территорий его обитания.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта № 20-57-44002. Авторы выражают свою признательность заместителю министра Министерства лесного хозяйства и охраны объектов животного мира А.Л. Суровому и начальнику управления по охране объектов животного мира и особо охраняемых природных территорий Приморского края А.П. Тимофеевой за представленные информационные материалы и организационную помощь в проведении полевых работ. Большая благодарность охотоведу А.А. Курашову за ценную информацию по учетам тигра в охотничьих хозяйствах Партизанского района Приморского края, генеральному директору НПО «Охотсервис» к. б. н. П.В. Баранову, оказавшему помощь в разработке классификации охотничьих угодий модельного района, научному сотруднику ТИГ ДВО РАН Т.К. Музыченко за практические советы и техническую помощь в подготовке иллюстраций к данной статье.

ACKNOWLEDGEMENTS

The reported study was partially funded by RFBR and MECSS, project No. 20-57-44002. The authors express their gratitude to the Deputy Minister of the Ministry of Forestry and Wildlife Protection A.L. Surov and the Head of the Department for the Protection of Wildlife Objects and Specially Protected Natural Areas of the Primorsky Territory A.P. Timofeeva for the information materials presented and organizational assistance in conducting field work. The authors are also grateful to the hunting specialist A.A. Kurashov for valuable information on tiger accounts in the hunting farms of the Partizansky district of the Primorsky Territory, the general director of the NPO Okhotservice, PhD of biological sciences P.V. Baranov, who assisted in the development of the classification of hunting grounds in the model region, T.K. Muzychenko, researcher of PGI FEB RAS for practical advice and technical assistance in preparing illustrations for this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Керли Л.Л., Борисенко М.М. Выживаемость амурских тигров и их передвижение между Лазовским заповедником и национальным парком «Зов тигра». XII Дальневосточная конференция по заповедному делу, 2017. С. 87–89.

Пикунов Д.Г., Середкин И.В., Солкин В.А. Амурский тигр (история изучения, динамика ареала, численности, экология и стратегия охраны). Владивосток: Дальнаука, 2010. 104 с.

Салькина Г.П., Поддубная Н.Я. Следовые учеты тигра в Лазовском заповеднике. Мониторинг состояния природных комплексов и многолетние исследования на особо охраняемых природных территориях, 2019. № 3. С. 88–95.

Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 317 с.

Bergsten A., Zetterberg A. To model the landscape as a network: A practitioner's perspective. Landscape and Urban Planning, 2013. V. 119. P. 35–43. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2013. 06.009.

Besson M., Delmas E., Poisot T., Gravel D. Complex ecological networks. Encyclopedia of Ecology, 2019. P. 536–545. DOI: 10.1016/b978-0-12-409548-9.10564-0.

Carter N.H., Viña A., Hull V., McConnell W.J., Axinn W., Ghimire D., Liu J. Coupled human and natural systems approach to wildlife research and conservation. Ecology and Society, 2014. V. 19. No. 3. Art. 43. DOI: 10.5751/ES-06881-190343.

Fenu G., Pau P.L. Topological and conceptual complex network models for environmental planning. Procedia Computer Science, 2016. V. 83. P. 123–130. DOI: 10.1016/j.procs.2016. 04.107.

Gawecka K.A., Bascompte J. Habitat restoration in spatially explicit metacommunity models. Journal of Animal Ecology, 2021. V. 90. Iss. 5. P. 1239–1251. DOI:10.1111/1365-2656.13450.

Gray C., Baird D.J., Baumgartner S., Jacob U., Jenkins G.B., O'Gorman E.J., Lu X., Ma A., Pocock M.J., Schuwirth N., Thompson M., Woodward G. FORUM: Ecological networks: The missing links in biomonitoring science. Journal of Applied Ecology, 2014. V. 51. Iss. 5. P. 1444–1449. DOI: 10.1111/1365-2664.12300.

Maguire D.Y., James P.M.A., Buddle C.M., Bennett E.M. Landscape connectivity and insect herbivory: A framework for understanding tradeoffs among ecosystem services. Global Ecology and Conservation, 2015. V. 31. P. 73–84. DOI: 10.1016/j.gecco.2015.05.006.

Shi F., Liu S., An Y., Sun Y., Zhao S., Liu Y., Li M. Spatio-temporal dynamics of landscape connectivity and ecological network construction in Long Yangxia Basin at the Upper Yellow River. Land, 2020. V. 9. No. 8. Art. 265. DOI: 10.3390/land9080265.

Taylor P.D., Fahrig L., Henein K., Merriam G. Connectivity is a vital element of landscape structure. Oikos, 1993. V. 68. P. 571–573. DOI: 10.2307/3544927.

Tiang D.C.F., Morris A., Bell M., Gibbins C., Azhar B., Lechner A. Ecological connectivity in fragmented agricultural landscapes and the importance of scattered trees and small patches. Ecological Processes, 2021. V. 10. Art. 20. DOI: 10.1186/s13717-021-00284-7.

REFERENCES

Bergsten A., Zetterberg A. To model the landscape as a network: A practitioner's perspective. Landscape and Urban Planning, 2013. V. 119. P. 35–43. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2013. 06.009.

Besson M., Delmas E., Poisot T., Gravel D. Complex ecological networks. Encyclopedia of Ecology, 2019. P. 536–545. DOI: 10.1016/b978-0-12-409548-9.10564-0.

Carter N.H., Viña A., Hull V., McConnell W.J., Axinn W., Ghimire D., Liu J. Coupled human and natural systems approach to wildlife research and conservation. Ecology and Society, 2014. V. 19. No. 3. Art. 43. DOI: 10.5751/ES-06881-190343.

Fenu G., Pau P.L. Topological and conceptual complex network models for environmental pan-ning. Procedia Computer Science, 2016. V. 83. P. 123–130. DOI: 10.1016/j.procs.2016. 04.107.

Gawecka K.A., Bascompte J. Habitat restoration in spatially explicit metacommunity models. Journal of Animal Ecology, 2021. V. 90. Iss. 5. P. 1239–1251. DOI:10.1111/1365-2656.13450.

Gray C., Baird D.J., Baumgartner S., Jacob U., Jenkins G.B., O'Gorman E.J., Lu X., Ma A., Pocock M.J., Schuwirth N., Thompson M., Woodward G. FORUM: Ecological networks: The missing links in biomonitoring science. Journal of Applied Ecology, 2014. V. 51. Iss. 5. P. 1444–1449. DOI: 10.1111/1365-2664.12300.

Kerley L.L., Borisenko M.M. Amur tiger survivability and movement between Lazovsky Reserve and Zov Tigra (Call of the Tiger) National Park. XII Far Eastern conference on conservation, 2017. P. 87–89 (in Russian).

Maguire D.Y., James P.M.A., Buddle C.M., Bennett E.M. Landscape connectivity and insect herbivory: A framework for understanding tradeoffs among ecosystem services. Global Ecology and Conservation, 2015. V. 31. P. 73–84. DOI: 10.1016/j.gecco.2015.05.006.

Pikunov D.G., Seredkin I.V., Solkin V.A. Amur tiger (history of study, range dynamics, abundance, ecology and conservation strategy). Vladivostok: Dal'nauka, 2010. 104 p. (in Russian).

Salkina G.P., Poddubnaya N.Ya. Trace records of the tiger in the Lazovsky Reserve. Monitoring of the state of natural complexes and long-term research in specially protected natural territories, 2019. No. 3. P. 88–95 (in Russian).

Shi F., Liu S., An Y., Sun Y., Zhao S., Liu Y., Li M. Spatio-temporal dynamics of landscape connectivity and ecological network construction in Long Yangxia Basin at the Upper Yellow River. Land, 2020. V. 9. No. 8. Art. 265. DOI: 10.3390/land9080265.

Sochava V.B. Introduction to the doctrine of geosystems. Novosibirsk: Nauka, 1978. 317 p. (in Russian).

Taylor P.D., Fahrig L., Henein K., Merriam G. Connectivity is a vital element of landscape structure. Oikos, 1993. V. 68. P. 571–573. DOI: 10.2307/3544927.

Tiang D.C.F., Morris A., Bell M., Gibbins C., Azhar B., Lechner A. Ecological connectivity in fragmented agricultural landscapes and the importance of scattered trees and small patches. Ecological Processes, 2021. V. 10. Art. 20. DOI: 10.1186/s13717-021-00284-7.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ И КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ, ЭКОНОМИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ АСПЕКТОВ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ

Черешня О.Ю.
Пространственные индикаторы цифровой экономики в России и странах Европы 5

А.А. Высоцкая, Медведков А.А.
Информационные ресурсы для оценки экологического потенциала геосистем (на примере территории Енисейского севера) 20

Скачков В.С., Заяц Д.В.
Динамика рисков пространственной дезинтеграции Аргентины в начале XXI века 34

Тикунов В.С., Гайдуков В.Р.
Геоинформационное моделирование индекса человеческого развития стран ОЭСР и их регионов 55

Варшанина Т.П., Свиридова Е.П., Пьянков В.Ю.
Фактологическое обоснование структуры данных ГИС «Паспорт климатической безопасности Республики Адыгея» 73

Пьянков С.В., Гармаев Е.Ж., Абдуллин Р.К., Шихов А.Н., Аюржанаев А.А., Черных В.Н., Судницына Т.В.
ГИС гидроэкологической безопасности бассейна р. Селенги: структура, информационное наполнение и функциональные возможности 88

Кузнецова Т.И.
Методология геоинформационного мелкомасштабного картографирования геосистем для управления экологическими рисками 104

Ямашкин А.А., Ямашкин С.А.
Управление метагеосистемами региона на основе идентификации, анализа и мониторинга рисков 123

Черешня О.Ю., Грибок М.В.
Комплексная оценка цифрового неравенства в регионах России 143

Носонов А.М., Тесленок С.А., Чернобровкина В.А., Дмитриев П.С.
Геоинформационные технологии в исследовании инновационной инфраструктуры регионов России 158

Панасюк М.В., Пудовик Е.М., Мальганова И.Г.
Геоинформационное картографирование в образовательных программах кафедры географии и картографии Казанского университета 174

Спирин Ю.А., Зотов С.И., Таран В.С., Королева Ю.В.
Оценка пространственных особенностей загрязнения рек юго-восточной части Калининградской области 186

Панкратов А.А.
Анализ современного состояния российской ИТ-отрасли: ключевые проблемы и тенденции 201

Побединский Г.Г., Обиденко В.И., Маркеева П.И.
Нормативно-правовое и картографо-геодезическое обеспечение изменения границ субъектов Российской Федерации 217

Затолокин А.С., Петров Ю.В.
Принципы реализации ESG-повестки в составе геопорталов 240

Тикунова И.Н., Курланова Е.А.
Место европейских городов Средиземноморья в сфере туризма Европейского союза 255

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Балдина Е.А., Лебедева Е.В., Аникина Н.В.
Активность геоморфологических процессов на склонах речных долин в условиях газогидротермальных проявлений (по разновременным снимкам и ЦМР) 272

Лунина О.В., Чикишева А.Н., Бочалгин А.В., Гладков А.А.
Выявление следов антропогенной деятельности советского периода по данным аэрофотосъемки в дельтах рек Бугульдейки и Голоустной (Байкальский регион) 288

Клубов С.М., Третьяков В.Ю., Дмитриев В.В., Никулина А.Р.
Методика выделения водосборов Санкт-Петербурга для определения поступления общего азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива 304

Гостева А.А., Матузко А.К., Якубайлик О.Э.
Алгоритм вычисления температуры поверхности для восстановления потери данных Landsat 8–9 Collection 2 Level 2 318

Третьяков В.Ю., Заколюкина А.А., Клубов С.М.
Методика оценки однородности створов мониторинга рек по оптической характеристике водной поверхности — индексу мутности 330

Мелкий В.А., Купцова О.В., Верхотуров А.А.
Автоматизированное картографирование разрывных нарушений в районе перешейка Поясок (Сахалин) по данным дистанционного зондирования 346

Трофимец Л.Н., Паниди Е.А., Кочуров Б.И., Чаадаева Н.Н., Тяпкина А.П., Сараева А.М., Тарасов А.В., Баркалов А.О., Петелько А.И.
Количественная оценка эрозионных потерь почвы на различных участках распахиваемого склона (бассейн Верхней Оки) 361

Кравцова В.И., Чалова Е.Р.
Оценка эволюции ландшафтов Самотлорского нефтегазового месторождения 378

Мелкий В.А., Верхотуров А.А.
Анализ динамики состояния лесных растительных сообществ в заказнике «Макаровский» (Сахалин) по данным дистанционного зондирования земли 393

Китов А.Д., Плюснин В.М.
Сравнительная динамика отдельных ледников массива Мунку-Сардык (Восточный Саян) и хребта Цаст-Ула (Монгольский Алтай) 406

Павлейчик В.М., Сивохип Ж.Т., Падалко Ю.А.
Региональные особенности формирования пирологических обстановок в степях Северной Евразии на основе данных FIRMS 423

Грищенко М.Ю., Мурман А.С., Терехова Д.А., Шелухо В.В., Тамаровский И.Е.
Крупномасштабное исследование и картографирование геосистем северной части о. Кунашир (Курильские острова) 437

Рыльский И.А., Малеванная М.С., Грибок М.В., Панин А.Н.
Определение геометрических параметров древесной растительности по данным воздушного лазерного сканирования 452

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ В ГЕОИНФОРМАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ, АНАЛИЗЕ ДАННЫХ, РАЗРАБОТКЕ КАРТ И АТЛАСОВ

Погорелов А.В., Лагута А.А., Нетребин П.Б.
Морфометрический анализ донного рельефа крупного долинного водохранилища в процессе его эволюции 465

Флоринский И.В.
Геоморфометрическое моделирование и картографирование антарктического оазиса Холмы Ларсеманн 482

Осипова Т.Н., Самойлова Е.П.
Оценка результатов интерполяции методом взвешенных угловых расстояний среднемесячной температуры воздуха 511

Loginov Dmitriy S.
Topographic data in the cartographic support of geological exploration: current state and prospects 521

Махмудов М.Д., Фазилова Д.Ш.
Построение регулярного поля скоростей Ташкентского региона на основе интерполяции данных ГНСС пунктов 535

Ермолаев О.П., Шынбергенов Е.А., Мухарамова С.С.
Геоинформационная система «Речные бассейны России» 546

Ерунова М.Г., Якубайлик О.Э.
Геоинформационное моделирование экосистем на основе бассейнового подхода 560

Алябина И.О., Чернова О.В., Присяжная А.А., Решоткин О.В.
Почвенный покров заповедников и национальных парков как отражение зонально-региональных особенностей территории России 574

Рыльский И.А., Парамонов Д.А., Кожухарь А.Ю., Терская А.И.
Создание виртуальной модели района Большой Сочи – Красная Поляна – плато Лаго-Наки 589

Выручалкина Т.Ю.
Исследование особенностей интенсификации испарения с залива Кара-Богаз-Гол 607

Китов А.Д.
Особенности формирования базы данных ледников
Плато Путорана и хребта Мунку-Сардык 616

Демидов А.Н., Котова Т.В.
Моря российской Арктики в атласном картографировании России 630

Романюк В.А., Пищальник В.М., Шумилов И.В., Никулина И.В.
Анализ особенностей ледового режима юго-восточной части
Татарского пролива (Японское море) 646

Шумилов И.В., Романюк В.А., Зарубина Д.В., Пищальник В.М., Никулина И.В.
Разработка программного модуля построения карт распределения вероятностей
встречи с морским льдом для изучения дальневосточных морей 657

Бочарников В.Н., Труфанов А.И., Емельянова Л.Г.
Сетевой подход в изучении пространственной экологии крупных хищников
и копытных юго-восточного Сихотэ-Алиня (Приморский край) 668

CONTENTS[1]

GIS AND CARTOGRAPHIC SUPPORT OF ECOLOGICAL, ECONOMIC AND SOCIAL ASPECTS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF TERRITORIES

Chereshnia O. Yu. 5
Spatial indicators of digital economy in Russia and Europe (6)

Vysotskaya A. A., Medvedkov A. A. 20
Information resources for assessing the environmental potential of geosystems (on the example of the territory of the Yenisei North) (21)

Skachkov V. S., Zayats D. V. 34
Dynamics of the risks of spatial disintegration in Argentina at the beginning of the XXI century (35)

Tikunov V. S., Gaidukov V. R. 55
Geoinformation modeling of the human development index of OECD countries and their regions (56)

Varshanina T. P., Sviridova E. P., Piankov V. Yu. 73
Cartographic and factual substantiation of the data structure of the Geographic Information System "Climate safety passport of the Republic of Adygea" (74)

Pyankov S. V., Garmaev E. Zh., Abdullin R. K., Shikhov A. N., Aurzhanaev A. A., Chernykh V. N., Sudnitsyna T. V. 88
GIS of hydrological and environmental safety of the Selenga River Basin: structure, content and functionality (89)

Kuznetsova T. I. 104
Methodology of geoinformation small-scale mapping of geosystems for environmental risk management (105)

Yamashkin A. A., Yamashkin S. A. 123
Regional metageosystem management based on risk identification, analysis and monitoring (124)

Chereshnia O. Yu., Gribok M. V. 143
Complex assessment of digital inequality in the Regions of Russia (144)

[1] The page number in brackets corresponds to the English text

Nosonov A. M., Teslenok S. A., Chernobrovkina V. A., Dmitriyev P. S. 158
Geoinformation technologies in the study of innovative infrastructure
of the Regions of Russia (159)

Panasyuk M. V., Pudovik E. M., Malganova I. G. 174
Geoinformation mapping in educational programs of the Department
of Geography and Cartography of Kazan University (175)

Spirin Yu. A., Zotov S. I., Taran V. S., Koroleva Yu. V. 186
Evaluation of spatial features of pollution of rivers in the south-eastern
part of the Kaliningrad Region (187)

Pankratov A. A. 201
Analysis of the current state of the Russian IT Industry: key issues and trends (202)

Pobedinsky G. G., Obidenko V. I., Markeeva P. I. 217
Regulatory and cartographic and geodetic support for changing the borders
of the subjects of the Russian Federation (218)

Zatolokin A. S., Petrov Yu. V. 240
Principles of implementation of the ESG agenda as part of geoportals (241)

Tikunova I. N., Kurlanova E. A. 255
The place of european cities of the Mediterranean in the sphere of tourism
of the European Union (256)

REMOTE METHODS IN EARTH RESEARCH

Baldina E. A., Lebedeva E. V., Anikina N. V. 272
Activity of geomorphological processes on the slopes of river valleys in the
conditions of gas-hydrothermal occurrences
(based on multi-temporal images and DEM analysis) (273)

Lunina O. V., Chikisheva A. N., Bochalgin A. V., Gladkov A. A. 288
Traces of anthropogenic activity of the soviet-era based on aerial photography
data in the deltas of the Buguldeyka and Goloustnaya Rivers (Baikal Region) (289)

Klubov S. M, Tretyakov V. Yu., Dmitriev V. V., Nikulina A. R. 304
Methodology for definition of boundaries of Saint Petersburg watersheds to
determine the intake of total nitrogen and phosphorus into the Neva Bay and
eastern part of the Finnish Gulf (305)

Gosteva A. A., Matuzko A. K., Yakubajlik O. E. 318
Surface temperature algorithm for data loss recovery Landsat 8–9 Collection 2 Level 2 (319)

Tretyakov V. Yu., Zakolyukina A. A., Klubov S. M. 330
Methodology for evaluation of monitoring river stations homogenity by
an optical characteristic of the water surface — the turbidity index (331)

Melkiy V. A., Kuptsova O. V., Verkhoturov A. A. 346
Automated mapping of faults in the area of Poyasok Isthmus (Sakhalin)
by remote sensing data (347)

Tro imetz L. N., Panidi E. A., Kochurov B. I., Chaadaeva N. N., Tyapkina A. P., 361
Saraeva A. M., Tarasov A. V., Barkalov A. O., Petelko A. I.
Quantitative assessment of erosional soil loss in various areas of the arable slope
(Upper Oka Basin) (362)

Kravtsova V. I., Chalova E. R. 377
Estimation of landscape evolution of the Samotlor oil-gas field (378)

Melkiy V. A., Verkhoturov A. A. 393
Analysis of the dynamics of condition forest plant communities in the
“Makarovsky” nature sanctuary (Sakhalin Island) by remote sensing data (394)

Kitov A. D., Plyusnin V. M. 406
Comparative dynamics of individual glaciers of the Munku-Cardyk Massif
(Eastern Sayan) and the Tzast-Ula Ridge (Mongolian Altai) (407)

Pavleichik V. M., Sivohip Z. T., Padalko Yu. A. 423
Regional features of the formation of pyrological environments in the steppes
of Northern Eurasia based on Firms data (424)

Grishchenko M. Yu., Murman A. S., Terekhova D. A., 437
Shelukho V. V., Tamarovsky I. Ye.
Large-scale research and mapping of geosystems of the northern part
of Kunashir Island (Kuril Islands) (438)

Rylskiy I. A., Malevannaya M. S., Gribok M. V., Panin A. N. 452

Determination of the geometric parameters of vegetation using airborne
laser scanning data (453)

NEW METHODS AND APPROACHES IN GEOINFORMATION MODELING, DATA ANALYSIS, CREATION OF MAPS AND ATLASES

Pogorelov A. V., Laguta A. A., Netrebin P. B. 452
Morphometric analysis of the bottom topography of a large valley reservoir during its evolution (453)

Florinsky I. V. 482
Geomorphometric modeling and mapping of the Larsemann Hills Antarctic Oasis (482)

Osipova T. N., Samoylova E. P. 511
Evaluation of the ADW interpolation for the average monthly air temperature (512)

Loginov D. S.
Topographic data in the cartographic support of geological exploration: current state and prospects 521

Makhmudov M. D., Fazilova D. Sh. 535
Construction the velocity Field in a regular grid in the Tashkent Region on the basis interpolation of GNSS permanent stations data (536)

Yermolaev O. P., Shynbergenov Y. A., Mukharamova S. S. 546
Geoinformation system "River Basins of Russia" (547)

Erunova M. G., Yakubailik O. E. 560
Geoinformation modeling of ecosystems based on the basin approach (561)

Alyabina I. O., Chernova O. V., Prisyazhnaya A. A., Reshotkin O. V. 574
Soil cover of nature reserves and national parks as a reflection of the zonal and regional features of the territory of Russia (575)

Rylskiy I. A., Paramonov D. A., Kozhukhar A. Yu., Terskaya A. I. 589
Creating a virtual model of the area of Greater Sochi – Krasnaya Polyana – Lago-Naki Plateau (590)

Vyruchalkina T. Yu. 607
Investigation of the features of the intensification of evaporation from the Kara-Bogaz-Gol Bay (607)

Kitov A. D. 616
Features of the formation of a database of glaciers of the Putorana Plateau and the Munku-Sardyk Ridge (617)

Demidov A. N., Kotova T. V. 630
Seas of the Russian Arctic in the atlas mapping of Russia (631)

Romanyuk V. A., Pishchal'nik V. M., Shumilov I. V., Nikulina I.V. 646
Analysis of the peculiarities of the ice regime in the southeastern part of the Tatar Strait (Sea of Japan) (647)

Shumilov I. V., Romanyuk V. A., Zarubina D. V., Pishchal'nik V. M., Nikulina I. V. 657
Development of the programm module for mapping the probability distribution of encounter with sea ice for research of the Far Eastern Seas (658)

Bocharnikov V. N., Trufanov A. I., Emelyanova L.G. 668
Network approach to studying spatial ecology of apex predators and ungulates of southeastern Sikhote-Alin Range (Primorsky Krai) (669)

СЕРИЯ КОНФЕРЕНЦИЙ ИНТЕРКАРТО. ИНТЕРГИС

ИнтерКарто 1 — Москва, 23–25 мая 1994 г.
ИнтерКарто 2 — Иркутск, 26–29 июня 1996 г.
ИнтерКарто 3 — Новосибирск, 27–31 января 1997 г.
ИнтерКарто 4 — Барнаул, 1–4 июля 1998 г.
ИнтерКарто 5 — Якутск, 17–19 июня 1999 г.
ИнтерКарто 6 — Апатиты, Мурманской обл., 22–24 августа 2000 г.
ИнтерКарто 7 — Петропавловск-Камчатский, 30 июля – 1 августа 2001 г.
ИнтерКарто 8 — Хельсинки (Финляндия), Санкт-Петербург, 28 мая – 1 июня 2002 г.
ИнтерКарто 9 — Новороссийск, Севастополь (Украина), 25–29 июня 2003 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 10 — Владивосток, Чанчунь (Китай), 12–19 июля 2004 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 11 — Ставрополь, Домбай, Будапешт (Венгрия), 25 сентября – 3 октября 2005 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 12 — Калининград, Берлин (Германия), 25–31 августа 2006 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 13 — Ханты-Мансийск, Йеллоунайф (Канада), 12–24 августа 2007 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 14 — Саратов, Урумчи (Китай), 24 июня – 1 июля 2008 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 15 — Пермь, Гент (Бельгия), 29 июня – 5 июля 2009 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 16 — Ростов-на-Дону, Зальцбург (Австрия), 3–8 июля 2010 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 17 — Белокуриха, Алтайский край, Денпасар (Индонезия), 14–19 декабря 2011 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 18 — Смоленск, Сен-Дье-де-Вож (Франция), 26 июня – 4 июля 2012 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 19 — Курск, Богота (Колумбия), 2–7 февраля 2013 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 20 — Белгород, Харьков (Украина), Кигали (Руанда), Найроби (Кения), 23 июля – 6 августа 2014 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 21 — Краснодар, Сочи, Сува (Фиджи), 12–19 ноября 2015 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 22 — Веллингтон (Новая Зеландия), Мельбурн (Австралия), Протвино (Московская обл.), 31 августа – 14 сентября 2016 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 23 — Южно-Сахалинск, Сеул (Республика Корея), Вашингтон (США), 26 июня – 7 июля 2017 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 24 — Петрозаводск (Республика Карелия), 19–22 июля, Бонн (Германия), 24–28 июля, Анкоридж (США), 30 июля – 1 августа 2018 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 25 — Мурманск, 30 января – 2 февраля, Токио (Япония), 20 июля 2019 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 26 — Ташкент (Узбекистан), 1–2 июня, Пятигорск (Россия), 24–26 сентября, Тбилиси (Грузия), 28–29 сентября, 2020
ИнтерКарто. ИнтерГИС 27 — Апатиты (Мурманская область), 21–23 августа, Нур-Султан (Казахстан), 27 августа 2021 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 28 — Майкоп (Республика Адыгея), 22–23 октября, Ташкент, (Узбекистан), 26 октября 2022 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 29 — Улан-Удэ (Республика Бурятия), 12–14 сентября, Улан-Батор (Монголия), 16–18 сентября 2023 г.

INTERCARTO. INTERGIS CONFERENCE SERIES

InterCarto 1 — Moscow, May 23–25, 1994
InterCarto 2 — Irkutsk, June 26–29, 1996
InterCarto 3 — Novosibirsk, January 27–31, 1997
InterCarto 4 — Barnaul, July 1–4, 1998
InterCarto 5 — Yakutsk, June 17–19, 1999
InterCarto 6 — Apatity, Murmansk Province, August 22–24, 2000
InterCarto 7 — Petropavlovsk-Kamchatsky, July 30 – August 1, 2001
InterCarto 8 — Helsinki (Finland), St.-Petersburg, May 28 – June 1, 2002
InterCarto 9 — Novorossiysk, Sevastopol (Ukraine), June 25–29, 2003
InterCarto. InterGIS 10 — Vladivostok, Changchun (China), July 12–19, 2004
InterCarto. InterGIS 11 — Stavropol, Dombai, Budapest (Hungary), September 25 – October 3, 2005
InterCarto. InterGIS 12 — Kaliningrad, Berlin (Germany), August 25–31, 2006
InterCarto. InterGIS 13 — Khanty-Mansiysk, Yellowknife (Canada), August 12–24, 2007
InterCarto. InterGIS 14 — Saratov, Urumqi (China), June 24 – July 1, 2008
InterCarto. InterGIS 15 — Perm, Ghent (Belgium), June 29 – July 5, 2009
InterCarto. InterGIS 16 — Rostov-on-Don, Salzburg (Austria), July 3–8, 2010
InterCarto. InterGIS 17 — Belokurikha, Altaysky Kray, Denpasar (Indonesia), December 14–19, 2011
InterCarto. InterGIS 18 — Smolensk, St. Die des Vosges (France), June 26 – July 4, 2012
InterCarto. InterGIS 19 — Kursk, Bogota (Colombia), February 2–8, 2013
InterCarto. InterGIS 20 — Belgorod, Kharkov (Ukraine), Kigali (Rwanda), Nairobi (Kenya), July 23 – August 6, 2014
InterCarto. InterGIS 21 — Krasnodar, Sochi, Suva (Fiji), November 12–19, 2015
InterCarto. InterGIS 22 — Wellington (New Zealand), Melbourne (Australia), Protvino, Moscow Region, August 31 – September 14, 2016
InterCarto. InterGIS 23 — Yuzhno-Sakhalinsk, Seoul (Republic of Korea), Washington DC (USA), June 26 – July 7, 2017
InterCarto. InterGIS 24 — Petrozavodsk (Republic of Karelia), July 19–22, Bonn (Germany), July 24–28, Anchorage (USA), July 30 – August 1, 2018
InterCarto. InterGIS 25 — Murmansk, January 30 – February 2, Tokyo (Japan), July 20, 2019
InterCarto. InterGIS 26 — Tashkent (Uzbekistan), June 1–2, Pyatigorsk, September 24–26, Tbilisi (Georgia), September 28–29, 2020
InterCarto. InterGIS 27 — Apatity (Murmansk Region), August 21–23, Nur-Sultan (Kazakhstan), August 27, 2021
InterCarto. InterGIS 28 — Maykop (Republic of Adygea), October 22–23, Tashkent (Uzbekistan), October 26, 2022
InterCarto. InterGIS 29 — Ulan-Ude (Republic of Buryatia), September 12–14, Ulaanbaatar (Mongolia), September 16–18, 2023

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНОВ В УСЛОВИЯХ КРИЗИСА

Материалы Международной конференции
Улан-Удэ (Республика Бурятия),
12–14 сентября,
Улан-Батор (Монголия),
16–18 сентября 2023 г.

ТОМ 29

ЧАСТЬ 1

Оформление обложки *К.В. Саутенков*
Корректоры *О.И. Маркова, А.А. Котов*
Компьютерная верстка *О.Г. Полевич*

Подписано в печать 13.11.2023

Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
119234, Москва, ГСП1, Ленинские горы, д. 1, ауд. 2209,
научно-исследовательская лаборатория комплексного картографирования
тел.: +7(495)939-23-54
e-mail: intercarto@yandex.ru
сайт издания: http://intercarto.msu.ru/