



ИнтерКарто. ИнтерГИС

**ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА
УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНОВ
В УСЛОВИЯХ КРИЗИСА**

Материалы Международной конференции

Усть-Каменогорск (Казахстан)

1-3 октября

Грозный (Чеченская Республика, Россия)

7-9 октября 2024

Том 30

Часть 1

<http://intercarto.msu.ru>



ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
МГУ имени М.В. Ломоносова
Москва, 2024

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

Организаторы конференции:
Международная картографическая ассоциация
Международная академия наук Евразии
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Чеченский государственный университет имени А. А. Кадырова
Филиал МГУ имени М. В. Ломоносова в г. Грозном
Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева
Отделение наук о Земле РАН
Исследовательский центр «Картфонд»

ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационная поддержка устойчивого развития регионов
И 732 в условиях кризиса: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2024.
Т. 30. Ч. 1. 678 с.

Сборник включает материалы, представленные на Международную конференцию «ИнтерКарто. ИнтерГИС 30». В статье рассматриваются теоретические и методические аспекты геоинформационного и картографического обеспечения экологических, экономических и социальных вопросов устойчивого развития, геоинформатики, картографии, создания атласов, дистанционного зондирования Земли. Отражены также 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), **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. Караниколас** (Ун-т Аристотеля, Греция), **Т. Кольчугина** (Корпорация технологий устойчивого развития, США), **А. В. Кошкарёв** (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. Нырцов** (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, 2024. Т. 30. Ч. 1. С. 110–120. DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-110-120 (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, 2024. V. 30. Part 1. P. 110–120. DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-110-120 (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@conf.msu.ru

Интернет-сайт: intercarto.msu.ru



InterCarto. InterGIS

**GI SUPPORT OF SUSTAINABLE
DEVELOPMENT OF REGIONS IN CRISIS
CONDITIONS**

Proceedings of the International conference

Ust-Kamenogorsk (Kazakhstan)
October 1-3
Grozny (Chechen Republic, Russia)
October 7-9, 2024

Volume 30
Part 1

<http://intercarto.msu.ru>

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)
A. A. Kadyrov Chechen State University
Branch of M. V. Lomonosov Moscow State University in Grozny
D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University
Department of Earth Sciences of the Russian Academy of Sciences (RAS)
“Kartfond” Research Center

InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of regions in crisis conditions: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2024. V. 30. Part 1. 678 p.

The Proceedings include papers presented at the “InterCarto. InterGIS 30” 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)

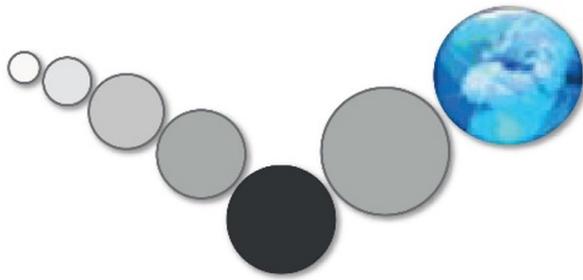
Editorial Board: **O. Arkhipova** (Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences (RAS), Rostov-on-Don), **A. Batuev** (Institute of Geography SB RAS, Irkutsk), **V. Belozyorov** (North-Caucasus Federal University, Stavropol), **S. Bobylyov** (MSU), **A. Chumachenko** (Saratov State University), **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. Petersburg 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, 2024. V. 30. Part 1. P. 110–120. DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-110-120.

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@conf.msu.ru
Website: intercarto.msu.ru



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: 519.72+912

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-5-22

О.И. Маркова¹, В. С. Тикунов²

АТЛАСНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОХРАНЫ ПРИРОДНОГО И КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается понятие атласных информационных систем (АИС) и опыт их проектирования и создания в области охраны природного и культурного наследия Российской Федерации. При рассмотрении различных АИС использовались тематический, территориальный и исторический подходы. Приведены примеры функционирующих и проектируемых АИС в области охраны природного и культурного наследия России, которые не всегда имеют непосредственное название атласных информационных систем, но по факту ими являются. Подобные АИС могут относиться как к отдельным ООПТ, так и к серии ООПТ определенной территории, к крупным объектам Всемирного наследия ЮНЕСКО, к локальному, городскому, областному, региональному и федеральному уровням; для некоторых из них характерен принцип полимасштабности. Упоминаются создатели АИС: научные, учебные заведения, Русское географическое общество, ведомства и организации, руководство ООПТ и энтузиасты. Атласные информационные системы обладают возможностью интеграции и создания картографических и мультимедийных данных о памятниках природного и культурного наследия, о традиционных культурных ландшафтах, об экологических нарушениях, препятствующих сохранению памятников. АИС — место концентрации упорядоченных данных о природных и культурных объектах государственной охраны, перспективных для постановки на охрану и об утраченных объектах наследия. Информация о культурных ландшафтах как об объектах традиционного взаимодействия человека и природы также может и должна содержаться в подобных системах. Атласные информационные технологии дают возможность сочетания данных по природному и культурному наследию и, соответственно, способствуют информационному

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория комплексного картографирования, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: solntsevaolga1401@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория комплексного картографирования, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: vstikunov@yandex.ru

объединению различных ведомств. В ближайшем будущем АИС, посвященные наследию, имеют шанс перейти к стадиям постепенной реализации и функционирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: атласные информационные системы, природное и культурное наследие, геоинформационные методы, картографирование, мультимедиа

Olga I. Markova¹, Vladimir S. Tikunov²

ATLAS INFORMATION SYSTEMS FOR THE PROTECTION OF NATURAL AND CULTURAL HERITAGE

ABSTRACT

The article examines the concept of atlas information systems (AIS) and the experience of their design and creation in the field of protection of natural and cultural heritage of the Russian Federation. When considering various AIS, thematic, territorial and historical approaches were used. Examples of functioning and designed AIS in the field of protection of natural and cultural heritage of Russia are given, which do not always have the direct name of atlas information systems, but in fact are. Such AIS may relate to individual protected areas, as well as to a series of protected areas of a certain territory, to large UNESCO World Heritage sites, to local, city, regional, provincial and federal levels; some of them are characterized by the principle of poli-scale. The creators of the AIS are mentioned: scientific and educational institutions, the Russian Geographical Society, departments and organizations, the management of protected areas and enthusiasts. Atlas information systems have the ability to integrate and create cartographic and multimedia data on natural and cultural heritage sites, traditional cultural landscapes, and environmental violations that hinder the preservation of monuments. AIS is a place where organized data is concentrated on natural and cultural objects of state protection that are promising for protection, and on lost heritage objects. Information about cultural landscapes as objects of traditional interaction between man and nature can and should also be contained in a such system. Atlas information technologies make it possible to combine data on natural and cultural heritage and, accordingly, facilitate the information unification of various departments. In the near future, heritage-related AISs have the chance to move to the stages of gradual implementation and operation.

KEYWORDS: atlas information systems, natural and cultural heritage, geoinformation methods, mapping, multimedia

ВВЕДЕНИЕ

В наше время потребность в географической информации о памятниках природного и культурного наследия весьма велика. Подобная информация нужна как специалистам в области охраны наследия, территориального планирования, туризма, преподавания в разных областях, так и любителям природы, истории, краеведения, архитектуры, искусства, туристам, студентам.

Весьма эффективно можно содержать и обрабатывать такую информацию с помощью атласные информационных систем (АИС) — систем синтеза достижений в области геоинформационных технологий, картографии и мультимедиа, представляющих собой компьютеризированные геоинформационные системы, связанные с конкретной

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: solntsevaolga1401@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: vstikunov@yandex.ru

территорией или темой в сочетании с повествовательной частью, где доминирующую роль играют карты. АИС — электронные версии бумажных атласов с расширенными функциональными возможностями (масштабирования, навигации, адресного поиска, картометрических и других сложных функций, присущих ГИС) [Яблоков, Тикунов, 2016; Ormeling, 1995; Ramos, Cartwright, 2006; Hurni, 2008, 2017 и др.].

Целью настоящей работы явилось рассмотрение атласных информационных систем, созданных или проектируемых в разных областях, обобщение опыта их разработки в нашей стране, определение основных особенностей проектирования и функционирования подобных систем. Атласным информационным системам, созданным или проектируемым в области охраны природного и культурного наследия, уделено особое внимание.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование было проведено на основании изучения литературных и Интернет-источников, конкретных АИС и подобных им систем, размещенных на геопорталах в открытом доступе.

Работа является обзорной; при рассмотрении различных АИС использовались тематический, территориальный и исторический подходы.

Зарубежные системы рассмотрены кратко; наибольшее внимание уделено российским АИС, из которых наиболее подробно рассмотрены системы, посвященные вопросам природного и культурного наследия. Следует отметить, что социально-экономическое картографирование — область, в которой АИС создавались прежде всего и традиционно развиты наиболее сильно. АИС, созданные или спроектированные российскими разработчиками, могут относиться информационно к зарубежным территориям и иметь международный статус.

Некоторые из систем не называются непосредственно «атласная информационная система». Они могут иметь названия электронных атласов, веб-ГИС, геоинформационных моделей, геопорталов и т. д., однако по своему назначению и функционированию являются фактически АИС. При их сравнительном описании уделено внимание не только тематике, территории исследований, характеристикам содержащейся в системах информации, но и организациям-разработчикам. Многие АИС на данный момент являются проектами; до их создания и полноценного функционирования должно пройти время и сложиться определенные условия, в т. ч. финансовые. Проведено обобщение полученных данных по российским АИС в области охраны наследия в виде таблицы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зарубежный опыт реализации первых атласных информационных систем

Первоначальный опыт создания АИС был осуществлен в странах Запада — в США [Wright, 1999], Канаде [The Atlas..., <https://www.nrcan.gc.ca...>], Швеции [Ögren, 1997; Wastenson, Arnberg, 1997], Швейцарии [Atlas of Switzerland, 2000; Atlas of Switzerland, <https://www.atlasderschweiz.ch/...>], Германии [Lambrecht, 1999], Австрии [Kelnhofer et al., 1999]. В этих странах в виде АИС созданы национальные атласы, в которых освещаются в т. ч. и вопросы природного и культурного наследия.

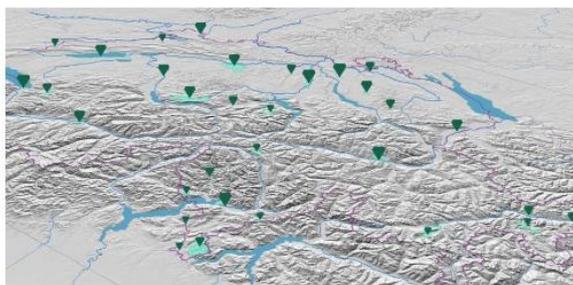
Например, в Атлас Швейцарии, главным редактором которого является теоретик мультимедийных АИС профессор Лоренц Хурни, включены следующие сюжеты:

- 1) национальные парки, объекты всемирного природного наследия ЮНЕСКО, природные парки и региональные природные парки;
- 2) федеральный реестр швейцарских объектов культурного наследия национального значения;
- 3) «изумрудные» места — ценные места обитания с уникальной фауной и флорой;
- 4) ландшафты и памятники природы национального значения.

В эти сюжеты включены карты следующего содержания: обозначенные территории дикой природы и заповедники; места обитания животных и растений; заказники для водоплавающих и перелетных птиц общегосударственного значения; высотные пояса лесов и их изменение в связи с изменением климата; состояние швейцарских лесов; ландшафты; пространство с городским характером; растительный покров и землепользование, в т. ч. в профилях муниципалитетов; образ и структура поселений; ландшафт и пространство; мониторинг окружающей среды; охрана природы; охраняемые территории; места для проведения свободного времени (туризм) и др. На эти карты можно выйти по запросу из любого раздела АИС.



Emerald sites: valuable habitats with a unique fauna and flora



[View map in the atlas](#)

Emerald sites

*Рис. 1. Страница сюжета «изумрудных» мест из Атласа Швейцарии,
организованного в виде АИС*

*Fig. 1. Page of the plot of the “emerald” places from the Atlas of Switzerland
organized in the form of AIS*

Атласные информационные системы России в области социально-экономического картографирования

Российские атласные информационные системы начали развиваться позднее, в основном в виде научных разработок в области социально-экономического картографирования.

Атласная информационная система «Геополитическая ситуация в Большом Средиземноморье» предназначена для полимасштабной (мир, регион, город, округ, район, квартал, дом) организации данных, картографирования, моделирования и прогнозирования этнодемографических, миграционных, общественно-политических, военно-исторических, экономических, инвестиционных и политических вопросов развития Средиземноморья [Тикунов и др., 2019, с. 109].

Разрабатываемая атласная информационная система «Большие города России» должна обеспечить мониторинг демографических, миграционных и других социально-экономических процессов в сети городов России. Для проектирования данной АИС также использован многоуровневый подход (страна, регион, город, район, квартал), что на этапе концептуальной проработки выразилось в принципе поэтапного планирования [Черкасов, 2021, с. 7].

Существует опыт разработки атласной демографической информационной системы — проблемно-ориентированной АИС, интегрирующей информацию о демографических и связанных с ними характеристиках населения на заданных пространственных уровнях с расширенными возможностями геовизуализации и пространственно-статистического анализа. Цель создания системы — мультимасштабное изучение демографических процессов и поддержка принятия решений в сфере социально-демографической политики. В системе запланировано 13 разных пространственных уровней от мирового до уровня отдельных домохозяйств [Тимонин, 2013, с. 11–12].

Атласная информационная система «Население Ставропольского края» создана для обеспечения аналитической поддержки и принятия управленческих решений по стратегическому и пространственному планированию территории Ставропольского края, а также для образовательных программ высшей школы. Тематические разделы «Ставропольский край на карте Юга России», «Формирование населения Ставропольского края», «Этнический состав населения и расселение этносов Ставропольского края», «Агломерации Ставропольского края», «Городские и муниципальные округа» систематизированы по принципу полимасштабности (изменение информативности в зависимости от масштаба). Разделы содержат карты, ГИС-модели, графики, схемы [Черкасов, Махмудов, 1922, с. 31].

Теме населения также посвящена атласная демографическая система Белгородской обл., содержащая разнообразные карты и модели демографических тем¹.

Создан проект атласной информационной системы «Региональные столицы Юга Европейской России», состоящей из 2-х основных блоков (структурного и моделирования и визуализации) и 6 тематических разделов: по этнодемографическим и миграционным процессам, по заболеваемости Covid-19 (заболевшие, умершие, вылечившиеся от коронавирусной инфекции), раздел «Большие данные» с показателями по рынку недвижимости и индексу качества городской среды. В АИС заложена возможность проведения моделирования, тематического картографирования, всестороннего комплексного пространственного анализа, интеграции с веб-сервисами [Сопнев и др., 2022, с. 172].

Разработана АИС социальной тематики на территорию Южного федерального округа России, весьма сложного и конфликтного, со множеством социальных проблем. Для диагностики социальной напряженности использовались индикаторы социально-экономического самочувствия населения, характера социального поведения населения, политического поведения и участия населения в жизни общества, индивидуальных психических состояний, состояния здоровья населения. Создана полноценная АИС, включающая блоки ввода-вывода, хранения и обработки информации [Баженова, 2008, с. 61; 2009, с. 5].

В АИС «Иностранцы студенты в России» реализован принцип полимасштабности на 4 пространственных уровнях: глобальном (Россия на мировом рынке образовательных услуг), страновом (показатели по России в целом), региональном (региональные

¹ Атласная демографическая информационная система Белгородской обл. Вып. квалиф. Работа Зиновьевой Ю. В., научн. руков. к. г. н. Павлюк Я. В. Белгород: Белгородский гос. нац. исслед. университет, факультет горного дела и природопользования, 2018. 46 с. Электронный ресурс: <https://nauchkor.ru/uploads/documents/5c1a87fc7966e104f6f85cd8.pdf> (дата обращения 20.02.2024)

особенности студенческой иммиграции), локальном (анализ характер студенческой иммиграции в вузах городов). Предусмотрены широкие возможности картографирования и моделирования, а также интеграции в Веб-среду [Сопнев, Белозеров, 2023, с. 44, 54].

Интересный опыт разработки атласной информационной системы — АИС для формирования интегральных индексов социально-экономического развития территорий, разработанных с универсальным подходом на страновом и региональном уровнях (индексы развития человеческого потенциала, человеческого капитала, социально-демографического развития, географического размера территорий и др.). Сочетание картографического, геоинформационного, статистического подходов в рамках концепции АИС позволило создать широкие возможности визуализации, использовать систему для анализа и прогнозирования социально-экономического развития территорий, сформировать базу рекомендаций для принятия управленческих решений [Тикунев и др., 2023].

Атласная информационная система оценки устойчивого развития прибрежной зоны Азовского моря включает в свою тематику долговременные изменения климата, катастрофические природные явления, социально-экономические угрозы и риски в регионе Азовского моря [Архипова, Лычагина, 2018, с. 68].

Атласные информационные системы в области охраны природного и культурного наследия

Прежде всего нужно сказать об опыте создания атласных информационных систем особо охраняемых природных территорий (ООПТ). Атласная информационная система для управления природопользованием на ООПТ определяется как «систематизированный набор геопространственных данных с возможностью анализа и принятия управленческих решений, позволяющим моделировать многоуровневый виртуальный ландшафт ООПТ, а также создавать интерактивную среду для управления природопользованием на ООПТ» [Яблоков, Тикунев, 2016а, с. 23].

Большинство официальных сайтов крупных национальных парков за рубежом (в Северной Америке, Европе и Африке) имеют встроенные веб-ГИС с интерактивными функциями, которые по своим возможностям можно отнести к АИС. Например, это интерактивные информационные системы Йеллоустонского национального парка¹, Парка Йосемити², парка Масаи и Мара³, Национального парка Швейцарии⁴. Такие АИС — интерактивные, без возможности проведения анализа [там же, с. 17–18].

В области охраны культурного наследия зарубежный опыт также очень интересен, например, опыт разработки четырехмерной ГИС «Виртуальный Киото», созданной в японском университете Ritsumeikan при поддержке Министерства образования, культуры, спорта, науки и технологий Японии [Яно и др., 2015]. Система включает в себя трехмерную ГИС города и параметр времени, реконструкцию и визуализацию исторических ландшафтов. Для ее создания с поддержкой технологий виртуальной реальности использовались оцифрованные архивные материалы, в т.ч. рисунки художников и материалы по сценическому искусству.

¹ Yellowstone National Park (U. S. National Park Service). Maps. Электронный ресурс: <https://www.nps.gov/yell/planyourvisit/maps.htm> (дата обращения 10.02.2024)

² Yosemite National Park (U. S. National Park Service). Maps. Электронный ресурс: <https://www.nps.gov/yose/planyourvisit/maps.htm> (дата обращения 10.02.2023)

³ Masai Mara National Reserve and conservancies maps. Электронный ресурс: <https://www.masaimara.com/map.php> (дата обращения 10.02.2023)

⁴ Swiss National Parc. Interactive map. Электронный ресурс: <https://www.nationalpark.ch/en/about/map/> (дата обращения 10.02.2023)

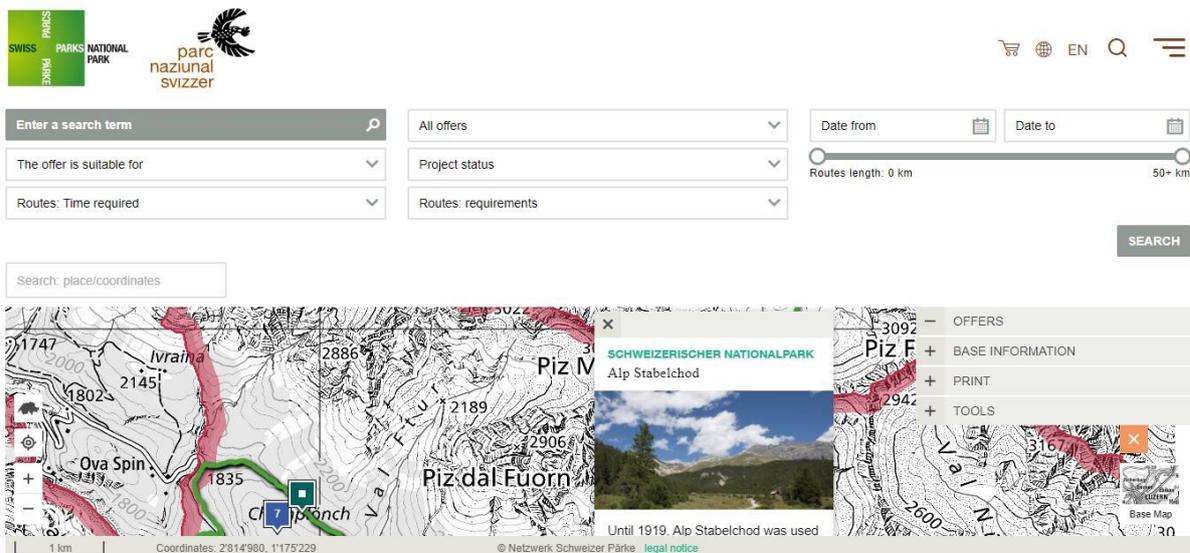


Рис. 2. Страница сайта Национального парка Швейцарии со встроенной АИС
Fig. 2. The Swiss National Park website page with built-in AIS

Некоторые АИС имеют комплексное содержание, и объекты природного и культурного наследия — не единственное содержание таких систем.

В области охраны природного и культурного наследия в Российской Федерации существуют специализированные геоинформационные системы и электронные атласы, не называемые разработчиками атласными информационными системами, но близкие к ним по концепции; ниже представлена таблица, в которой отражены эти разработки. Названия их могут быть самыми разнообразными; эти системы находятся в разной стадии создания (от проектирования до функционирования). В заключительном разделе таблицы рассмотрены проекты АИС, которые уже имеют именно такое конкретное название — атласная информационная система. Как правило, они также имеют более обширную структуру, чем информация о конкретных памятниках природного и культурного наследия.

Табл. 1. Электронные картографические системы в области охраны природного и культурного наследия России
Table 1. Electronic map systems in the field of protection of natural and cultural heritage of Russia

Назначение, название	Территория, уровень	Разработчик, источник	Назначение, информация, особенности
Электронный атлас административного района	Теньгушевский район Республики Мордовия, региональный	Государственный университет по земле-устройству, Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева [Грушина и др., 2021]	Интеграция данных из различных источников с использованием ГИС-технологий. Учебное, учебно-краеведческое и справочное пособие. Общегеографическая, социально-экономическая информация, данные о памятниках природного и культурного наследия
Электронный этнокультурно-ландшафтный атлас	Псковская область, областной	Псковский гос. университет, ЛГУ имени А. С. Пушкина, Дворец творчества детей и молодежи Колпинского	Тематические блоки: природный; объекты природного и культурного наследия, в т. ч. на уровне районов; лингвистический слой и топонимика; историко-политические факторы;

		района Санкт-Петербурга [Манаков и др., 2021]	этноконфессиональные составляющие; итоги переписей населения; формирование культурных ландшафтов финно-угорского народа сев. Особое внимание на политико-исторический, этнический, конфессиональный, лингвистический и топонимический слои
Веб-ГИС ООПТ, информационно-справочная система	Таймырский заповедник, ООПТ	Заповедник ¹ [Яблоков, Тикунов, 2016]	Кордоны, гербарные сборы, геоботанические описания, ключевые участки, фотографии, ООПТ, реки, озера, острова, ландшафты, населенные пункты, космические снимки и др. Дифференцированный доступ
Веб-ГИС ООПТ	Заповедник Кроноцкий, ООПТ	Заповедник, МГУ имени М. В. Ломоносова [Завадская, Яблоков, 2011; Яблоков, Тикунов, 2016]	Инвентаризация, систематизация, анализ, визуализация и популяризация информации для рекреационного природопользования: территориальное планирование, рекреационный мониторинг, биоразнообразие, сценарии развития, прогноз, управление. Среда ArcGIS
Веб-ГИС ООПТ	Заповедник Белогорье, ООПТ	Заповедник, энтузиасты ² [Украинский, Пожванов, 2013; Яблоков, Тикунов, 2016]	Систематизация, хранение, публикация архивных и новых карт, обеспечение исследований и практик. Почвы, рельеф, лесотипология, дороги, усадьба, растения, гидрография, учет копытных и др. Дифференцированный доступ
Геоинформационная модель экогеологического городского парка	Центр г. Тюмени, городской	Тюменский государственный университет, Региональная общественная организация «Будущее Тюменской геологии» [Брехунцов, Петров, 2022]	Выделение и разграничение территории иницируемого экогеологического парка. Три зоны перспективного функционального использования долины р. Тюменки: историко-археологическая, геологическая и ландшафтно-экологическая
Археологическая ГИС	Северо-Западная Колхида (Абхазия и район Большого Сочи), Республиканский	Институт археологии РАН, Субтропический научный центр РАН [Требелева и др., 2022]	Археологическое изучение, исторический анализ, прогноз, охрана. Историко-культурные памятники, ландшафтные условия, ортофотопланы, цифровые модели местности, съемка с БПЛА, планы памятников, 3D-модели, профили, видеоролики, исторические карты
Геопортал старых карт г. Москвы (картографическая информационная система территориального развития г. Москвы)	г. Москва, городской	Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК) ³ [Загребин, Шмелев, 2016]	Геопортал старых карт (картографическая ИС) с информацией о динамике границ города и памятниках наследия на основе картографических, текстовых и справочно-статистических материалов. Информация привязана и подготовлена к работе в ГИС

¹ Информационная система «Таймырский заповедник». Электронный ресурс: <http://taimyr.info/> (дата обращения 08.01.2024)

² Прототип веб-ГИС по природному заповеднику «Белогорье» и учебно-научной базе СПбГУ «Дубрава». Электронный ресурс: <https://pozhvanov.com/science/belmap/> (дата обращения 08.01.2024)

³ Картографическая информационная система территориального развития г. Москвы. Картографический факультет МИИГАиК. Электронный ресурс: <https://kartfak.ru/2023/03/13/картографическая-информационная-сис/> (дата обращения 18.02.2024)

Атлас государственных природных заповедников России, геопортал	Российская Федерация, федеральный	Русское географическое общество, Институт географии РАН, НП «Прозрачный мир — технологии доступа к данным дистанционного зондирования Земли», Роскартография ¹ [Горбатовский и др., 2017]	Первый атлас государственных природных заповедников России, содержащий карты 107 заповедников с экологическими маршрутами, тексты об объектах географии, природного и культурного наследия и их фото. Иллюстративно-справочное издание для широкого круга читателей (традиционный атлас, размещенный на геопортале)
Электронный атлас Москвы, геопортал	Москва, городской	Департамент информационных технологий г. Москвы, 2ГИС ²	Отражение всех городских объектов, в т. ч. памятников природного и культурного наследия (без классификаций) на картах и панорамах с возможностью измерения расстояний и площадей
Проекты атласных информационных систем			
АИС устойчивого развития регионов Сибири	Сибирские регионы России, федеральный	Институт географии и другие институты СО РАН [Батуев, 2006]	Мультимедийная интегральная электронная АИС Сибири, включающая большое количество эволюционно-исторических, национально-религиозных, природно-ресурсных и др. разнообразных и мультимасштабных данных (макрорегиональный (общесибирский), региональный (областной, краевой, республиканский), локальный (районный и муниципальный) уровни, отображение информации по проблемным узлам и ареалам)
АИС для обеспечения социально-экономического развития Байкальского региона	Бассейн оз. Байкал (объект Всемирного наследия ЮНЕСКО), международный	Институт географии СО РАН, Байкальский институт природопользования СО РАН, Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН, МГУ имени М. В. Ломоносова [Батуев и др., 2019]	Единая комплексная и многоуровневая АИС бассейна Байкала с особым режимом природопользования, для решения проблем экологически и экономически сбалансированного развития Байкальского региона; включает информацию двух ранее изданных и одного нового атласа Байкальского региона (более 400 карт разных масштабных уровней)
АИС для сохранения природного наследия в мегаполисе (Москва)	ООПТ и ООЗТ Москвы, городской	МГУ имени М. В. Ломоносова [Маркова, 2023]	Полное и современное информационное обеспечение городских ООПТ (ООЗТ для новых территорий), отражающее требуемую информацию наилучшим образом и облегчающее принятие управленческих решений. Необходимы разделы об ООПТ (ООЗТ) в целом, охраняемых видах биоты и сообществах живых организмов, природных комплексах, культурных

¹ 001–005. Атлас государственных природных заповедников России. Геопортал Русского географического общества. Электронный ресурс: <https://geportal.rgo.ru/record/4393> (дата обращения 16.02.2024)

² Электронный атлас Москвы. Электронный ресурс: <https://atlas.mos.ru/?lang=ru&z=8&ll=37.47059742963921%2C55.824770883714336> (дата обращения 17.02.2024)

			ландшафтах и их динамике, преобразовании и переустройстве ООПТ, оценке и прогнозе изменений объектов природного наследия
АИС городской особо охраняемой природной территории	Природно-исторический парк «Москворецкий», ООПТ, региональный	МГУ имени М. В. Ломоносова [Маркова, 2021]	АИС крупного многоуровневого природно-исторического парка, состоящего из ряда парков (10 основных участков), включающих в себя ценные природные и культурные объекты (в т. ч. федерального значения) и культурные ландшафты. Отражение состояния и динамики культурных ландшафтов, фиксация конфликтов природопользования (в основном связанных со строительством на землях ООПТ)
АИС городской особо охраняемой природной территории	Природно-исторический парк «Покровское-Стрешнево», ООПТ, локальный	МГУ имени М. В. Ломоносова [Маркова, Емельянова, 2022]	АИС природно-исторического парка, созданная по краудсорсинговым ресурсам. Охрана исторического культурного ландшафта усадебного парка, ценных природных объектов. Выявление экологических нарушений, вызванных масштабным переустройством среды парка (уничтожение и угнетение растительного покрова, животных, почв, излишние дороги, освещение, воздействие техники и др.)
АИС городской особо охраняемой природной территории	Природный заказник «Воробьевы горы» (Москва), ООПТ, локальный	МГУ имени М. В. Ломоносова [Лукьянов, Маркова, 2023]	АИС территории ООПТ для обеспечения природоохранного природопользования и снижения рекреационной нагрузки. Учет биоразнообразия, эстетической ценности пейзажей, объектов, природного, историко-культурного наследия, культурных ландшафтов, рекреационных объектов, функционального зонирования территории и экологического состояния природной среды

Обобщая данные таблицы, можно сказать, что атласные информационные системы в области охраны природного и культурного наследия РФ могут относиться как к отдельным ООПТ, так и к серии ООПТ определенной территории (например, Московского мегаполиса), к крупным объектам Всемирного наследия ЮНЕСКО (Байкал), к локальному, городскому, областному, региональному и федеральному уровням; для некоторых из них характерен принцип полимасштабности.

Разработка АИС может быть инициирована научными, учебными заведениями, Русским географическим обществом, различными ведомствами и организациями, руководством ООПТ и просто энтузиастами.

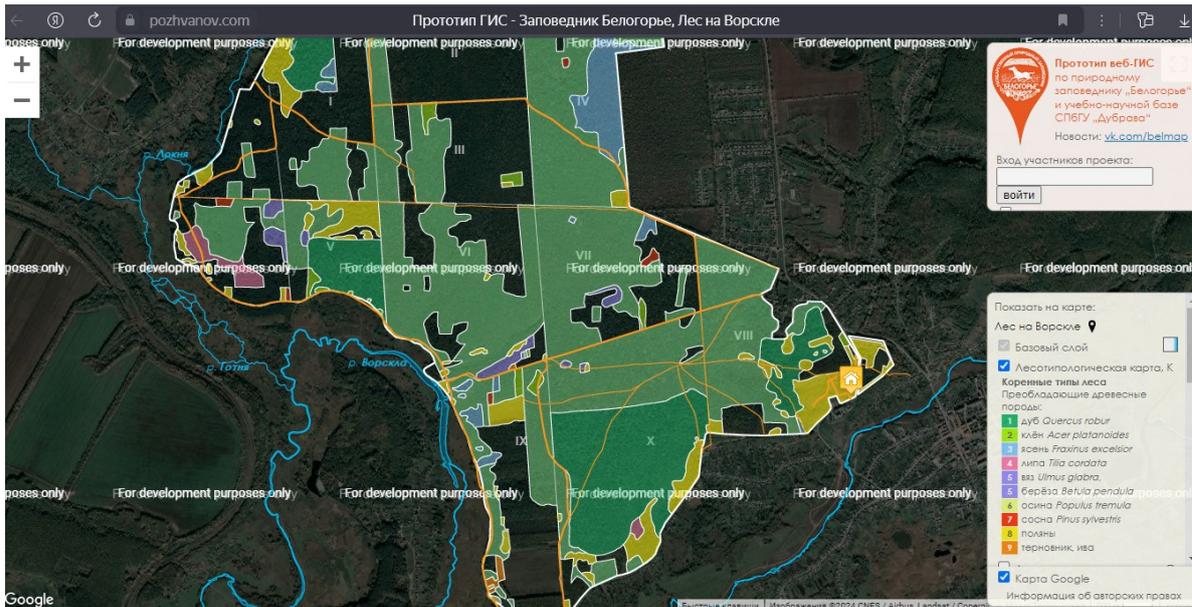


Рис. 3. Страница веб-ГИС заповедника Белогорье и учебно-научной базе СПбГУ «Дубрава». Лесотипологическая карта. Коренные типы леса
Fig. 3. Web GIS page of the Belogorye Reserve and the educational and scientific base of St. Petersburg State University "Dubrava". Forest typological map. Indigenous forest types



Рис. 4. Страница геопортала старых карт г. Москвы.
Карта 1935 г. с древними рубежами города
Fig. 4. Page of the geoportals of old maps of Moscow.
Map of 1935 with ancient city boundaries

Атласные информационные системы призваны решать следующие обобщенные задачи:

- интеграция данных о памятниках природного и культурного наследия из различных источников, возможно совместно с другими географическими данными;

- создание различных тематических блоков (природных, историко-культурных, археологических и других);
- интеграция и создание картографических, панорамных, трехмерных, текстовых и мультимедийных данных об объектах наследия и территориях их размещения с возможностью выбора необходимых характеристик и способов изображения;
- информирование об экологических нарушениях на территориях ООПТ;
- создание пособий для учащихся, научных работников, краеведов, туристов;
- разработка сценариев развития, прогноза, управления;
- территориальное планирование ООПТ;
- обеспечение соблюдения особого режима природопользования;
- сохранение традиционных культурных ландшафтов.

ВЫВОДЫ

Атласные информационные системы весьма перспективны для отображения объектов природного и культурного наследия, в т. ч. благодаря широким возможностям синтезирования картографической и иной, мультимедийной информации. Несмотря на выраженный интерес и перспективы создания АИС, разработанных и действующих систем такого типа в Российской Федерации пока немного.

Подобная АИС должна явиться местом концентрации упорядоченных данных о состоянии природных и культурных объектов государственной охраны и перспективных для постановки на охрану, а также об утраченных объектах наследия. Информация о культурных ландшафтах как об объектах традиционного взаимодействия человека и природы, их состоянии, динамике и перспективах развития также может и должна содержаться в подобной системе.

Данные, содержащиеся в АИС, должны обрабатываться современными способами и технологиями. Важен также вопрос отражения образа объектов наследия и культурных ландшафтов в атласной информационной системе, поскольку представление об объекте весьма важно для всех имеющих профессиональное отношение или интересующихся данной темой. Отражение образов лучше всего возможно реализовать в мультимедийной АИС.

Использование атласных информационных технологий дает возможность сочетания в одном хранилище данных как по природному, так и по культурному наследию; в настоящее время эти данные относятся к разным ведомствам и хранятся разрозненно.

Российские атласные информационные системы в области охраны наследия в ближайшем будущем имеют шанс перейти от стадии проектирования к стадиям постепенной реализации и функционирования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках темы госбюджета № 121051100163-3 «Изучение динамики социоприродных систем с использованием геоинформационного картографирования и цифровых технологий».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out within the framework of the state budget topic No. 121051100163-3 “Studying the dynamics of socio-natural systems using geoinformation mapping and digital technologies”.

ЛИТЕРАТУРА

- Архипова О. Е., Лычагина Ю. М.* Атласная информационная система оценки устойчивого развития прибрежной зоны Азовского моря. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф., 2018. Т. 24. Ч. 1. С. 68–74. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-68-74.
- Баженова Е. А.* Атласная информационная система социальной тематики Южного федерального округа РФ. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. географ. наук (спец. 25.00.35 — «Геоинформатика»). М.: МГУ имени М. В. Ломоносова, 2009. 25 с.
- Баженова Е. А.* Характеристика социальной напряженности с помощью атласной информационной системы. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2008. № 4. С. 59–63.
- Батуев А. Р.* Атласная информационная система устойчивого развития регионов Сибири. Гео-Сибирь, 2006. Т. 1. № 2. С. 179–188.
- Батуев А. Р., Батуев Д. А., Бешенцев А. Н., Богданов В. Н., Дашилов Ц. Б., Корытный Л. М., Тикунов В. С., Федоров Р. К.* Атласная информационная система для обеспечения социально-экономического развития Байкальского региона. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2019. Т. 25. Ч. 1. С. 66–80. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-66-80.
- Брехунцов А. М., Петров Ю. В.* Геоинформационное моделирование проекта экогеологического парка в сложных социальных и экологических условиях центра г. Тюмени. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 629–644. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-629-644.
- Горбатовский В. В., Тишков А. А., Краюхин А. Н., Данилова И. В., Белоновская Е. А., Соболев Н. А., Титова С. В.* Атлас государственных природных заповедников России. М.: Русское географическое общество, Институт географии РАН, НП «Прозрачный мир — технологии доступа к данным дистанционного зондирования Земли», Роскартография, 2017. 512 с.
- Грушина А. В., Тесленок С. А., Муштайкин А. П.* Использование геоинформационных технологий для создания электронного атласа административного района. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 2. С. 89–101. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-89-101.
- Завадская А. В., Яблоков В. М.* Применение геоинформационных технологий для устойчивого развития рекреационного природопользования на ООПТ Камчатского края. Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт. Материалы международной конференции. Белокуриха, Денпасар, 14–19 декабря 2011 г. Барнаул: ИВЭП, 2011. С. 392–401.
- Загребин Г. И., Шмелев В. К.* Создание геопортала старых карт города Москвы. Историко-культурное наследие Басманного района Москвы. Материалы Международной научно-практической конференции, 7–8 октября 2015 г. М.: Изд-во Высшей школы экономики, 2016. С. 54–56.
- Лукьянов Л. Е., Маркова О. И.* Объекты природного и культурного наследия и эстетически ценные пейзажи на территории природного заказника «Воробьевы горы» в атласной информационной системе. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение

устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2023. Т. 29. Ч. 2. С. 518–535. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-2-29-518-535.

Манаков А. Г., Вампилова Л. Б., Соколова А. А. Электронный этнокультурно-ландшафтный атлас Псковской области как познавательный геоинформационный ресурс. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 4. С. 461–473. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-4-27-461-473.

Маркова О. И. Атласная информационная система для сохранения природного наследия в мегаполисе. Вестник МГПУ. Серия «Естественные науки», 2023. № 1(49). С. 74–87. DOI: 10.25688/2076-9091.2023.49.1.6.

Маркова О. И. Принципы включения данных об экологическом состоянии природно-исторических парков мегаполисов в атласную информационную систему (на примере парка «Москворецкий»). ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 3. С. 387–408. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-387-408.

Маркова О. И., Емельянова Л. Г. Перспективы создания атласной информационной системы на территорию ООПТ мегаполиса с использованием краудсорсинговых ресурсов (на примере парка Покровское-Стрешнево). ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 696–711. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-696-711.

Сопнев Н. В., Белозеров В. С. Атласная информационная система «Иностранцы студенты в России». ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2023. Т. 29. Ч. 2. С. 44–58. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-2-29-44-58.

Сопнев Н. В., Белозеров В. С., Панин А. Н. Атласная информационная система «Региональные столицы Юга Европейской России». ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 2. С. 172–187. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-172-187.

Тикунов В. С., Панин А. Н., Гайдуков В. Р. Атласная информационная система для формирования интегральных индексов социально-экономического развития территорий. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2023. № 4. С. 66–74. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.6.

Тикунов В. С., Чихарев И. А., Панин А. Н., Рыльский И. А. Атласная информационная система «Геополитическая ситуация в Большом Средиземноморье»: принципы создания и технология пространственного анализа. Наука. Инновации. Технологии, 2019. № 3. С. 107–114.

Тимонин С. А. Атласная демографическая информационная система России. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. географ. наук (спец. 25.00.33 — «Картография»). М.: МГУ имени М. В. Ломоносова, 2013. 24 с.

Требелева Г. В., Глазов К. А., Юрков В. Г., Кизилев А. С. Археологическая ГИС Северо-Западной Колхиды: инструмент для сохранения и исследования объектов историко-культурного наследия. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 2. С. 484–498. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-484-498.

Украинский П. А., Пожванов Г. А. Веб-ГИС заповедника «Белогорье»: разработка, назначение, специфика. ГИС и заповедные территории. Материалы научно-методического семинара 13–14 апреля 2013 г., Харьковская обл., Краснокутский р-н, с. Владимировка. Харьков–Мадрид, 2013. С. 26–29.

Черкасов А. А. Атласная информационная система «Большие города России»: особенности разработки и возможности применения. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф., 2021. Т. 27. Ч. 2. С. 5–16. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-5-16.

Черкасов А. А., Махмудов Р. К. Атласная информационная система «Население Ставропольского края». Геодезия и картография, 1922. № 12. С. 31–39. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-990-12-31-39.

Яблоков В. М., Тукунов В. С. Атласные информационные системы для устойчивого развития территорий. ИнтерКарто. ИнтерГИС 22. Материалы Междунар. конф. Протвино, 2016. Т. 1. С. 13–33.

Яно К., Накайя Т., Изода Ю., Кавасуми Т. Четырехмерная ГИС «Виртуальный Киото». Виртуальные географические среды. Пер. с англ. 2-е изд. Краснодар: Краснодарская панорама досуга, 2015. С. 81–102.

Atlas of Switzerland. Interactive: CD-ROM with accompanying textbook. Swiss Federal Office of Topography, Wabern, 2000.

Atlas of Switzerland. Intro. Web resource: https://www.atlasderschweiz.ch/103_ads1_theme_overview_english/ (accessed 10.02.2024).

Hurni L. Atlas information systems. Encyclopedia of GIS. Springer, Cham, 2017. P. 85–92. DOI: 10.1007/978-3-319-17885-1_847.

Hurni L. Multimedia atlas information systems. Encyclopedia of GIS. Springer, 2008. P. 759–763.

Kelnhofner F., Pammer A., Schimon G. Prototype of an interactive multimedia atlas of Austria. Multimedia Cartography. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1999. P. 87–97.

Lambrecht C. Project “Atlas of the Federal Republic of Germany”. Multimedia Cartography. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1999. P. 149–154.

Ögren P. The new PC-Atlas of Sweden. Proc. 18th ICA. ACI Intern. Cartographic Conference ICC, Stockholm, 1997. P. 2262–2267.

Ormeling F. Atlas information systems. Conf. and 10th Gen. Assembly ICA. Barcelona, Sept. 3rd – 9th, 1995. Proc. V. 2. Barcelona, 1995. P. 2127–2133.

Ramos C.-da S., Cartwright W. Atlases from paper to digital medium. Geo-Hypermedia’05. Proceedings of the 1st International Workshop on Geographic Hypermedia, Denver, Colorado, USA, 2005. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. P. 97–119. DOI: 10.1007/978-3-540-34238-0_6.

The Atlas of Canada. Web resource: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/maps/atlas-canada/10784> (accessed 10.02.2024).

Wastenson L., Arnberg W. The new national atlas of Sweden completed: Seventeen books and an electronic atlas. Proc. 18th ICA/ ACI Intern. Cartographic Conference ICC. Stockholm, 1997. P. 2162–2169.

Wright B. The national atlas of the United States of America. Proc. Seminar on Electronic Atlases and National Atlas Information Systems in the Information Age. Reykjavik, 1999. P. 3.

REFERENCES

Arkhipova O. E., Lychagina Yu. M. Atlas information system of estimation of sustainable development of the coastal zone of the Azov Sea. InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International conference, 2018. V. 24. Part 1. P. 68–74 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-68-74.

Atlas of Switzerland. Interactive: CD-ROM with accompanying textbook. Swiss Federal Office of Topography, Wabern, 2000.

Atlas of Switzerland. Intro. Web resource: https://www.atladerschweiz.ch/103_ads1_theme_overview_english/ (accessed 10.02.2024).

Batuev A. R. Atlas information system of sustainable development of Siberian regions. Geo-Siberia, 2006. V. 1. No. 2. P. 179–188(in Russian).

Batuev A. R., Batuev D. A., Beshentsev A. N., Bogdanov V. N., Dashpilov Ts. B., Korytniy L. M., Tikunov V. S., Fedorov R. K. Atlas information system for providing socio-economic development of the Baikal region. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2019. V. 25. Part 1. P. 66–80 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-66-80.

Bazhenova E. A. Atlas information system of social topics of the Southern Federal District of the Russian Federation. Abstract of diss. for the degree of PhD in Geographical Sciences (spec. 25.00.35 — “Geoinformatics”). Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2009. 25 p. (in Russian).

Bazhenova E. A. Characteristics of social tension using the atlas information system. Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5. Geografiya (Lomonosov Geography Journal. Series 5. Geography), 2008. No. 4. P. 59–63 (in Russian).

Brekhuntsov A. M., Petrov Yu. V. Geoinformation modeling of the project of eco-geological park in difficult social and environmental conditions of the center of Tyumen. 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. 629–644 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-629-644.

Cherkasov A. A. Atlas information system “Big cities of Russia”: features of development and possibilities of application. 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. 5–16 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-5-16.

Cherkasov A. A., Makhmudov R. K. Atlas information system “Population of Stavropol Krai”. Geodesy and Cartography, 1922. No. 12. P. 31–39 (in Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2022-990-12-31-39.

Gorbatovskiy V. V., Tishkov A. A., Krayukhin A. N., Danilova I. V., Belonovskaya E. A., Sobolev N. A., Titova S. V. Atlas of state nature reserves of Russia. Moscow: Russian Geographical Society, Institute of Geography of the RAS, Non-profit Partnership “Transparent World”, Roscartography, 2017. 512 p. (in Russian).

Grushina A. W., Teslenok S. A., Mushtaykin A. P. Using modern technologies to create an electronic atlas of the administrative district. 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. 89–101 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-89-101.

Hurni L. Atlas information systems. Encyclopedia of GIS. Springer, Cham, 2017. P. 85–92. DOI: 10.1007/978-3-319-17885-1_847.

- Hurni L.* Multimedia atlas information systems. Encyclopedia of GIS. Springer, 2008. P. 759–763.
- Kelnhofner F., Pammer A., Schimon G.* Prototype of an interactive multimedia atlas of Austria. Multimedia Cartography. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1999. P. 87–97.
- Lambrecht C.* Project “Atlas of the Federal Republic of Germany”. Multimedia Cartography. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1999. P. 149–154.
- Lukyanov L. E., Markova O. I.* Natural and cultural heritage objects and aesthetically valuable landscapes on the territory of the Vorobyovy Gory Nature Reserve in the atlas information system. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2023. V. 29. Part 2. P. 518–535 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2023-2-29-518-535.
- Manakov A. G., Vampilova L. B., Sokolova A. A.* Electronic ethnocultural and landscape atlas of the Pskov region as an educational geoinformational resource. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2021. V. 27. Part 4. P. 461–473 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-4-27-461-473.
- Markova O. I.* Atlas information system for the conservation of natural heritage in a metropolis. The Academic Journal of Moscow City University. Series “Natural Sciences”, 2023. No. 1(49). P. 74–87. DOI: 10.25688/2076-9091.2023.49.1.6.
- Markova O. I.* Principles of incorporating data about the environmental condition of natural-historical parks of metropolises in the atlas information system (on the example of the Moskvoretsky park). InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2021. V. 27. Part 3. P. 387–408 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-387-408.
- Markova O. I., Emelyanova L. G.* Prospects for creating the atlas information system to the SPNA territory of the metropolis by using crowdsourcing resources (on the example of Pokrovskoye-Streshnevo park). 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. 696–711 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-696-711.
- Ögren P.* The new PC-Atlas of Sweden. Proc. 18th ICA. ACI Intern. Cartographic Conference ICC, Stockholm, 1997. P. 2262–2267.
- Ormeling F.* Atlas information systems. Conf. and 10th Gen. Assembly ICA. Barcelona, Sept. 3rd – 9th, 1995. Proc. V. 2. Barcelona, 1995. P. 2127–2133.
- Ramos C.-da S., Cartwright W.* Atlases from paper to digital medium. Geo-Hypermedia’05. Proceedings of the 1st International Workshop on Geographic Hypermedia, Denver, Colorado, USA, 2005. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. P. 97–119. DOI: 10.1007/978-3-540-34238-0_6.
- Sopnev N. V., Belozarov V. S.* Atlas information system “Foreign students in Russia”. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2023. V. 29. Part 2. P. 44–58. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-2-29-44-58 (in Russian).
- Sopnev N. V., Belozarov V. S., Panin A. N.* Atlas information system “Regional Capitals of Southern European Russia”. 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. 172–187 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-172-187.

The Atlas of Canada. Web resource: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/maps/atlas-canada/10784> (accessed 10.02.2024).

Tikunov V. S., Chikharev I. A., Panin A. N., Rylskiy I. A. Atlas information system “Geopolitical situation in the Greater Mediterranean”: Principles of creation and technology of spatial analysis. Science. Innovations. Technologies, 2019. No. 3. P. 107–114 (in Russian).

Tikunov V. S., Panin A. N., Gaidukov V. R. Atlas information system for producing integral indices of the socio-economic development of territories. Lomonosov Geography Journal, 2023. No. 4. P. 66–74 (in Russian). DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.6.

Timonin S. A. Atlas demographic information system of Russia. Abstract of diss. for the degree of Cand. in Geographical Sciences (25.00.33 — “Cartography”). Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2013. 24 p. (in Russian).

Trebeleva G. V., Glazov K. A., Yurkov V. G., Kizilov A. S. Archaeological GIS of North-Western Colchis: A tool for preserving and studying historical and cultural heritage sites. InterCarto. InterGIS. Geoinformation support for sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Faculty of Geography, Moscow State University, 2022. V. 28. Part 2. P. 484–498 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-484-498.

Ukrainsky P. A., Pozhvanov G. A. Web GIS of the Belogorye Nature Reserve: development, purpose, specificity. GIS and protected areas. Proceedings of the scientific and methodological seminar April 13–14, 2013, Kharkiv region, Krasnokutsky district, Vladimirovka village. Kharkiv–Madrid, 2013. P. 26–29 (in Russian).

Wastenson L., Arnberg W. The new national atlas of Sweden completed: Seventeen books and an electronic atlas. Proc. 18th ICA/ ACI Intern. Cartographic Conference ICC. Stockholm, 1997. P. 2162–2169.

Wright B. The national atlas of the United States of America. Proc. Seminar on Electronic Atlases and National Atlas Information Systems in the Information Age. Reykjavik, 1999. P. 3.

Yablokov V. M., Tikunov V. S. Atlas information systems for sustainable development of territories. InterCarto. InterGIS 22. Proceedings of the International conference, 2016a. V. 1. P. 13–33 (in Russian).

Yano K., Nakaya T., Izoda Y., Kawasumi T. Four-dimensional GIS “Virtual Kyoto”. Virtual geographic environments. Translated from English. 2nd ed. Krasnodar: Krasnodar leisure panorama, 2015. P. 81–102 (in Russian).

Zagrebin G. I., Shmelev V. K. Creation of a geoportal of old maps of the city of Moscow. Historical and cultural heritage of the Basmany district of Moscow. Proceedings of the International scientific and practical conference, October 7–8, 2015. Moscow: Publishing House of the Higher School of Economics, 2016. P. 54–56 (in Russian).

Zavadskaya A. V., Yablokov V. M. Application of geoinformation technologies for sustainable development of recreational nature management in protected areas of Kamchatka Krai. Sustainable development of territories: GIS theory and practical experience. Proceedings of the International conference. Belokurikha, Denpasar, December 14–19, 2011. Barnaul: IWEP, 2011. P. 392–401 (in Russian).

УДК: 911.9(502.5)

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-23-36

Т. М. Красовская¹, А. В. Евсеев², М. В. Слипечук³, С. К. Белоусов⁴

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ КОНФЛИКТОВ В АНТАРКТИДЕ НА ФОНЕ УСИЛЕНИЯ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ И ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

АННОТАЦИЯ

На основании анализа тематических публикаций, статистических и правовых материалов, собственного опыта полевых исследований в полярных широтах рассматривается проблема возникновения потенциальных экологических конфликтов в Антарктиде на фоне усиления антропогенного воздействия и современного потепления климата. Освещаются юридические документы, регулирующие статус Антарктиды как объекта международных научных исследований. Показана опасность утраты этого статуса для сохранения экосистем Антарктиды. Рассмотрены современные факторы, увеличивающие антропогенную нагрузку на материковые экосистемы: увеличение численности постоянного и временного населения за счет роста числа исследовательских станций и туризма; развитие инфраструктуры научных станций (транспортной, очистных сооружений, теплоснабжения и т. п.); различные проявления локального загрязнения и выпадения загрязняющих веществ в результате дальнего атмосферного переноса; механические нарушения, связанные со строительством дорог; рекреационная дигрессия; занос инвазивных видов растений и др. Отмечено начало формирования очагового селитебного и рекреационного природопользования, создающих угрозу биоразнообразию. Рассматривается потенциальная угроза сохранению экосистем при разделе Антарктиды на национальные сектора и начале разработки полезных ископаемых. Текущие антропогенные изменения анализируются на фоне потепления климата, которое идет в два раза быстрее общемирового. Проведен пространственный анализ наблюдаемых антропогенных и климатически обусловленных изменений, создающих кумулятивный эффект. На основании полученных материалов была составлена карта территорий, где возможно возникновение экологических конфликтов разного генезиса. Сделана попытка определить необходимую площадь экологического каркаса при усилении хозяйственного освоения материка, основанная на опыте аналогичных исследований в Арктике. Допустимая площадь хозяйственного освоения оценена в 4,5 % при современной в 2 %.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Антарктида, экологические конфликты, изменение климата, природопользование

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

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: avevseev@yandex.ru

³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: slip@metropol.ru

⁴ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: web-town@mail.ru

Tatiana M. Krasovskaya¹, Alexander V. Evseev², Michail V. Slipenchuk³,
Stanislav K. Belousov⁴

SPATIAL ANALYSIS OF POTENTIAL ENVIRONMENTAL CONFLICTS IN ANTARCTICA AT THE BACKGROUND OF ANTHROPOGENIC PRESSURE INCREASE AND CLIMATE CHANGE

ABSTRACT

The problem of potential environmental conflicts in Antarctica at the background of anthropogenic impact growth and modern climate warming is considered based on the analysis of thematic publications, statistical and legal materials, and own field experience in the polar latitudes. The legal documents regulating the status of Antarctica as an object of international scientific research are highlighted. The danger of losing this conservation status for Antarctic ecosystems is shown. Modern factors that increase the anthropogenic load on continental ecosystems are considered: an increase of permanent and temporary population due to growth of research stations number and tourism, scientific stations infrastructure development (transport, sewage treatment plants, heat supply, etc.), various manifestations of local pollution and deposition of pollutants as a result. The start of nuclei residential and recreational nature management, which pose a threat to biodiversity, was marked. A potential threat to ecosystems' preservation is discussed in the case of Antarctica division into national sectors and mining activities starting. Current anthropogenic changes are analyzed at the background of climate warming, which is twice as fast as the global one. Spatial analysis of the observed anthropogenic and climate-related changes creating a cumulative effect was done. A map of territories with possible environmental conflicts of different genesis, based on the received materials was compiled. An attempt to determine the necessary area for the ecological framework in case of the continent's economic development growth was undertaken, based on the experience of similar research in the Arctic. The permissible area of economic development was estimated at 4.5 %, while the current one was 2 %.

KEYWORDS: Antarctica, ecological conflicts, climate change, nature management

ВВЕДЕНИЕ

Многие десятилетия после открытия Антарктиды в 1820 г. русской экспедицией под руководством Ф. Беллинсгаузена и М. Лазарева этот материк оставался вне экономических, научных и геополитических интересов стран мира. Догадки о его существовании высказывались еще в древнем мире, а в XVI в. уже появилась карта османского адмирала и картографа Пири Рейса, составленная на основе описаний мореплавателей в Южном океане, достаточно точно отображавшая очертания этого материка. Постепенно прилегающая акватория стала все активнее использоваться для рыбного и китобойного промыслов, что привело к открытию многих антарктических островов. Развитие капитализма в конце XIX – начале XX вв. стимулировало возросший интерес многих развитых стран к рас-

¹ Lomonosov Moscow State University, Geographical Faculty, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: krasovskt@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Geographical Faculty, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: avevseev@yandex.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Geographical Faculty, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: slip@metropol.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Geographical Faculty, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: web-town@mail.ru

ширению своей ресурсной базы путем открытия «новых земель», а за экспедициями в Арктике последовали антарктические: Р. Амундсена, Р. Скотта, Р. Бэрда и др. Научно-техническая революция середины XX в. создала условия для начала научного исследования Антарктиды. В 40–50-х гг. XX в. формируется сеть наземных станций и баз, результатом работы которых явилось открытие, среди прочего, богатых ресурсов топливно-энергетического и минерального сырья, интерес в разработке которых проявили многие государства. Международный договор 1959 г.¹ установил правовой режим и создал систему международного управления антарктическим континентом и рядом примыкающих к нему островов, шельфовых ледников и морских акваторий, отводящую Антарктиде роль «научного полигона». В 1988 г. участники Договора предприняли попытку обсудить возможность добычи полезных ископаемых, которая завершилась принятием соответствующей Конвенции. Однако она так и не вступила в силу, а в 1991 г. был подписан Мадридский протокол², запрещающий разработку полезных ископаемых в Антарктиде. Усиливающийся в XXI в. «ресурсный голод», включая дефицит пресной воды, 90 % запасов которой содержат ледники Антарктиды, побуждает многие страны заявлять свои интересы на хозяйственное использование материка. Процессы потепления климата создают относительно благоприятные условия для этого, усиливая стремление экономического освоения Антарктиды. Это приводит к тенденции постепенной утраты ей статуса территории с неизменной природой. Целью настоящего исследования является пространственный анализ возможности появления зон экологической напряженности разного генезиса в Антарктиде в ближайшие годы в связи с усилением присутствия человека на нем и современных изменений климата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалами для исследования послужили тематические публикации, картографические материалы Атласа Антарктики (1966 г.), статистические данные международных организаций (UNEP, SCAR Antarctic Digital Database, IPPC и др.), а также опыт подобных работ авторов в Арктике, полевые наблюдения одного из них в Антарктиде во время строительства новой станции «Восток». Основными методами исследования стали системный, геоэкологический и картографический.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Возникновение потенциальных экологических конфликтов в Антарктиде, вероятность которых проявилась в настоящее время, связана с увеличением антропогенного воздействия как на самой территории, так и в мире в целом, т. к. в результате дальнего атмосферного переноса поллютанты попадают в Антарктиду и аккумулируются на этом материке. Провоцируется оно и потеплением климата. Если до середины XX в. Антарктида принадлежала к ненарушенным хозяйственной деятельностью территориям, то в настоящее время уже можно говорить о развитии там очагового природопользования, ядра которого продолжают увеличиваться и количественно, и в пространстве. При этом расширились и виды природопользования: при крупных научных станциях появились ареалы/ядра селитебного, транспортного (аэродромы, дороги), сельскохозяйственного природопользования (тепличные хозяйства), рекреационного (туризм). Туристическому освоению материка и

¹ Установил правовой режим и создал систему международного управления для Антарктиды. Является первым международно-правовым актом, провозгласившим отдельный регион планеты зоной мира, свободной от ядерного и других видов оружия, территорией, где запрещена любая военная деятельность. Электронный ресурс: <http://www.base.garant.ru> (дата обращения 20.02.2024)

² Протокол по охране окружающей среды (1991 г.), является дополнительным правовым документом к Договору об Антарктике. Электронный ресурс: <http://www.pravo.gov.ru> (дата обращения 25.02.2024)

его достигаемости способствовало потепление климата. В XXI в. для многих частей региона отмечается рост среднегодовых температур воздуха, который идет в два раза быстрее общемирового. Каждое десятилетие температура повышается на $0,61 \pm 0,34 \text{ }^\circ\text{C}^1$ [Clem et al., 2020].

Факторы, провоцирующие возникновение экологических конфликтных ситуаций

Основными факторами, способствующими усилению антропогенной нагрузки на природную среду, являются следующие:

- увеличение численности населения;
- расширение территорий, занятых научными станциями и их инфраструктурой;
- локальное загрязнение окружающей среды, сопряженное с работой научных станций и туризмом;
- накопление загрязняющих веществ в результате дальнего атмосферного переноса.

Условно к таким факторам можно отнести и ускоренное таяние ледникового покрова, связанное с антропогенным влиянием на потепление климата. Рассмотрим эти факторы.

Локальное загрязнение природной среды в результате увеличения постоянного (круглогодичного) и временного (сезонного) населения, если к таковому можно отнести сотрудников научных станций, транспортников и т. д. растет с каждым годом. Сезонная численность населения превышает уже 4 000 чел., а постоянная — более 1 000 чел. Наиболее крупные очаги сосредоточения населения на полярных станциях разных стран показаны на рис. 1.

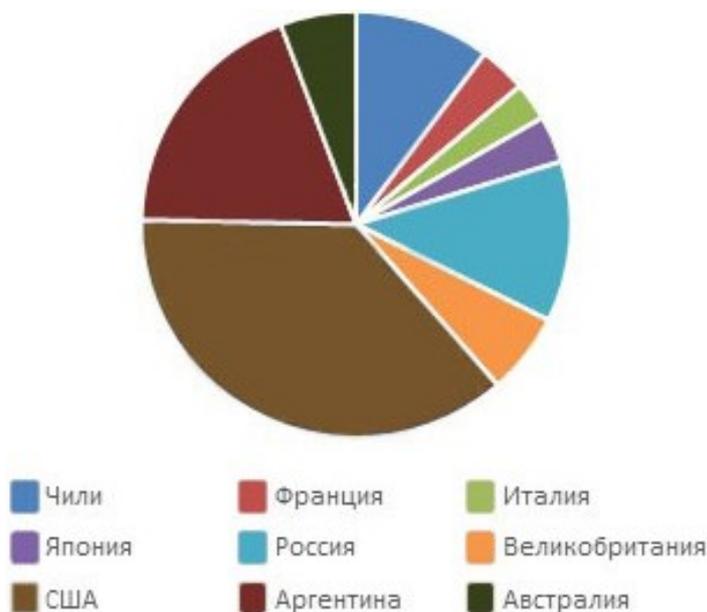


Рис. 1. Распределение персонала наиболее населенных станций в летний сезон. Составлено по данным the World Factbook²
Fig. 1. The distribution of personnel at the most populated stations during the summer season. Based on the World Factbook

¹ IPCC Sixth Assessment Report, 2021. Электронный ресурс: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (дата обращения 05.12.2023)

² World factbook. Antarctica. CIA (Central Intelligence Agency), 2008. Электронный ресурс: <http://www.cia.gov> (дата обращения 15.03.2024)

Прибывающие на Антарктиду размещаются на 90 научно-исследовательских станциях, включая 7 российских и исключая законсервированные. Около половины всех станций являются сезонными. Они принадлежат России, США, Китаю, Индии, Австралии, Бразилии, Беларуси, Бельгии, Германии, Японии, Украине, Индии, Италии, Франции, Швеции, Великобритании, Южной Корее и другим странам (всего 56 государств). Первая станция была открыта в 1898–1899 гг. на мысе Адэра экспедицией Карстена Борхгревинка. Постройки этой станции сохранилась и используются как туристический объект (рис. 2).



Рис. 2. Хижины экспедиции Борхгревинка на м. Адэр, 1902 г.¹
Fig. 2. Huts of the Borchgrevink expedition on the Adair cape, 1902¹

Бум организации станций пришелся на середину XX в. и продолжился в XXI в. Хотя расселение является очаговым, можно выделить районы его концентрации, большинство из которых находятся в береговой зоне. Общая площадь этих селитебных территорий оценивается в 2 % от всей площади материка². Территории, занятые научными станциями различаются по размеру: самой большой является станция Мак-Мердо (США) площадью 663,7 тыс. м², площадь нового НЗК «Восток» (Россия) — 2,5 тыс. м², «Ноймайер 3» (ФРГ) — 1,8 тыс. м² и т. д. Численность проживающих на станциях работников меняется от зимы к лету (рис. 3).

¹ 360 cities. Электронный ресурс: <https://www.360cities.net> (дата обращения 15.03.2024);
360 cities. Web resource: <https://www.360cities.net> (accessed 15.03.2024)

² World factbook. Antarctica. CIA (Central Intelligence Agency), 2008. Электронный ресурс: <http://www.cia.gov> (дата обращения 15.03.2024)

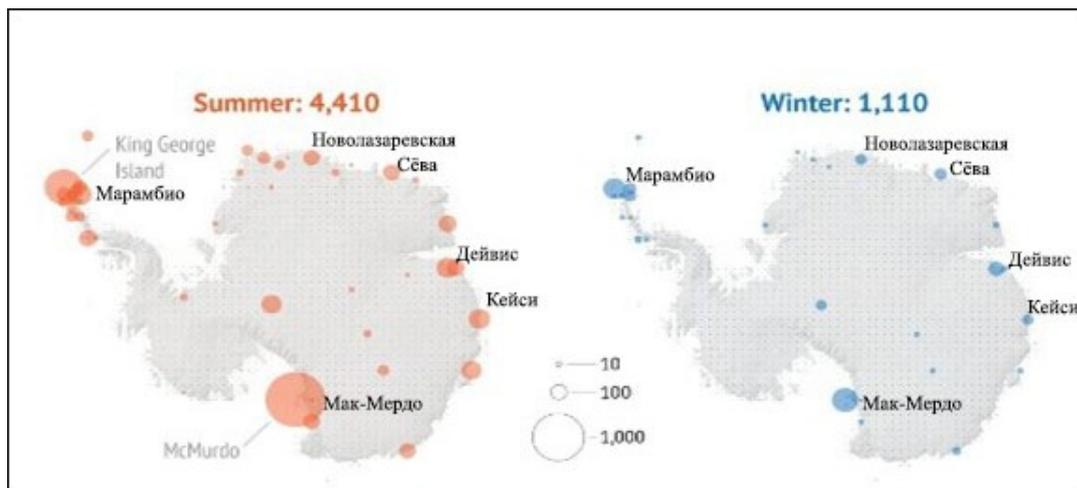


Рис. 3. Сезонная численность работников научных станций (2019)¹
Fig. 3. Seasonal number of employees of scientific stations (2019)¹

Еще более внушительный прирост временного населения произошел в результате туризма, начало развития которого относится к 50–60-м гг. XX в. В летний сезон (с конца октября по начало апреля) с 2010 по 2020 г. отмечалось увеличение потока туристов на 134 % [Cajiao et al., 2021]. В сезон 2022–2023 гг. число туристов составило уже 104 897 чел.² [Impacts..., 2023; Stoeckl et al., 2024]. Наиболее посещаемый участок — Антарктический полуостров (до 90 % всех прибывающих³) [Афанасьев, 2022] (рис. 4).

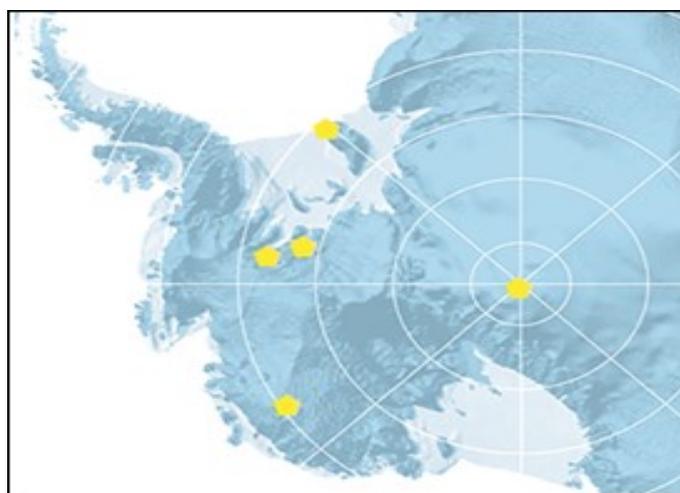


Рис. 4. Популярные туристические дестинации⁴
Fig. 4. Popular tourist destinations⁴

¹ Электронный ресурс: <https://sashamaps.net/docs/maps/population-of-antarctica/> (дата обращения 10.03.2024); Web resource: <https://sashamaps.net/docs/maps/population-of-antarctica/> (accessed 10.03.2024)

² Impacts of tourism in Antarctica. IUCN issues brief, 2023, June. Электронный ресурс: <http://www.IUCN.org> (дата обращения 05.01.2024)

³ IAATO — International Association of Antarctica Tour Operators. Электронный ресурс: <http://www.iaato.org>. (дата обращения 20.12.2023)

⁴ Электронный ресурс: <https://antarctic-logistics.com> (дата обращения 18.02.2024); Web resource: <https://antarctic-logistics.com> (accessed 18.02.2024)

Посещение может ограничиваться несколькими часами, но может длиться и дольше, когда туристы на самолете перебрасываются на какую-либо научную станцию для знакомства с работой полярников и размещаются там. В Антарктиде имеется туристический кемпинг Юнион Глейшир — палаточный лагерь, расположенный на хребте Наследия на леднике Юнион (рис. 5). Его вместимость — до 160 человек.

Ледник Юнион является местом проведения ежегодного Антарктического ледяного марафона. Несмотря на попытки регламентации туристических занятий, увеличивающееся число посетителей способствует развитию рекреационной дигрессии, т. к. механически нарушает целостность наземного растительного покрова (лишайников, злаков в местах высадки на берег с круизных судов), является фактором беспокойства для птиц и т. п. Кроме того, туристы создают дополнительную нагрузку на инфраструктуру, заносят на одежде и обуви семена инвазивных видов, которые могут вытеснять местные. Выборочное тестирование показало, что в среднем у каждого проверенного туриста обнаруживали около 10 семян в одежде и снаряжении. Среди обнаруженных чужеродных видов были исландский мак, овсяница высокая бархатная и однолетняя озимая — все они произрастают в холодном климате и способны расти в Антарктиде. За время эксперимента было собрано около 2,6 тыс. семян с вещей туристов и ученых [Chown et al., 2012].



Рис. 5. Палаточный лагерь Юнион Глейшир¹
Fig. 5. Union Glacier Campground¹

Селитебные территории продуцируют рост антропогенной нагрузки в результате загрязнения окружающей среды (хотя и в малых количествах, но повсеместно) при сжигании дизельного топлива для отопления и работы транспорта, сброса сточных вод. Исследования 2005 г. выявили, что сточные воды сбрасывались без очистки на 37 % постоянных станций и 69 % сезонных [Gröndahl et al., 2009]. Согласно Мадридскому протоколу об охране окружающей среды (1999 г.), все сточные воды подлежат очистке. В сточные воды попадают синтетические поверхностно активные вещества и микропластик, требующие специальных методов очистки, которая не производится. Исследования, проведенные в 2016–2019 гг. у чилийских научных станций на Антарктическом полуострове, показали повышенное содержание сажи в снеге около них (до 3395,7 $\mu\text{g}/\text{kg}$), которое уменьшалось на расстоянии 5–6 км [Cereceda-Balic et al., 2020]. У научных станций Мак-Мердо (США), Карлини (Аргентина), Скотт (Новая Зеландия) и других в снежном покрове были обнаружены концентрации полиароматических углеводородов, в 3 раза превышающие фоновые. В 80–90-х гг. XX в. отходы на большинстве антарктических станций отправлялись на свалки и сжигались вблизи станции, либо сбрасывались в море. Мусор, оставшийся от закрытых станций, топливные баки и пр., несмотря на предпринимаемые усилия, все еще находится в Антарктиде.

¹ Электронный ресурс: <https://www.icetrack.com> (дата обращения 16.02.2024);
Web resource: <https://www.icetrack.com> (accessed 16.02.2024)

Развитие инфраструктуры научных поселений, усиливающее антропогенную нагрузку на природную среду, связано в первую очередь с использованием различных видов транспортных средств, работающих на дизельном топливе (авто- и морской транспорт) и керосине (самолеты). С транспортным использованием топлива происходит поступление в природную среду оксидов азота, углеводородов и прочих загрязняющих веществ. Особую опасность при этом представляют разливы нефтепродуктов, неоднократно происходившие в результате механических повреждений кораблей у берегов Антарктиды. Крупнейшей такой катастрофой был разлив 550 м³ дизельного топлива в 1989 г. с тонущего корабля “Bahia Paraiso” недалеко от побережья научной станции Палмер (США) [Bargagli, 2008]. С кораблями же в прибрежные воды попадает микропластик, поступающий в результате разрушения краски на обшивке кораблей, сбросе сточных вод.

С транспортом связаны механические нарушения подстилающей поверхности (снежной и оттаивавшего грунта). Дороги различной протяженности связывают научные станции. Например, шоссе Мак-Мердо–Южный полюс протянулось на 1 450 км, соединив исследовательские станции Мак-Мердо и Амундсен-Скотт. Дорога была построена уплотнением и выравниванием поверхности снега и засыпанием провалов в леднике. В Антарктиде насчитывается более двух десятков аэропортов, принимающих в т. ч. и тяжелые транспортные самолеты, более 30 станций имеют вертолетные посадочные площадки и взлетно-посадочные полосы, включая гравийные. Их длина на станциях Мак-Мердо, Амундсен-Скотт (США), Кейси (Австралия) достигает 3 048–4 000 м. Подобные антропогенные действия нарушают температурный режим поверхности, активизируют эрозионные процессы в береговых зонах свободных от льда в летний период.

На некоторых научных станциях (Ноймаер 3¹, ФРГ; Мак-Мердо, США; Восток, Россия²) имеются экспериментальные теплицы, в которых выращиваются зеленные и овощные культуры. В результате формируются нуклеарные элементы сельскохозяйственного природопользования.

К местным источникам накопления поллютантов добавляются и *дальний атмосферный перенос* Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn, Hg, хлорорганических соединений, микропластика и т. д., что подтверждается увеличением их концентраций в верхних частях кернов бурения на нескольких станциях в Антарктиде, включая станцию Восток [Bargagli, 2008; Geisz, 2010]. В фирновых кернах на высокогорном ледяном плато Земли Королевы Мод были обнаружены возрастающие с 2000 г. концентрации перфторокарбоновые кислоты (PFCA) [Garnett et al., 2022]. Малое число наблюдений не позволяет пока фиксировать районы, где происходит максимальное накопление аэротехногенных поллютантов в результате дальнего переноса.

Потенциальные разработки полезных ископаемых

Хотя Договор об Антарктике запрещает коммерческую добычу полезных ископаемых на континенте, срок его действия заканчивается в 2048 г., и он может быть пересмотрен, поскольку запасы многих полезных ископаемых на других континентах стремительно истощаются. Заметим, что до подписания договора уже существовали претензии нескольких стран (Австралия, Аргентина, Норвегия, Чили и др.) на секторальное деление материка. В настоящее время число претендентов на раздел увеличилось [Корзун, 2022; McGee et al., 2022]. На материке находится около 900 месторождений рудного сырья, а также залежи угля, нефти и золота (рис. 7). Таяние ледяного покрова вследствие потепления климата облегчает доступ к ресурсам полезных ископаемых, добыча которых может спровоцировать возникновение экологических конфликтов. Потенциальными территориями возник-

¹ EDEN ISS — Executive Summary 12.2014 (дата обращения 15.02.2024)

² Пресс-служба ААНИИ, 2023 (дата обращения 20.02.2024)

новения таких конфликтов в первую очередь являются территории интенсивного таяния ледника, располагающие месторождениями рудных полезных ископаемых.

Потенциальные изменения площадей разрушения ледникового покрова

Глобальные изменения климата сильнее всего проявляются в Западной Антарктиде, где в летний период формируются территории, свободные от ледника (рис. 6). Такие территории представляют собой отличные от обычных условия местообитания многих видов растений и животных. Это происходит за счет изменения температур воздуха, режима увлажнения, интенсивности разложения органических остатков и т. д. Новейшие исследования показывают, что в результате потепления под угрозой находится до 65 % видов растений и животных. Так, быстрое разрушение ледяного покрова приводит к нарушению репродуктивного цикла пингвинов, облегчает вторжение чужеродных видов насекомых (*Eretmoptera murphyi*, *Trichocera maculipennis*) и растений, что грозит исчезновением эндемиков [Antarctic..., 2010; Hughes et al., 2013; Convey et al., 2019; Lee et al., 2022]. Значительные изменения, влияющие на местные виды лишайников, отмечены на молодых моренах, вблизи суши, недавно открытой в результате отступления ледников [Olech et al., 2016]. Повышение температуры облегчает доступность воды для растений, что приводит к увеличению колонизации растений и более сложной структуре экосистемы. Так, фиксируется расширение ареала сосудистых растений — *Deschampsia antarctica* и *Colobanthus quitensis* [Cavieres et al., 2016]. Наибольшие изменения биоразнообразия в результате потепления ожидаются в районе Антарктического полуострова.

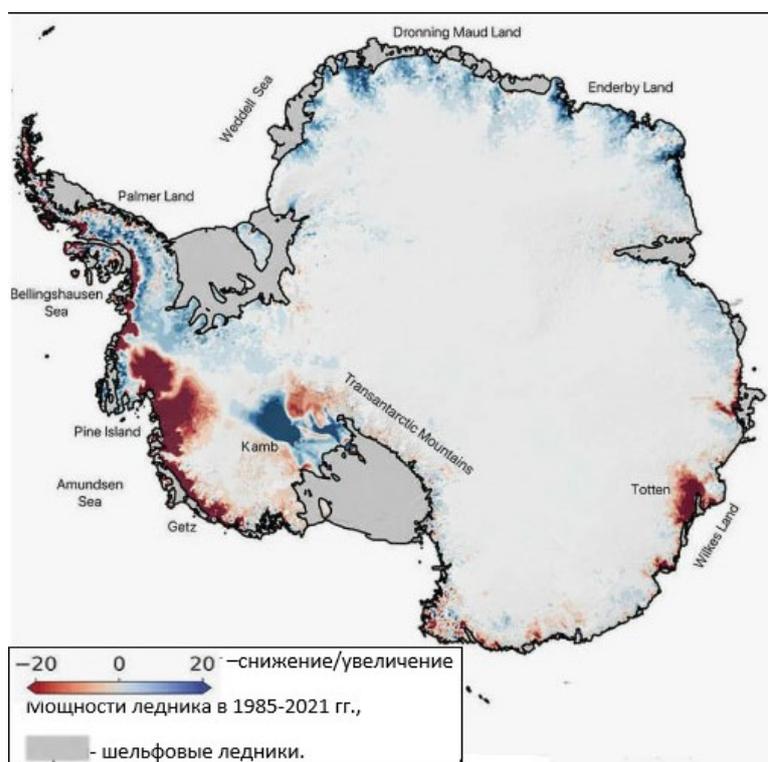


Рис. 6. Районы интенсивного таяния ледникового покрова¹
Fig. 6. Areas of intense melting of the glacial cover¹

¹ NASA. Электронный ресурс: <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasa-studies-find-previously-unknown-loss-of-antarctic-ice> (дата обращения 16.02.2024);
NASA. Web resource: <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasa-studies-find-previously-unknown-loss-of-antarctic-ice> (accessed 16.02.2024)

Территории потенциальных экологических конфликтов

На основании полученных материалов нами была составлена карта территорий, где возможно возникновение экологических конфликтов разного генезиса (рис. 7).

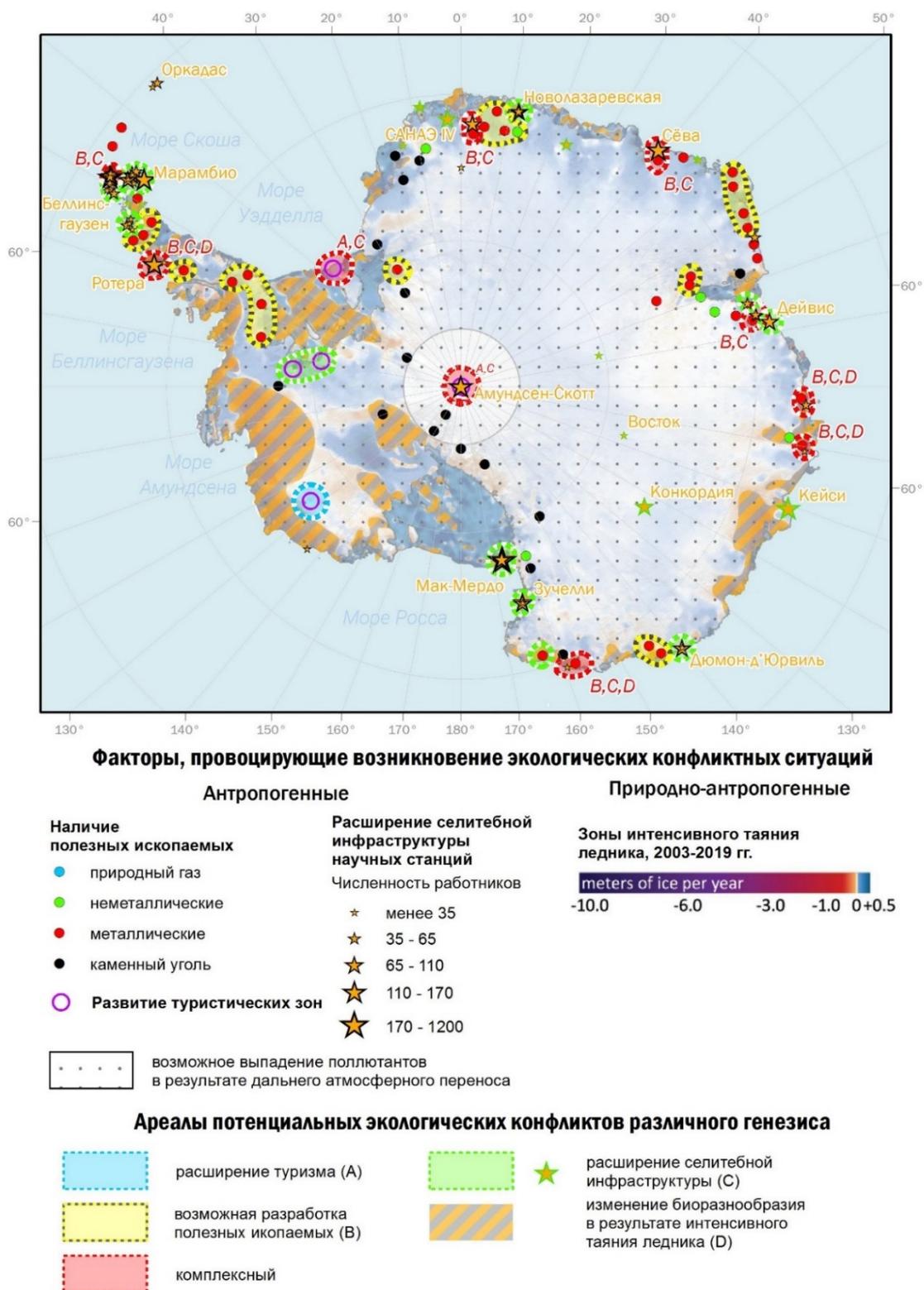


Рис. 7. Территории потенциальных экологических конфликтов различного генезиса
Fig. 7. Territories of potential ecological conflicts of various genesis

На карте методом значков показаны антропогенные и (с использованием непрерывной цветовой шкалы) природно-антропогенные факторы, которые могут провоцировать экологические конфликты, а также ареалы потенциального возникновения таких конфликтов. Недостаточное количество данных пока не позволяет точно воспроизвести на карте ареалы потенциальных экологических конфликтов, их границы в значительной степени условны и показаны штриховой обводкой. Выявление и картографирование таких территорий, однако, важно для акцентирования внимания на необходимости их комплексного геоэкологического анализа. В районах малой плотности научных станций в силу масштаба ареалы расширения селитебной инфраструктуры даны внесмасштабными значками. При выделении потенциальных конфликтов, связанных с перспективами добычи полезных ископаемых, основное внимание уделялось месторождениям руд металлов, вызывающих наибольший интерес. Учитывалась также и доступность таких месторождений. Районы активного таяния ледникового щита были обозначены как территории потенциальных изменений биоразнообразия. Определить ареалы максимального осаждения поллютантов дальнего атмосферного переноса с достаточной достоверностью невозможно, т. к. мониторинговые данные пока единичны. Однако сухое и влажное осаждение таких поллютантов возможно повсеместно, но с разной интенсивностью, связанной с атмосферной циркуляцией.

ВЫВОДЫ

Усиление антропогенной нагрузки на материк Антарктиды на фоне потепления климата создает кумулятивный эффект возникновения потенциальных экологических конфликтов. Расширение свободных от ледника прибрежных территорий в летний период облегчает их освоение, увеличивает сезон транспортной доступности для исследователей и туристов. Это ведет к расширению очагов селитебного природопользования как за счет площадей научных станций и кемпингов, так и за счет разрастания их инфраструктурных объектов (топливных баз, аэродромов и т. п.). Потепление климата расширяет возможности добычи полезных ископаемых, на которую уже претендует ряд государств. Существенные изменения прогнозируются и для биоразнообразия.

Возможность предупреждения возникновения экологических конфликтов связана, кроме нормативного регулирования антропогенной нагрузки, с определением необходимых площадей экологического каркаса. Разработок такого плана пока нет. Однако можно воспользоваться существующим опытом для Арктики. Для этого региона площадь освоения, рекомендованная Арктическим Советом¹, составляет 15 %, остальное формирует экологический каркас. Эта цифра определена в результате анализа возможности восстановления нарушенных экосистем, скорость которой определяется интенсивностью биогеохимического круговорота, зависящего, главным образом, от теплообеспеченности в летний период. Для Антарктиды она более, чем на 30 % ниже, т. е. зона бесконфликтного экологического освоения также окажется ниже 4,5 % (в настоящее время она находится в пределах 2 %). Заметим, однако, что определение безопасной площади освоения требует проведения специальных исследований.

¹ Арктический совет (Arctic Council) — международная организация, призванная содействовать сотрудничеству в области охраны окружающей среды и обеспечения устойчивого развития приполярных районов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афанасьев О. Е. Туризм в Антарктическом регионе: полюс геополитических интересов. Современные проблемы сервиса и туризма, 2022. № 16(1). С. 89–112. DOI: 10.24412/1995-0411-2022-1-89-112.

Корзун В. А. Оценка возможностей использования ресурсов Антарктики. М.: ИМЭМО РАН, 2009. 116 с.

Antarctic seabird ecology. Dissertations, Theses, and Masters Projects. William & Mary, 2010. Paper 1539616664. DOI: 10.25773/v5-ray3-0h78.

Bargagli R. Environmental contamination in Antarctic ecosystems. Science of the total environment, 2008. No. 400. P. 212–226.

Cajiao D., Benayas J., Tejedo P., Leung Y.-F. Adaptive management of sustainable tourism in Antarctica: a rhetoric or working progress? Sustainability, 2021. V. 13. Iss. 14. No. 7649. DOI: 10.3390/su13147649.

Cavieres L. A., Sáez P., Sanhueza C. Ecophysiological traits of Antarctic vascular plants: their importance in the responses to climate change. Plant Ecology, 2016. V. 217. P. 343–358. DOI: 10.1007/s11258-016-0585-x.

Cereceda-Balic F., Vidal V., Ruggeri M.-F., González H. Black carbon pollution in snow and its impact on albedo near the Chilean stations on the Antarctic peninsula: first results. Science of the total environment, 2020. V. 743. No. 140801. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140801.

Chown S., Huiskes A.-H, Gremmen N., Lee J., Terauds A., Crosbie K., Frenot Y., Hughes K., Imura S., Kiefer K., Lebouvier M., Raymond B., Tsujimoto M., Ware C., Van de Vijver B., Bergstrom M. Continent-wide risk assessment for the establishment of nonindigenous species in Antarctica. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012. V. 109. No. 13. P. 4938–4943.

Clem K. R., Fogt R. L., Turner B., Gareth J., Miller J., Renwick J. Record warming at the South Pole during the past three decades. Nature Climate Change, 2020. No. 10. P. 762–770. DOI: 10.1038/s41558-020-0815-z.

Convey P., Peck L. Antarctic environmental change and biological responses. Science Advances, 2019. V. 27. No. 5(11). DOI: 10.1126/sciadv.aaz0888.

Garnett J., Halsall C., Winton H., Joerss H., Mulvaney R., Ebinghaus R., Frey M., Jones A., Leeson A., Wynn P. Increasing Accumulation of perfluorocarboxylate contaminants revealed in an Antarctic firn core (1958–2017). Environmental Science & Technology, 2022. V. 56(16). P. 11246–11255. DOI: 10.1021/acs.est.2c02592.

Geisz H. Persistent organic pollutants (POPs) as tracers of environmental change and Antarctic seabird ecology. Dissertations, Theses, and Masters Projects, 2010. Paper 1539616664. DOI: 10.25773/v5-ray3-0h78.

Gröndahl F., Sidenmark J., Thomsen A. Survey of waste water disposal practices at Antarctic research stations. Polar Research, 2009. V. 28(2). P. 298–306. DOI: 10.3402/polar.v28i2.6109.

Hughes K. A., Worland M. R., Thorne M. The non-native chironomid *Eretmoptera murphyi* in Antarctica: erosion of the barriers to invasion. Biological Invasions, 2013. No. 15. P. 269–281. DOI: 10.1007/s10530-012-0282-1.

Lee J., Waterman M., Shaw J., Bergstrom D., Lynch H., Wall D., Robinson S. Islands in the ice: potential impacts of habitat transformation on Antarctic biodiversity. Global Change Biology, 2022. V. 28(20). P. 5865–5880. DOI: 10.1111/gcb.16331.

McGee J., Edmiston D., Haward M. The Future of Antarctica: Scenarios from Classical Geopolitics. Singapore: Springer, 2022. 199 p. DOI: 10.1007/978-981-16-7095-4.

Olech M., Slaby A. Changes in the lichen biota of the Lions Rump area, King George Island, Antarctica, over the last 20 years. *Polar Biology*, 2016. V. 39. P. 1499–1503. DOI: 10.1007/s00300-015-1863-0.

Stoeckl N., Adams V., Baird R., Boothroyd A., Costanza R., MacDonald D., Finau G., Fulton E., Melbourne-Thomas J., Ooi C.-S., Raghaven M., Senigaglia V., Tian J., Yamazaki S. The value of Antarctic and Southern Ocean ecosystem services. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2024. No. 5. P. 153–155. DOI: 10.1038/s43017-024-00523-3.

REFERENCES

Afanas'ev O. E. Tourism in the Antarctic region: a pole of geopolitical interests. *Modern problems of service and tourism*, 2022. No. 16(1). P. 89–112 (in Russian). DOI: 10.24412/1995-0411-2022-1-89-112.

Antarctic seabird ecology. Dissertations, Theses, and Masters Projects. William & Mary, 2010, Paper 1539616664. DOI: 10.25773/v5-ray3-0h78.

Bargagli R. Environmental contamination in Antarctic ecosystems. *Science of the total environment*, 2008, No. 400. P. 212–226.

Cajiao D., Benayas J., Tejedo P., Leung Y.-F. Adaptive management of sustainable tourism in Antarctica: a rhetoric or working progress? *Sustainability*, 2021. V. 13. Iss. 14. No. 7649. DOI: 10.3390/su13147649.

Cavieres L. A., Sáez P., Sanhueza C. Ecophysiological traits of Antarctic vascular plants: their importance in the responses to climate change. *Plant Ecology*, 2016. V. 217. P. 343–358. DOI: 10.1007/s11258-016-0585-x.

Cereceda-Balic F., Vidal V., Ruggeri M.-F., González H. Black carbon pollution in snow and its impact on albedo near the Chilean stations on the Antarctic peninsula: first results. *Science of the total environment*, 2020. V. 743. No. 140801. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140801.

Chown S., Huiskes A.-H., Gremmen N., Lee J., Terauds A., Crosbie K., Frenot Y., Hughes K., Imura S., Kieffer K., Lebouvier M., Raymond B., Tsujimoto M., Ware C., Van de Vijver B., Bergstrom M. Continent-wide risk assessment for the establishment of nonindigenous species in Antarctica. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012. V. 109. No. 13. P. 4938–4943.

Clem K. R., Fogt R. L., Turner B., Gareth J., Miller J., Renwick J. Record warming at the South Pole during the past three decades. *Nature Climate Change*, 2020. No. 10. P. 762–770. DOI: 10.1038/s41558-020-0815-z.

Convey P., Peck L. Antarctic environmental change and biological responses. *Science Advances*, 2019. V. 27. No. 5(11). DOI: 10.1126/sciadv.aaz0888.

Garnett J., Halsall C., Winton H., Joerss H., Mulvaney R., Ebinghaus R., Frey M., Jones A., Leeson A., Wynn P. Increasing Accumulation of perfluorocarboxylate contaminants revealed in an Antarctic firn core (1958–2017). *Environmental Science & Technology*, 2022. V. 56(16). P. 11246–11255. DOI: 10.1021/acs.est.2c02592.

Geisz H. Persistent organic pollutants (POPs) as tracers of environmental change and Antarctic seabird ecology. Dissertations, Theses, and Masters Projects, 2010. Paper 1539616664. DOI: 10.25773/v5-ray3-0h78.

Gröndahl F., Sidenmark J., Thomsen A. Survey of waste water disposal practices at Antarctic research stations. *Polar Research*, 2009. V. 28(2). P. 298–306. DOI: 10.3402/polar.v28i2.6109.

Hughes K. A., Worland M. R., Thorne M. The non-native chironomid *Eretmoptera murphyi* in Antarctica: erosion of the barriers to invasion. *Biological Invasions*, 2013. No. 15. P. 269–281. DOI: 10.1007/s10530-012-0282-1.

Korzun V. A. Assessment of the possibilities of Antarctic resources exploitation. Moscow: IMEMO RAN, 2009. 116 p. (in Russian).

Lee J., Waterman M., Shaw J., Bergstrom D., Lynch H., Wall D., Robinson S. Islands in the ice: potential impacts of habitat transformation on Antarctic biodiversity. *Global Change Biology*, 2022. V. 28(20). P. 5865–5880. DOI: 10.1111/gcb.16331.

McGee J., Edmiston D., Haward M. The Future of Antarctica: Scenarios from Classical Geopolitics. Singapore: Springer, 2022. 199 p. DOI: 10.1007/978-981-16-7095-4.

Olech M., Slaby A. Changes in the lichen biota of the Lions Rump area, King George Island, Antarctica, over the last 20 years. *Polar Biology*, 2016. V. 39. P. 1499–1503. DOI: 10.1007/s00300-015-1863-0.

Stoeckl N., Adams V., Baird R., Boothroyd A., Costanza R., MacDonald D., Finau G., Fulton E., Melbourne-Thomas J., Ooi C.-S., Raghaven M., Senigaglia V., Tian J., Yamazaki S. The value of Antarctic and Southern Ocean ecosystem services. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2024. No. 5. P. 153–155. DOI: 10.1038/s43017-024-00523-3.

УДК: 338.012

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-37-53

А. А. Панкратов¹, С. В. Бадина²

АНАЛИЗ ТРАНСФОРМАЦИИ ТЕРРИТОРИАЛЬНО-ОТРАСЛЕВОЙ СТРУКТУРЫ ВЫРУЧКИ ИТ-СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В 2019–2022 гг.

АННОТАЦИЯ

Представленное в статье исследование посвящено анализу трансформации территориально-отраслевой структуры выручки российского ИТ-сектора в 2019–2022 гг. На основании анализа данных системы «СПАРК-Интерфакс» рассмотрена динамика выручки предприятий российской ИТ-индустрии в разрезе ее ключевых отраслей — разработки программного обеспечения и деятельности в области информационных технологий. В рамках анализа также рассматривалась отрасль производства компьютеров, электронных и оптических изделий, которая не относится к собирательной группировке ИТ-отрасли, но входит в состав собирательной группировки «Сектор информационно-коммуникационных технологий (ИКТ)». На основании проведенных расчетов выявлена общая тенденция к увеличению концентрации экономического потенциала ИТ-сектора Российской Федерации в его крупнейших центрах, обладающих наиболее благоприятными условиями для его развития. В рамках исследования предложена классификация специализированных на ИТ-отрасли регионов России с вкладом более 0,5 % в общий объем выручки ИТ-сектора Российской Федерации в 2022 г., рассмотрены территориальные группы регионов и описаны их ключевые особенности. Применительно к выручке ИТ-компаний в разрезе регионов России рассчитан индекс Херфиндаля-Хиршмана, отражающий уровень концентрации (монополизации) ИТ-индустрии в регионах России. С учетом современного состояния и динамики территориальной организации экономического потенциала российской ИТ-отрасли, выявленных тенденций ее трансформации в период 2019–2022 гг. сформированы экспертные оценки дальнейшего изменения ситуации в рассматриваемой сфере, предложены практикоориентированные рекомендации для разработки и последующей реализации эффективной государственной региональной политики в области развития и поддержки российской ИТ-индустрии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИТ-сектор, ИТ-отрасль, территориальная организация, территориально-отраслевая трансформация, регионы России

¹ Московский государственный институт международных отношений (университет) МИД Российской Федерации (МГИМО), Институт международных исследований, пр. Вернадского, д. 76, Москва, Россия, 119454, *e-mail*: pankratov_aleksey_ml@mail.ru

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, НИЛ геоэкологии Севера, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991; Университет Бернардо О’Хиггинса, Сантьяго, Чили, проспект Визель, 1497, *e-mail*: bad412@yandex.ru

Alexey A. Pankratov¹, Svetlana V. Badina²

ANALYSIS OF TRANSFORMATION OF THE TERRITORIAL AND INDUSTRY STRUCTURE OF REVENUE OF THE IT SECTOR OF THE RUSSIAN FEDERATION IN 2019–2022

ABSTRACT

The research presented in the article is dedicated to the analysis of the transformation of the territorial-industrial structure of revenue in the Russian IT sector in 2019–2022. Based on the analysis of data from the “SPARK-Interfax” system, the dynamics of revenue of enterprises in the Russian IT industry is examined in the context of its key industries – software development and activities in the field of information technology. The analysis also considered the computer, electronic and optical products manufacturing industry, which does not belong to the collective grouping of the IT industry, but is part of the collective grouping of the information and communications technology (ICT) sector. Based on the calculations carried out, a general trend towards an increase in the concentration of the economic potential of the IT sector of the Russian Federation in its largest centers, which have the most favorable conditions for its development, has been identified. As part of the study, a classification of regions of Russia specialized in the IT industry with a contribution of more than 0.5 % to the total revenue of the IT sector of the Russian Federation in 2022 is proposed, territorial groups of regions are considered and their key features are described. In relation to the revenue of IT companies in the context of regions of Russia, the Herfindahl-Hirschman index was calculated, reflecting the level of concentration (monopolization) of the IT industry in the regions of Russia. Taking into account the current state and dynamics of the territorial organization of the economic potential of the Russian IT industry, the identified trends in its transformation in the period 2019–2022, expert assessments of further changes in the situation in the area under consideration were made, practice-oriented recommendations were proposed for the development and subsequent implementation of effective state regional policy in areas of development and support of the Russian IT industry.

KEYWORDS: IT sector, IT industry, territorial organization, territorial-industrial transformation, regions of Russia

ВВЕДЕНИЕ

Макроэкономический и экономико-географический анализ территориальных и отраслевых трансформаций является значимым научно-практическим и управленческим методом, позволяющим оперативно и эффективно оценивать текущее положение и уровень развития тех или иных отраслей и территорий их локализации [Изард, 1966; Развадовская и др., 2015; Кузнецова, 2018; Трейвиш, 2019]. Исследуемая территориальная производственная система в данном контексте рассматривается в качестве живого, постоянно изменяющегося организма, трансформации которого особенно важно своевременно выявлять и на основании полученной информации выстраивать эффективное управление данной системой [Пилипенко, 2005; Бакланов, 2007, 2013; Badina et al., 2022].

¹ Moscow State Institute of International Relations (MGIMO University), Institute for International Studies,, 76, Vernadsky ave., Moscow, 119454, Russia, *e-mail:* pankratov_aleksey_ml@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Geoecology of the North, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; Bernardo O’Higgins University, Avenida Viel, 1497, Santiago, Chile, *e-mail:* bad412@yandex.ru

Анализ территориальных и отраслевых трансформаций позволяет получать в режиме реального времени качественные и достоверные данные об исследуемом объекте, которые в свою очередь могут дополнять, а также в значительной степени корректировать существовавшие ранее теоретические представления о нем [Бабурин и др., 2009; Porter et al., 2006]. Ретроспективный анализ территориально-отраслевых трансформаций также позволяет прогнозировать будущее состояние исследуемого объекта и с учетом этого эффективно выстраивать практические управленческие рекомендации, направленные на его улучшение, разрабатывать обоснованные стратегии и программы социально-экономического, отраслевого и пространственного развития [Лаженцев, 2014; Ketels et al., 2020; Pankratov et al., 2021].

ИТ-отрасль представляет собой одно из наиболее динамично развивающихся направлений как мировой [Bukh et al., 2017; Audi et al., 2021; Llopis-Albert et al., 2021], так и российской экономики¹ [Бетелин, 2016], для которой исследование территориально-отраслевых трансформаций является особенно важной и актуальной научно-теоретической и практической задачей [Мусаев и др., 2021; Zemtsov et al., 2016]. Многие ключевые направления российской ИТ-индустрии, в т. ч. разработка программного обеспечения, производство компьютеров и вычислительных систем, развитие ИТ-инфраструктуры и другие, продолжают формироваться и активно развиваться в настоящее время, в связи с чем территориально-отраслевая организация ИТ-отрасли в значительной степени видоизменяется и усложняется [Цифровая трансформация отраслей, 2021]. С научно-исследовательской точки зрения ИТ-индустрия также может рассматриваться в качестве наиболее показательного и информативного индикатора современных процессов инновационного развития, исследуя который возможно выявлять пространственные закономерности инновационного развития, а также определяющие факторы размещения производства, в т. ч. характерные для российской экономической модели [Зубаревич, 2010; Krugman, 1991].

По данным аналитического доклада Института статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ², вышедшего в апреле 2024 г. и подготовленного на основании данных Росстата, российская ИТ-индустрия³ является одним из ключевых драйверов несырьевого неэнергетического роста российской экономики. Вклад ИТ-отрасли в ВВП Российской Федерации в 2023 г. по данным доклада оценивается на уровне 1,96 %, что в 1,5 раза больше по сравнению с показателем 2019 г., в отрасли занято около 860 тыс. человек, что также в 1,5 раза превышает уровень 2019 г.; вклад отрасли в общий объем инвестиций в основной капитал по российской экономике в 2023 г. составил более 1,9 % или около 500 млрд руб. Российская ИТ-отрасль в период 2019–2023 гг. по темпам роста являлась лидером среди остальных отраслей российской экономики — показатель CAGR⁴ для ИТ-отрасли за указанный период составил около 26 %.

¹ ИТ-отрасль. Минцифры России. Электронный ресурс: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/418/> (дата обращения 15.04.2024)

² ИТ-отрасль: ключевые показатели. Аналитический доклад Института статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ. Электронный ресурс: <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/914035925.pdf> (дата обращения 15.04.2024)

³ В аналитическом докладе НИУ ВШЭ к ИТ-отрасли в соответствии с классификатором ОКВЭД-2 относятся два вида экономической деятельности: 62.0 – разработка компьютерного программного обеспечения, консультационные услуги в данной области и другие сопутствующие услуги; 63.1 – деятельность по обработке данных, предоставление услуг по размещению информации, деятельность порталов в информационно-коммуникационной сети Интернет

⁴ CAGR (англ. Compound annual growth rate) – совокупный среднегодовой темп роста, измеряется в процентах и показывает, на сколько процентов за год прирастает изучаемый параметр

Приведенные выше цифры подтверждают тезис о наличии высокой экономической и вместе с тем отраслевой и пространственной динамики российской ИТ-индустрии, что, в свою очередь, определяет высокую актуальность изучения данного отраслевого направления. Целью настоящего исследования является проведение комплексного анализа трансформаций территориальной и отраслевой структуры выручки ИТ-отрасли Российской Федерации в 2019–2022 гг. В рамках исследования рассматривается территориальная организация выручки предприятий ИТ-отрасли, усредненная рентабельность продаж ИТ-компаний в разрезе субъектов Российской Федерации, определяются ключевые территориальные центры развития российской ИТ-индустрии, а также рассматривается изменение их вклада в формирование выручки ИТ-отрасли Российской Федерации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В современной российской научной литературе представлено относительно небольшое количество работ, посвященных анализу территориальной организации ИТ-отрасли Российской Федерации. Данная ситуация объясняется несколькими ключевыми факторами. Во-первых, в России функционирует относительно небольшое количество крупных научно-исследовательских центров, предметно занимающихся изучением именно ИТ-индустрии как отдельного отраслевого направления в структуре российской экономики¹.

Во-вторых, в системе государственной статистики на уровне базовых отраслевых классификаций и группировок верхнего и более низких уровней ИТ-отрасль не выделяется как отдельная категория, что в значительной степени затрудняет поиск, формирование и обработку статистических данных, характеризующих ее деятельность.

В-третьих, до настоящего времени сохраняется проблематика определения и интерпретации отраслевых границ ИТ-индустрии в разных источниках. Наиболее существенной проблемой в данном отношении является утверждение приказами Минцифры России позиционирование ИТ-отрасли в качестве софтверной индустрии и деятельности по оказанию ИТ-услуг в отрыве от ее материально-технической основы — микроэлектронной и полупроводниковой промышленности². В этой связи ИТ-отрасль рассматривается не как отдельный производственный сегмент российской экономики, а как инфраструктурная и сервисная деятельность, необходимая прежде всего для обеспечения функционирования других отраслей с точки зрения информатизации и внедрения цифровых технологий.

Отсутствие целостного производственно-секторального понимания ИТ-отрасли в российском управленческом дискурсе является причиной путаницы в понятиях и их интерпретациях, что, в свою очередь, не способствует активной и глубокой научно-

¹ В этом отношении следует отметить Центр статистики и мониторинга информационного общества и цифровой экономики Института статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ, а также ассоциацию компаний, разрабатывающих программное обеспечение — Руссофт

² Приказом Минцифры России от 30 декабря 2014 № 502 утвержден отраслевой состав ИТ-отрасли, к которой отнесены коды классификатора 62.0 (разработка компьютерного программного обеспечения) и 63.1 (деятельность по обработке данных, предоставление услуг по размещению информации, деятельность порталов в информационно-коммуникационной сети Интернет). Электронный ресурс: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_137802/ (дата обращения 15.04.2024)
Однако приказом Минцифры России от 7 декабря 2015 г. № 515 утвержден отраслевой состав собирательной классификационной группировки «Сектор ИКТ», представляющей собой более широкое понятие и охватывающей гораздо большее количество видов экономической деятельности, в т.ч. ИТ-отрасль, а также определенные коды классификатора 26 (производство компьютеров, электронных и оптических изделий). Электронный ресурс: <https://base.garant.ru/71309918/> (дата обращения 15.04.2024)

исследовательской проработке рассматриваемой темы. Более того, в рамках данного подхода наиболее проблемные для российской экономики импортозависимые сегменты ИТ-сектора — микроэлектроника, радиоэлектроника и производство полупроводниковой продукции фактически выпадают из управленческого анализа и обсуждения, при этом остается одна лишь ИТ-отрасль в ее формальном нормативном понимании, которая в такой ситуации позиционируется в качестве одного из ключевых драйверов несырьевого и неэнергетического роста и технологического развития российской экономики.

В рамках настоящего исследования, как и в предыдущих исследованиях авторов [Панкратов и др., 2021, 2023], ИТ-отрасль рассматривается в совокупности с 26-м кодом ОКВЭД-2 — производством компьютеров, электронных и оптических изделий, что объясняется содержательной целесообразностью необходимости включения в состав ИТ-отрасли производственной составляющей, в т. ч. на самых низких уровнях иерархии. В противном случае понятие «ИТ-отрасль» будет неизбежно терять свою объектность и интерпретироваться в качестве межотраслевого сервисно-инфраструктурного образования, функционирующего в целях обеспечения производственной деятельности других секторов и отраслей российской экономики. Значимость актуализации задачи развития микроэлектронной промышленности, как структурного элемента ИТ-индустрии, также определяется необходимостью обеспечения технологического суверенитета в условиях санкционного давления стран Запада на российскую экономику, а также задачей форсированной индустриализации, обозначенной Президентом России в ходе его послания Федеральному собранию в 2024 г.¹

В рамках исследования в разрезе отраслей сектора ИКТ (табл. 1) из системы «СПАРК-Интерфакс»² была собрана база статистических данных о деятельности российских ИТ-компаний и предприятий электронной промышленности за 2019–2022 гг., содержащая следующие необходимые для анализа параметры: регион локализации ИТ-компаний, объем их выручки и чистой прибыли.

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 / дочерние коды
С	Обрабатывающие производства	26	Производство компьютеров, электронных и оптических изделий (дочерние коды — 26.1; 26.20; 26.30; 26.40; 26.80)
J	Деятельность в области информации и связи	62	Разработка компьютерного программного обеспечения, консультационные услуги в данной области и другие сопутствующие услуги (дочерние коды — 62.01; 62.02; 62.03; 62.09)
		63	Деятельность в области информационных технологий (дочерние коды — 63.11; 63.12)

Источник: ОКВЭД-2, составлено авторами

¹ Послание Президента Российской Федерации Федеральному Собранию. Электронный ресурс: <https://www.pnp.ru/politics/poslanie-prezidenta-vladimira-putina-federalnomu-sobraniyu-polnyy-tekst.html> (дата обращения 15.04.2024)

² «СПАРК-Интерфакс» — база статистических данных, содержащая информацию обо всех официально зарегистрированных в Российской Федерации компаниях и индивидуальных предпринимателях. Электронный ресурс: <https://spark-interfax.ru/> (дата обращения 15.04.2024)

На первом этапе исследования была определена общая динамика выручки и чистой прибыли ИТ-сектора в разрезе исследуемых отраслей, а также в соответствии с формулой (1) рассчитана средняя рентабельность продаж предприятий ИТ-сектора и его отраслевых направлений:

$$R_i^{Sale} = \frac{\sum_{n_i} NP_{f,i}}{\sum_{n_i} Sale_{f,i}} \times 100 \quad (1),$$

где: R^{Sale} — усредненная рентабельность продаж отрасли i , %; n — число фирм в отрасли в регионе, *единиц*; NP — чистая прибыль фирмы f , *млн руб.*; $Sale$ — выручка фирмы f , *млн руб.*

На втором этапе исследовалась динамика территориальной организации выручки российского ИТ-сектора в разрезе субъектов Российской Федерации¹. С учетом текущей территориальной организации статистически значимыми изменениями вклада региона в объем выручки ИТ-сектора рассматривалось увеличение/сокращение доли региона на 0,2 % в 2022 г. относительно 2019 г. При изменении вклада менее чем на 0,2 % вклад региона в объем выручки ИТ-сектора рассматривается как стабильный (устойчивый).

На данном этапе исследования была предложена классификация специализированных на ИТ-отрасли регионов России с вкладом более 0,5 % в общий объем выручки ИТ-сектора Российской Федерации в 2022 г. по типам территориальных групп, произведено описание их ключевых особенностей.

На заключительном, третьем этапе исследования рассматривалась динамика концентрации выручки ИТ-сектора в границах субъектов Российской Федерации. Для этого в соответствии с формулой (2) были рассчитаны индексы Херфиндаля-Хиршмана по показателю выручки ИТ-компаний в разрезе регионов России, определена динамика концентрации выручки ИТ-сектора в 2019–2022 гг.:

$$HH_{i,g}^{Sale} = \sum_{n_{i,g}} S_{f,i,g}^{2, Sale} \quad (2),$$

где: HH — индекс Херфиндаля-Хиршмана — коэффициент монополизации, или концентрации² отрасли i в регионе g ; n — число фирм в отрасли в регионе, *единиц*; s — доля фирмы f в объеме выручки отрасли, %; $Sale$ — выручка фирмы f , *млн руб.*

Полученные в рамках проведенных расчетов результаты в целях их верификации были соотнесены с существующими исследованиями, посвященными анализу территориальной организации отраслей ИТ-сектора Российской Федерации, а также с данными официальной статистики, предоставляемыми Росстатом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По данным базы «СПАРК-Интерфакс» объем выручки российской ИТ-отрасли в 2019–2022 гг. в номинальном выражении вырос на 74,3 % или в 1,7 раза с 2,9 трлн руб. в 2019 г. до 5,1 трлн руб. в 2022 г. Объем выручки отрасли производства компьютеров и электронных изделий за рассматриваемый период, напротив, сократился на 26 % с 559 млрд руб. в 2019 г. до 413 млрд руб. в 2022 г.

¹ В рамках исследования статистически значимым изменением вклада региона в объем выручки ИТ-сектора является увеличение/сокращение доли региона на 0,2 %, при изменении вклада менее чем на 0,2 % вклад региона в объем выручки ИТ-сектора рассматривается как стабильный (устойчивый)

² Значение индекса более 0,25 означает наличие высококонцентрированного регионального рынка

Для всех рассматриваемых отраслей за анализируемый период динамика объема чистой прибыли была ниже по сравнению с динамикой роста выручки — в среднем по всем исследуемым отраслям прирост объема чистой прибыли в 2019–2022 гг. составил около 46 %. Данное обстоятельство привело к общему сокращению показателей рентабельности продаж, которая для ИТ-сектора на протяжении рассматриваемого периода в целом сохранялась на уровне средних показателей: 9–10 %¹. В то же время в динамике рентабельности продаж в 2020 г. вследствие влияния пандемии COVID-19, стимулировавшей широкое использование дистанционных цифровых технологий, наблюдался рост до 12 %, обеспеченный, в первую очередь, за счет роста софтверной индустрии; в 2021 г. наблюдалось возвращение к среднему уровню рентабельности предыдущих лет; в 2022 г. показатель стал несколько сокращаться, в т. ч. по причине ужесточения санкционного давления на российскую экономику и ухода западных ИТ-компаний с российского рынка (табл. 2).

Табл. 2. Показатели выручки, чистой прибыли (млрд руб.) и рентабельности продаж (%) в разрезе отраслей ИТ-сектора Российской Федерации в 2019–2022 гг.
Table 2. Indicators of revenue, net profit (billion rubles) and return on sales (%) by industry in the IT sector of the Russian Federation in 2019–2022

Отрасль	Показатель	2019	2020	2021	2022	Прирост 2022 к 2019, %
26: производство компьютеров	Выручка	559,0	587,8	422,3	413,2	-26,1
	Чистая прибыль	37,1	40,6	-1,0	18,4	-50,5
	Рентабельность	6,6	6,9	-0,2	4,4	-33,0
62: разработка программного обеспечения	Выручка	2 321,6	2 736,0	3 305,5	4 080,5	75,8
	Чистая прибыль	220,1	374,5	346,0	356,2	61,8
	Рентабельность	9,5	13,7	10,5	8,7	-7,9
63: информационные технологии	Выручка	621,8	725,6	899,1	1 023,6	64,6
	Чистая прибыль	68,5	64,9	72,3	99,7	45,5
	Рентабельность	11,0	8,9	8,0	9,7	-11,6
ИТ-отрасль: 62, 63	Выручка	2 943,4	3 461,5	4 204,7	5 104,1	73,4
	Чистая прибыль	288,6	439,4	418,3	455,8	57,9
	Рентабельность	9,8	12,7	9,9	8,9	-8,9
Всего: 26, 62, 63	Выручка	3 502,4	4 049,3	4 627,0	5 517,3	57,5
	Чистая прибыль	325,7	479,9	417,3	474,2	45,6
	Рентабельность	9,3	11,9	9,0	8,6	-7,6

Источник: «СПАРК-Интерфакс», рассчитано и составлено авторами

Средняя рентабельность продаж отрасли производства компьютеров и электронных изделий в разные годы оставалась ниже аналогичного показателя для отраслей ИТ-индустрии, как минимум, на 30%, а как максимум — более, чем в 2 раза. Указанная сложившаяся дифференциация не в пользу электронной промышленности делает ее в текущих условиях менее конкурентоспособной и инвестиционно привлекательной по сравнению с софтверной индустрией. При разработке отраслевой политики в области развития ИТ-сектора на федеральном уровне и моделировании инструментов

¹ Градации рентабельности продаж: 1–5 % — низкая рентабельность; 5–20 % — средняя рентабельность (компания работает стабильно); 20–30 % — высокая рентабельность (сверхприбыльный бизнес)

государственной поддержки необходимо учитывать указанные отраслевые различия, предусматривать мероприятия, направленные на улучшение экономического положения электронной промышленности относительно отраслей с более высокой нормой прибыли.

Однако на практике наблюдалась противоположная ситуация: вступивший в действие с 1 января 2021 г. налоговый ИТ-маневр, предусматривающий для ИТ-компаний снижение ставки по налогу на прибыль с 20 % до 3 % и ставки оплаты страховых взносов с 14 % до 7,6 %, первоначально распространялся только на предприятия ИТ-индустрии, получившие аккредитацию Минцифры России и включенные в реестр аккредитованных ИТ-компаний¹. Таким образом, налоговый ИТ-маневр на начальном этапе реализации в еще большей степени увеличивал существующие отраслевые диспропорции между софтверной индустрией и электронной промышленностью. Предприятия электронной и радиоэлектронной промышленности с учетом неоднократных просьб отраслевого сообщества были включены в режим действия указанного налогового маневра значительно позже — только в июле 2022 г.²

Выявленное негативное для российского ИТ-сектора обстоятельство, что развитие электроники не входит в приоритетную повестку отраслевой экономической политики, также косвенно подтверждается стратегией ее развития, согласной которой Минпромторг России приводит лишь оценочное число предприятий в электронной промышленности, которое по мнению ведомства варьируется от 1 600 до 1 700³. Наличие оценочных суждений, приведенных в стратегии, может говорить о том, что ситуация в электронной отрасли плохо контролируется отраслевым ведомством, что, в свою очередь, не способствует развитию отрасли, разработке эффективной отраслевой политики и инструментов государственной поддержки.

Соотношение экономического потенциала исследуемых направлений российского ИТ-сектора — ИТ-отрасли и производства компьютеров — в 2022 г. составило 1 к 12, тогда как в целом по мировой экономике объем ИТ-рынка в 2023 г. соотносился с объемом рынка полупроводниковой продукции в пропорции 1 к 8,6⁴. Значительную долю компаний предприятий электронной промышленности составляют российские производители компьютерной техники — «Аквариус», «Никс», «iRU», «IRBIS», «Kraftway» и др., которые специализируются не на полном цикле производства электронной продукции, а на сборке компьютеров из иностранных комплектующих. Так, по данным «BusinesStat» за 2022 г., более 95 % реализуемых в России процессоров и контроллеров импортировалось из-за рубежа⁵.

Приведенные цифры отражают системную проблему российской экономики, связанную с крайне низким уровнем развития отечественной электроники, радио-

¹ Федеральный закон «О внесении изменений в часть вторую Налогового кодекса Российской Федерации» от 31 июля 2020 г. № 265-ФЗ. Электронный ресурс: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74350972/> (дата обращения 15.04.2024)

² Радиоэлектронной отрасли России утвердили «налоговый маневр», который сэкономит ей 16 млрд руб. ежегодно. Сnews. Электронный ресурс: https://www.cnews.ru/news/top/2022-07-15_radioelektronnoj_otrasli (дата обращения 15.04.2024)

³ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 17 января 2020 г. № 20-р «Об утверждении Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 г.». Электронный ресурс: <https://docs.cntd.ru/document/564162587> (дата обращения 15.04.2024)

⁴ По данным TAdviser объем глобального ИТ-рынка в 2023 г. составил 4,68 трлн долл. США, объем мирового рынка полупроводниковой продукции — 544,8 млрд долл. США. Электронный ресурс: <https://www.tadviser.ru/> (Мировой ИТ-рынок, Полупроводники: мировой рынок) (дата обращения 15.04.2024)

⁵ В 2022 г продажи процессоров и контроллеров в России сократились на 14 % и составили 335 млн шт. Marketing.rbc. Электронный ресурс: <https://marketing.rbc.ru/articles/14369/> (дата обращения 15.04.2024)

электроники и полупроводниковой промышленности. В то же время в структуре мировой экономики данные отрасли рассматриваются в первую очередь как отрасли-мультипликаторы и технологические стимуляторы, раскрывающие возможности развития остальных секторов и отраслей экономики. По разным оценкам мировая полупроводниковая промышленность за счет мультипликативных эффектов способствует формированию от 10 до 15 % мирового ВВП [Бетелин, 2015; Борисов, 2020].

По состоянию на 2022 г. экономический ландшафт ИТ-сектора Российской Федерации условно можно дифференцировать на две большие группы регионов: 12 регионов, сосредоточивающие более 0,5 % выручки ИТ-сектора, являющиеся центрами развития ИТ-индустрии, и остальные 73 региона с вкладом менее 0,5 % в общий объем выручки ИТ-сектора, периферийные для российской ИТ-индустрии. В то же время, еще в 2019 г. количество регионов с вкладом более 0,5 % составляло 16. Таким образом, за последние 5 лет наблюдалось усиление территориальной концентрации экономического потенциала ИТ-сектора в регионах — крупнейших центрах развития российской ИТ-индустрии.

В период 2019–2022 гг. наблюдалась устойчивая тенденция усиления территориальной концентрации выручки исследуемых отраслей ИТ-сектора в крупнейшем центре российской ИТ-отрасли — г. Москве. Вклад ИТ-предприятий Москвы в общий объем выручки ИТ-сектора увеличился более чем на 4 % (с 63,9 % в 2019 г. до 68,1 % в 2022 г.). Вторым регионом, существенно увеличившим свой вклад в общий объем выручки российского ИТ-сектора, стала Республика Татарстан, доля которой возросла на 0,5 % (с 2 % в 2019 г. до 2,5 % в 2022 г.).

Вследствие значительного роста вклада Москвы и Республики Татарстан в экономический потенциал ИТ-сектора, 8 российских регионов сократили свой вклад в общий объем выручки ИТ-сектора более чем на 0,2 %: Калужская область — на 1,4 % (с 2,2 % в 2018 г. до 0,8 % в 2022 г.), Санкт-Петербург — на 0,9 % (с 10 % в 2018 г. до 9,1 % в 2022 г.), Удмуртская Республика — на 0,5 % (с 0,8 % в 2018 г. до 0,3 % в 2022 г.), Чувашская Республика — на 0,4 % (с 0,5 % в 2018 г. до 0,1 % в 2022 г.), Московская область — на 0,3 % (с 3,3 % в 2018 г. до 3,0 % в 2022 г.), Калининградская область — на 0,2 % (с 0,8 % в 2018 г. до 0,6 % в 2022 г.), Воронежская область — на 0,2 % (с 0,6 % в 2018 г. до 0,4 % в 2022 г.).

В территориальной структуре выручки ИТ-сектора также выделяется 6 регионов, сосредоточивающих более 0,5 % выручки предприятий ИТ-сектора, вклад которых в 2019–2022 гг. в общий объем выручки российского ИТ-сектора оставался относительно стабильным: Свердловская область — 1,6 % в 2022 г., Новосибирская область — 1,42 %, Нижегородская область — 1,41 %, Пермский край — 0,7 %, Краснодарский край — 0,6 %, Челябинская область — 0,5 %.

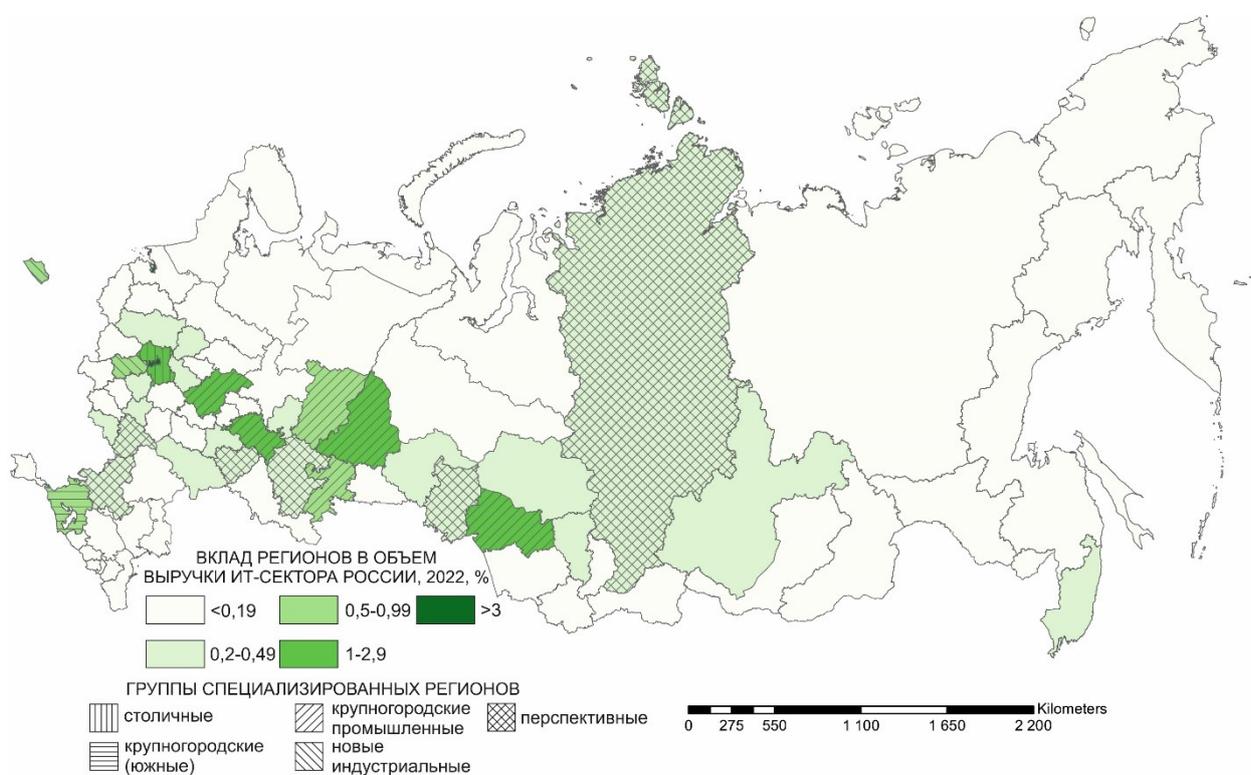
Перечисленные выше 12 регионов с долей у каждого более 0,5 % в общем объеме выручки российской ИТ-индустрии в 2019–2022 гг. сосредоточивали более 90 % выручки ИТ-отрасли, что в целом отражает формирование устойчивой территориальной организации экономического потенциала ИТ-сектора Российской Федерации, а также сложившуюся специализацию рассматриваемых регионов России на исследуемом виде экономической активности. Данные специализированные регионы можно классифицировать на несколько типов территориальных групп с влиянием разных факторов, обеспечивающих концентрацию на их территории экономического потенциала предприятий ИТ-сектора Российской Федерации (табл. 3 и рис. 1).

Табл. 3. Классификация регионов России с вкладом более 0,5 % в объем выручки ИТ-сектора Российской Федерации в 2022 г. по типам территориальных групп
 Table 3. Classification of Russian regions with a contribution of more than 0.5 % to the revenue of the IT sector of the Russian Federation in 2022 by type of territorial groups

Территориальная группа	Регионы России/ вклад в выручку, %	Краткое описание/оценка изменения
Группа 1. Столичные регионы — крупнейшие городские агломерации	Москва (68,1 %) Санкт-Петербург (9,1 %) Московская обл. (3 %)	Крупнейшие территориальные центры развития ИТ-сектора, сосредоточивающие более 80 % его экономического потенциала. Развитая ресурсная, кадровая, научная и инвестиционная база для развития ИТ-сектора. Базисные регионы для развития ИТ-сектора, вклад которых будет либо расти, либо оставаться устойчивым
Группа 2. Крупногородские промышленные регионы	Республика Татарстан (2,5 %) Свердловская обл. (1,6 %) Новосибирская обл. (1,4 %) Нижегородская обл. (1,4 %) Пермский край (0,7 %) Челябинская обл. (0,5 %)	Регионы второго порядка, располагающие на своей территории городами-миллионерами, сосредоточивающие более 8 % экономического потенциала ИТ-сектора. Промышленно развитые регионы, с высоким значением оборонно-промышленного комплекса. Вклад регионов будет оставаться устойчивым, ожидается продолжение роста вклада Республики Татарстан
Группа 3. Крупногородские регионы с наиболее благоприятными условиями для проживания (южные)	Краснодарский край (0,6 %)	Регионы второго порядка, располагающие на своей территории городами-миллионерами, а также наибольшей аттрактивностью с точки зрения релокации ИТ-специалистов из других регионов России. Ожидается рост вклада в экономический потенциал ИТ-сектора
Группа 4. Новые индустриальные регионы	Калужская обл. (0,8 %) Калининградская обл. (0,6 %)	Регионы третьего порядка, проводившие активную инвестиционную политику в 2000–2010 гг., системную поддержку объектов инновационной инфраструктуры — инновационных территориальных кластеров, индустриальных парков и ОЭЗ. С учетом сложившихся условий, а также высокой импортной зависимости хозяйственных систем данных регионов, ожидается сокращение их вклада в экономический потенциал ИТ-сектора

Источник: составлено авторами

Среди представленных в табл. 3 территориальных групп, специализированных на ИТ-секторе регионов России, первые три группы регионов в среднесрочной перспективе будут оставаться устойчивыми центрами локализации и развития ИТ-индустрии, что в первую очередь определяется отраслевой структурой экономики данных регионов, а также экономическим, научным и кадровым потенциалом их административных центров. Последняя, четвертая группа, включающая в себя новые индустриальные регионы, напротив, уже в краткосрочной перспективе в силу сложившейся политико-экономической ситуации, ужесточения санкций западных стран против российской экономики и ухода большинства зарубежных инвесторов может потерять свое положение и быть замещена другими субъектами Российской Федерации, которые войдут в состав второй и третьей территориальных групп. К таким регионам следует отнести Республику Башкортостан, Самарскую и Омскую области, Красноярский край (вторая группа), Воронежскую и Ростовскую области (третья группа) (рис. 1).



Источник: рассчитано и составлено авторами на основании данных «СПАРК-Интерфакс»

Рис. 1. Вклад регионов в общий объем выручки ИТ-сектора России в 2022 г., %, и типы территориальных групп специализированных регионов
Fig. 1. Contribution of regions to the total revenue of the Russian IT sector in 2022, %, and types of territorial groups of specialized regions

Оставшиеся 73 российских региона с вкладом менее 0,2 % в общий объем выручки российского ИТ-сектора в 2019–2022 гг. сосредоточивали менее 10 % от его совокупного экономического потенциала. С учетом выявленной в рамках исследования выраженной тенденции роста концентрации ИТ-отрасли в Москве и Республике Татарстан, а также ее устойчивой доли в других крупных центрах ИТ-индустрии, в сложившихся условиях

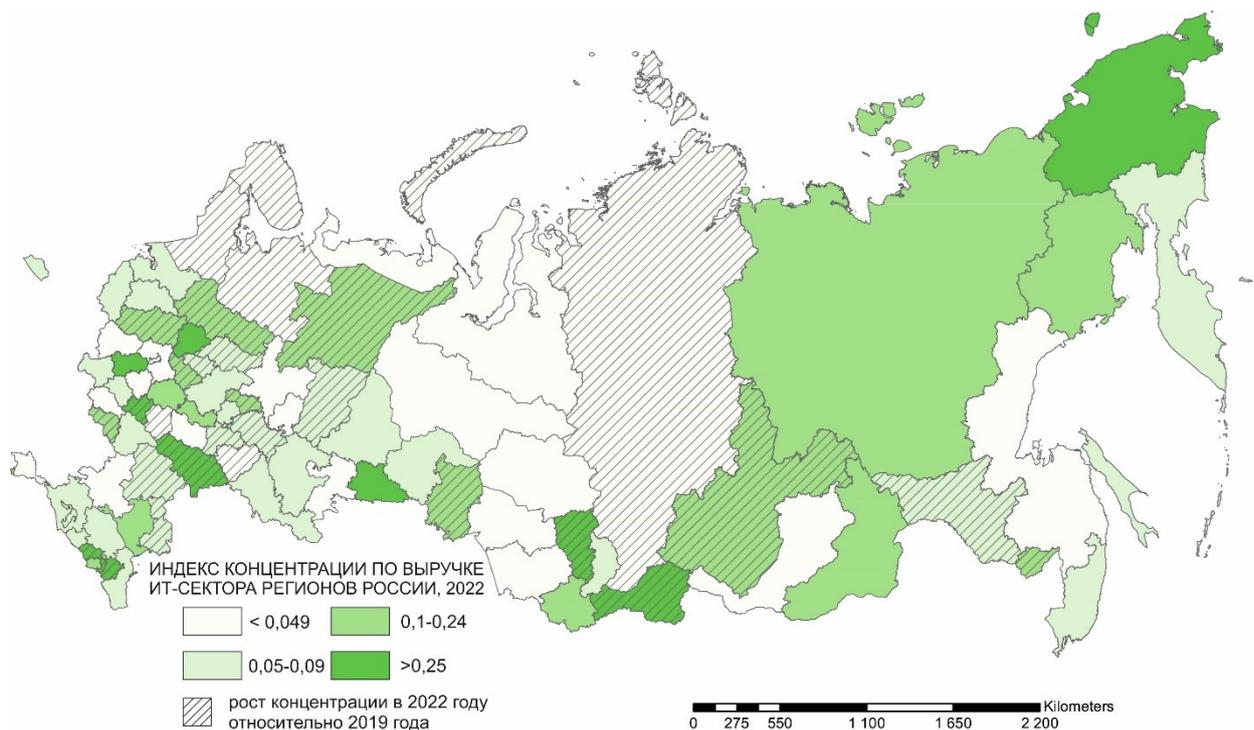
отсутствуют какие-либо реалистичные предпосылки для повышения территориальной диверсификации экономического потенциала ИТ-сектора, роста вклада в совокупные показатели российского ИТ-сектора периферийных с точки зрения развития ИТ-индустрии российских регионов. Данное обстоятельство, в свою очередь, подтверждает тезис, что в естественных условиях рыночной среды для отраслей с широким и сложным набором факторов размещения территориальная структура экономического потенциала сжимается, сосредоточиваясь в локальных центрах, обладающих наиболее благоприятными и выгодными условиями для реализации экономической активности. Экономический ландшафт таких отраслей, образно говоря, представляет собой несколько крупных оазисов, окруженных экономической пустыней или полупустыней. Без вмешательства государства в формате реализации активной региональной экономической политики процессы территориальной диверсификации экономического потенциала ИТ-сектора, в т. ч. за счет диффузии инноваций, не смогут переломить процессы территориальной концентрации и пространственного сжатия экономического потенциала ИТ-отрасли.

Если на межрегиональном уровне ИТ-сектор характеризуется повышенной территориальной концентрацией в таких центрах, как Москва, Санкт-Петербург, Московская область и Республика Татарстан, то на внутрирегиональном уровне с точки зрения монополизации региональных ИТ-секторов наблюдается несколько иная картина. Индекс Херфиндаля-Хиршмана по выручке ИТ-компаний большинства регионов России, в т. ч. ключевых центров ИТ-индустрии, характеризуется относительно низким уровнем монополизации.

Влияние отдельных крупных корпораций и компаний на формирование экономического потенциала региональных ИТ-секторов наблюдается в небольшом количестве регионов. Если не рассматривать регионы с эффектом низкой базы, в которых функционирует небольшое количество ИТ-компаний (Чукотский АО, Кабардино-Балкарская Республика, Республика Ингушетия, Республика Тыва, Чеченская Республика), регионами с высоким уровнем монопольного влияния, для которых индекс концентрации превышает 0,25, являются Калужская, Кемеровская, Саратовская, Курганская, Липецкая и Ярославская области. На протяжении исследуемого периода 2019–2022 гг. только для 33 российских регионов наблюдалось усиление монопольного влияния, остальные российские регионы, наоборот, повысили уровень диверсификации выручки ИТ-сектора по ключевым участникам регионального ИТ-рынка (рис. 2).

С одной стороны, низкий уровень монополизации региональных ИТ-секторов безусловно является значимым конкурентным преимуществом, обеспечивающим устойчивость экономики ИТ-отрасли, стимулирующим межфирменную конкуренцию и способствующим интенсификации экономической активности. Перечисленные выше регионы с высоким уровнем монопольного влияния за исследуемый период значительно сократили свой вклад в общий объем выручки ИТ-сектора с 3,3 % в 2019 г. до 2,2 % в 2022 г., что в целом свидетельствует о низкой экономической устойчивости региональных ИТ-секторов, сформированных за счет деятельности небольшого числа ИТ-компаний, обладающих монопольным влиянием на своих региональных рынках.

С другой стороны, мировой опыт развития ИТ-отрасли показывает, что ключевыми драйверами роста ИТ-индустрии в конечном итоге являются не малый и средний бизнес, а крупные транснациональные корпорации мирового масштаба. В этом отношении современный российский опыт развития ИТ-сектора до настоящего времени все еще не располагает примерами таких корпораций, сопоставимых по своему потенциалу с «Google», «Intel», «Microsoft», «AMD», «Nvidia», «SAP», «Huawei», «Xiaomi» и другими лидерами мирового ИТ-рынка.



Источник: рассчитано и составлено авторами на основании данных «СПАРК-Интерфакс»

Рис. 2. Индекс концентрации (Херфиндаля-Хиршмана) по выручке ИТ-сектора регионов России в 2022 г.

Fig. 2. Concentration index (Herfindahl-Hirschman) by revenue of the IT sector of Russian regions in 2022

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование, посвященное анализу трансформации территориальной структуры выручки ИТ-сектора Российской Федерации в 2019–2022 гг., показало, что в целом территориальная организация экономического потенциала ИТ-сектора сформировалась и характеризуется относительной устойчивостью, каких-либо существенных изменений в территориальной структуре ИТ-сектора за последние несколько лет не проявляется. Наиболее значимой тенденцией в данном отношении следует отметить усиление концентрации экономического потенциала российского ИТ-сектора в крупнейших и наиболее развитых центрах ИТ-индустрии — Москве и Республике Татарстан, а также сокращение количества регионов с относительно высоким вкладом в общий объем выручки ИТ-сектора.

Отраслевая структура ИТ-сектора за рассматриваемый период, напротив, оказалась менее устойчивой по сравнению с территориальной. В структуре выручки ИТ-сектора значительно возросла доля софтверной индустрии с 66 % в 2019 г. до 74 % в 2022 г., в то время как доля электронной промышленности сократилась — с 15 % в 2019 г. до 7 % в 2022 г. Указанные отраслевые различия в первую очередь могут объясняться существенной дифференциацией нормы прибыли в рассматриваемых отраслях, определяющей более высокую инвестиционную привлекательность софтверной индустрии. Таким образом, на основании проведенного исследования можно сделать вывод, что для российского ИТ-сектора территориальная структура его экономического потенциала является более устойчивой и стабильной по сравнению с отраслевой структурой.

Территориальная организация выручки российского ИТ-сектора с точки зрения факторов размещения неоднородна и характеризуется несколькими типами регионов России. В рамках исследования выделено 4 типовые группы регионов, в т. ч.: столичные регионы — крупнейшие городские агломерации, крупногородские промышленные регионы, крупногородские регионы с наиболее благоприятными условиями для проживания, новые индустриальные регионы, из которых первые три группы в кратко- и среднесрочной перспективе будут сохраняться в устойчивом положении в структуре территориальной организации экономического потенциала ИТ-сектора, а последняя группа с высокой долей вероятности потеряет свое экономическое влияние в силу негативных эффектов от санкционного давления на российскую экономику и ухода западных ИТ-компаний и инвесторов с российского рынка.

Без активной государственной региональной политики территориальная диверсификация экономического потенциала российского ИТ-сектора в сложившихся условиях осуществляться не будет. В этом отношении территориальная структура будет сохранять консервативную устойчивость, характеризующуюся наличием ограниченного числа крупных регионов-центров ИТ-индустрии и подавляющим количеством полупериферийных и периферийных с точки зрения развития ИТ-сектора российских регионов.

Уровень монополизации региональных ИТ-секторов по показателю выручки относительно низкий. Данное обстоятельство приводит к выводу, что наибольшие эффекты концентрации проявляются именно на межрегиональном уровне, тогда как на внутрирегиональном уровне функциональная организация ИТ-сектора определяется наличием большого числа ИТ-компаний относительного равного и сопоставимого между собой экономического потенциала. С одной стороны, повышенная функциональная диверсификация определяет устойчивость региональных ИТ-секторов, с другой стороны, в России до настоящего времени отсутствуют крупные ИТ-корпорации мирового уровня.

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

Бабурин В. Л., Горячко М. Д. Стратегическое управление региональным развитием: экономико-географический подход. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2009. № 5. С. 53–58.

Бакланов П. Я. Территориальные структуры хозяйства в региональном управлении. М.: Наука, 2007. 237 с.

Бакланов П. Я. Структуризация территориальных социально-экономических систем. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2013. № 6. С. 3–8.

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/S0869587315110031.

Бетелин В. Б. О проблеме импортозамещения и альтернативной модели экономического развития России. Стратегические приоритеты, 2016. № 1(9). С. 11–21.

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.

Зубаревич Н. В. Регионы России: неравенство, кризис, модернизация. М.: Независимый институт социальной политики, 2010. 160 с.

Изард У. Методы регионального анализа: введение в науку о регионах (Methods of Regional Analysis: an Introduction to Regional Science, 1960). Пер. с англ. В. М. Гохмана, Ю. Г. Липеца, С. Н. Тагера. М.: Прогресс, 1966. 660 с.

Кузнецова О. В. Структура экономики российских регионов и уровень их социально-экономического развития. Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, 2018. Т. 16. С. 473–493. DOI: 10.29003/m275.sp_ief_ras2018/473-493.

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.

Лажнецов В. Н. Содержание, системная организация и планирование территориального развития. Екатеринбург-Сыктывкар: Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера КНЦ УрО РАН. 2014. 236 с.

Панкратов А. А., Мусаев Р. А., Бадина С. В. Оценка потенциала кластеризации ИТ-отрасли России в 2005–2018 гг. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф., 2021. Т. 27. № 1. С. 44–59. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-44-59.

Панкратов А. А. Анализ современного состояния Российской ИТ-отрасли: ключевые проблемы и тенденции. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф., 2023. Т. 29. № 1. С. 201–216. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-201-216.

Пилипенко И. В. Конкурентоспособность стран и регионов в мировом хозяйстве: теория, опыт малых стран Западной и Северной Европы. Смоленск: Ойкумена. 2005. 496 с.

Развадовская Ю. В., Ложникова А. В., Шевченко И. К. Территориально-отраслевое планирование в условиях реализации стратегий рещоринга и реиндустриализации. Национальные интересы: приоритеты и безопасность, 2015. Т. 11. № 10 (295). С. 2–10.

Трейвиш А. И. Неравномерность и структурное разнообразие пространственного развития экономики как научная проблема и российская реальность. Пространственная экономика, 2019. Т. 15. № 4. С. 13–35. DOI: 10.14530/se.2019.4.013-035.

Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты. Доклад к XXII Апрельской международной научной конференции по проблемам развития экономики и общества. Москва: НИУ ВШЭ. 2021. 239 с.

Audi M., Ali A., Roussel Y. The advancement in information and communication technologies (ICT) and economic development: a panel analysis. International Journal of Innovation, Creativity and Change, 2021. V. 15. Iss. 4. P. 1013–1039.

Badina S., Pankratov A. Assessment of the impacts of climate change on the Russian Arctic economy (including the Energy Industry). Energies, 2022. V. 15. No. 8. DOI: 10.3390/en15082849.

Bukh R., Heeks R. Defining, conceptualising and measuring the digital economy. Global Development Institute working papers, 2017. No. 68.

Ketels C., Protsiv S. Cluster presence and economic performance: a new look based on European data. Regional Studies, 2020. DOI: 10.1080/00343404.2020.1792435.

Krugman P. Increasing returns and economic geography. *Journal of Political Economy*, 1991. V. 99. No. 3. P. 483–499.

Llopis-Albert C., Rubio F., Valero F. Impact of digital transformation on the automotive industry. *Technological Forecasting and Social Change*, January 2021. V. 162. DOI: 10.1016/j.techfore.2020.120343.

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.

Porter M. E., Kramer M. R. Strategy and Society: The link between competitive advantage and corporate social responsibility. *Harvard Business Review*, 2006. December. P. 78–92.

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

Audi M., Ali A., Roussel Y. The advancement in information and communication technologies (ICT) and economic development: a panel analysis. *International Journal of Innovation, Creativity and Change*, 2021. V. 15. Iss. 4. P. 1013–1039.

Baburin V. L., Goryachko M. D. Strategic management of regional development: economic-geographical approach. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5. Geografiya (Lomonosov Geography Journal). Series 5. Geography*, 2009. No. 5. P. 53–58 (in Russian).

Badina S., Pankratov A. Assessment of the impacts of climate change on the Russian Arctic economy (including the Energy Industry). *Energies*, 2022. V. 15. No. 8. DOI: 10.3390/en15082849.

Baklanov P. Ya. Territorial structures of the economy in regional management. Moscow: Nauka, 2007. 237 p. (in Russian).

Baklanov P. Ya. Structuring of territorial socio-economic systems. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5. Geografiya (Lomonosov Geography Journal). Series 5. Geography*, 2013. No. 6. P. 3–8 (in Russian).

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. On the problem of import substitution and an alternative model of economic development in Russia. *Strategic Priorities*, 2016. No. 1(9). P. 11–21 (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 (in Russian). DOI: 10.19181/sntp.2020.2.2.6.

Bukh R., Heeks R. Defining, conceptualising and measuring the digital economy. *Global Development Institute working papers*, 2017. No. 68.

Digital transformation of industries: starting conditions and priorities. Report to the XXII April international scientific conference on problems of economic and social development. Moscow: National Research University Higher School of Economics. 2021. 239 p. (in Russian).

Izard W. Methods of regional analysis: an introduction to regional science (1960). Transl. from English by V. M. Gokhman, Yu. G. Lipets, S. N. Tager. Moscow: Progress, 1966. 660 p. (in Russian).

- Ketels C., Protsiv S.* Cluster presence and economic performance: A new look based on European data. *Regional Studies*, 2020. DOI: 10.1080/00343404.2020.1792435.
- Krugman P.* Increasing returns and economic geography. *Journal of Political Economy*, 1991. V. 99. No. 3. P. 483–499.
- Kuznetsova O. V.* The structure of the economy of Russian regions and the level of their socio-economic development. *Scientific works: Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences*, 2018. V. 16. P. 473–493 (in Russian). DOI: 10.29003/m275.sp_ief_ras2018/473-493.
- Lazhentsev V. N.* Content, system organization and planning of territorial development. Ekaterinburg-Syktvkar: Institute for Socio-Economic and Energy Problems of the North, KSC, Ural Branch of the RAS, 2014. 236 p. (in Russian).
- Llopis-Albert C., Rubio F., Valero F.* Impact of digital transformation on the automotive industry. *Technological Forecasting and Social Change*, January 2021. V. 162. DOI: 10.1016/j.techfore.2020.120343.
- 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.* Assessment of the clustering potential of the Russian IT industry in 2005-2018. *InterCarto. InterGIS. Proceedings of International Conference*, 2021. V. 27. No. 1. P. 44–59 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-44-59.
- 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.* Analysis of the current state of the Russian IT industry: Key problems and trends. *InterCarto. InterGIS. Proceedings of International Conference*, 2023. V. 29. No. 1. P. 201–216 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-201-216.
- Pilipenko I. V.* Competitiveness of countries and regions in the world economy: Theory, experience of small countries of Western and Northern Europe. Smolensk: Ojkumena. 2005. 496 p. (in Russian).
- Porter M. E., Kramer M. R.* Strategy and society: The link between competitive advantage and corporate social responsibility. *Harvard Business Review*, 2006. December. P. 78–92.
- Razvadovskaya Yu. V., Lozhnikova A. V., Shevchenko I. K.* Territorial and sectoral planning in the context of the implementation of reshoring and re-industrialization strategies. *National Interests: Priorities and Security*, 2015. V. 11. No. 10 (295). P. 2–10 (in Russian).
- Treyvish A. I.* Unevenness and structural diversity of spatial economic development as a scientific problem and Russian reality. *Spatial Economics*, 2019. V. 15. No. 4. P. 13–35 (in Russian). DOI: 10.14530/se.2019.4.013-035.
- 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.
- Zubarevich N. V.* Regions of Russia: Inequality, crisis, modernization. Moscow: Independent Institute for Social Policy, 2010. 160 p. (in Russian).

Pavel O. Syomin¹

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-54-65

LEGAL BUSINESS GEOGRAPHY IN RUSSIA: REGIONAL ANALYSIS AND MAPPING USING TAX SERVICE OPEN DATA

ABSTRACT

This paper presents an exploratory regional analysis of legal business in Russia over the period from 2016 to 2021. The primary data source for the analysis is the Federal Tax Service (FTS) open data on small and medium-sized businesses and the number of employees of organizations. The paper proposes a reproducible methodology of working with FTS open data for regional analysis in service geography that was partially implemented in a specially designed Python command line tool. The analysis includes questions regarding the number of law firms and their employees by region, the proportion of organizations engaged in the regional legal business, the role of regions in the country's legal business sector, the role of legal business in the regions' economies, and the change in the number of law firms in regions over the observed period. Additionally, it briefly addresses the potential correlation between the location of district-level courts and the development of legal business. The analysis revealed that the legal business sector in Russia is highly concentrated in Moscow and St. Petersburg. These regions also occupy the top position in terms of the role of legal business within the region. However, there are other regions with relatively high levels of legal business development, which are primarily located in the European south of Russia, the Volga-Urals, and Siberia. A dichotomy emerges between regions where legal business is dominated by organizations and those where individual entrepreneurs prevail over companies. District courts are typically situated in regions with a high level of legal business development. However, the underlying mechanism of this co-location requires further investigation. The number of legal firms increased from 2016 to 2021 in the majority of regions. The year-by-year changes within the regions typically follow an inverted U-shaped pattern. This pattern is likely explained by the coronavirus (COVID-19) pandemic, which negatively impacted small and medium businesses and reversed the initial growth trend.

KEYWORDS: regional analysis, geography of services, legal services, legal business, open data

INTRODUCTION

Geography of services is an important branch of modern economic and social geography. In Russia, the discipline can be traced back to the 1960s, when pioneering research papers were published on this subject [Tkachenko, Fomkina, 2016]. In foreign countries, the spatial aspects of services were treated as a part of human geography and were first touched upon in the scholarly works about retail [Reilly, 1931; Berry, 1967] and cities [Brush, 1953], which were usually based on the central places theory [Christaller, Baskin, 1966]. A series of review research articles published in 1985–1987 directly employs the term “geography of services” and cites numerous original papers related to this topic [Daniels, 1985, 1986, 1987]. More recent foreign studies in this field have focused on the processes and phenomena occurring in peripheral or smaller economies [Hermelin, Rusten, 2007] or on the rising sectors such as FinTech [Lai, Samers, 2021; Wójcik, 2021]. Recent research in the geography of services in Russia addresses spatial properties of banking [Shustova, 2015], education [Shulgina, 2019], car rental [Zyrianova, 2018], food service [Preobrazhenskiy, Kushnir, 2018], and the service sector in general [Lisin et al., 2020].

¹ Perm State University, Department of Social and Economic Geography, 15, Bukireva str., Perm, 614068, Russia, e-mail: ntsp@ya.ru

Nevertheless, several types of services remain understudied by geographers, including business and legal services [Tkachenko, Fomkina, 2016].

The research on the geography of legal services in Russia is limited. To date, only an analytical review describing the legal market in Russia has been published, which contains a chapter on its spatial aspects [Moiseeva, Skougarevskiy, 2016]. Another paper briefly addresses the role of Russia in the global legal services market without delving into the internal spatial properties of the Russian legal business [Yastrebov, Tinkova, 2021]. In addition to scientific publications, there are business products about the legal services market in Russia that include its regional analysis¹. Despite a low observed interest in this issue from other researchers, it can be argued that geographical studies of legal services are essential. First, legal services, as a subset of other business or producer services, play a substantial role in the development of regions and territories and economic growth [Hansen, 1993]. In some cases, the lack of professional legal advice may even act as a limiting factor, causing problems for entrepreneurs, especially small ones, and decreasing their performance [Hitchens, 1997]. Next, a comprehensive examination of law firms may yield valuable insights into the business sectors they serve [Faulconbridge, 2019] or enhance the theoretical understanding of markets and industries in general [Henderson, Alderson, 2016]. Finally, legal services should be considered not only in terms of their narrow economic function but also as an integral element of the broader legal system. This system is responsible for protecting human rights and freedoms, ensuring the rule of law, and acting as an intermediary between people, businesses and government. It helps to resolve conflicts, increase certainty and orderliness in social relations, and thus contributes to the stability and development of society. This aspect of legal services is closely related to the social dimension of the geography of services. It is therefore unsurprising that research is being conducted on the problem of legal services availability [Baxter, Yoon, 2015].

The field of legal services represents a narrow and specific area of the economy that is not reported separately in the official statistics. Consequently, to analyze this sector, it is necessary to draw upon other sources of information. Georeferenced data on distinct firms is of particular value in this context, as it can be readily filtered to exclude firms that are not engaged in the requisite activity and then aggregated according to their spatial attributes to make a geographical summary. Researchers typically extract such information from public geoinformation (GIS) services [Lachininsky, Sorokin, 2021] or business intelligence (BI) systems [Moiseeva, Skougarevskiy, 2016]. However, this method has two disadvantages. Firstly, the complexity of data preprocessing makes it difficult to use. Secondly, the relatively high price of the data makes it unaffordable for many researchers. Furthermore, GIS and BI systems often do not enable access to historical data, providing only a real-time picture, while geographical studies may be enhanced by combining spatial and temporal properties. To address these challenges, the use of open administrative data may be a viable solution. In particular, the publicly available archives of the Registry of small and medium-sized businesses (SMB registry) distributed by the Federal Tax Service (FTS) of Russia, in combination with a few other open data collections of the same governmental body, appear to be a valuable resource for the task at hand. These data sources have already been used by geographers [Rostislav, 2021; Gumenyuk, 2022].

The objective of this paper is twofold. Primarily, it seeks to provide an overview of the geography of legal business in Russia. The scope of the research is intentionally limited due to various organizational and technical constraints. It focuses exclusively on service providers, or the supply side of the market, and does not address customers, the demand side. Furthermore, it concentrates on commercial legal businesses, excluding other market participants such as notaries,

¹ Analysis of the legal services market in Russia in 2019–2023 with forecast for 2024–2028 (in Russian). Web resource: <https://marketing.rbc.ru/research/41683/> (accessed 14.04.2024)

advocacy firms, and non-profit legal organizations. Finally, only a subset of metrics indicative of characteristics of legal businesses is included in the analysis. The specific research questions are presented in the “Materials and methods” section below.

In addition to the primary purpose, the paper proposes a reproducible methodology of working with FTS open data for analyzing the geography of services in Russia, particularly those not reported separately in official statistics, such as specific types of business and customer services. Their analysis would be difficult using the traditional tools and data sources of economic geographers.

RESEARCH MATERIALS AND METHODS

Data

The research utilizes two primary data sources: the Unified registry of small and medium-sized businesses (SMB registry)¹ and the Information about the average number of employees of organizations (Information about employees)². Both of these are available on the FTS website as open data.

The SMB registry dataset contains full dumps of the respective registry in zipped XML files. The initial dataset was made available in August 2016, and updates have been released every month. Each dump contains the entire registry and includes, in particular, the company or individual names, taxpayer IDs, and activity codes according to the All-Russia Classifier of Kinds of Economic Activity, as well as addresses of incorporation (up to the settlement name). According to Russian laws, the registry includes information about all commercial organizations and individual entrepreneurs that meet several criteria (SMB subjects). The most important criteria are limits on the revenue (no more than 2B Russian rubles) and on the average number of employees (no more than 250). Consequently, the open dumps of this registry represent the most comprehensive publicly accessible data source on Russian business entities. Moreover, the archive of these dumps constitutes a time series spanning from August 2016 to the present, thereby providing a history of small and medium-sized business changes.

The Information about employees dataset contains company taxpayer IDs and average yearly numbers of employees for the previous year. The data was initially published in 2019 and has been updated with varying frequencies, though at least annually. Consequently, the data archive encompasses the period from 2018 to 2023. For reasons that are not specified, the older versions of the dataset which included information for the years from 2018 to 2022 are not currently available on the FTS website. However, the data had already been downloaded by the author before its removal, and thus it is used in this research.

In addition to the primary data sources, two lookup tables with information on Russian cities and settlements are used to normalize and geocode the raw addresses contained in the FTS data. The first table is “Settlements of Russia: population and geographical coordinates”³ prepared by the nonprofit open data initiative known as “Research Data Infrastructure” (RDI). The second table is “Cities of Russia”⁴ published by the commercial company HFLabs. Data on several cities

¹ Unified registry of small and medium-sized businesses (in Russian). Web resource: https://www.nalog.gov.ru/open_data/7707329152-rsmp/ (accessed 15.04.2024)

² Information about the average number of employees of organizations (in Russian). Web resource: <https://www.nalog.gov.ru/opendata/7707329152-sshr2019/> (accessed 15.04.2024)

³ Settlements of Russia: population and geographical coordinates (in Russian). Web resource: <https://data.rcsi.science/data-catalog/datasets/160/> (accessed 15.04.2024)

⁴ Cities of Russia (in Russian). Web resource: <https://github.com/hflabs/city> (accessed 15.04.2024)

is absent from this table, so it was entered manually. Both tables contain information that is actual for the beginning of 2022, and thus there may be some inaccuracies in geocoding and normalization. However, these are likely to be negligible.

Apart from these datasets, a small manually collected table with the locations of Russian district-level courts is utilized. District-level courts span their activity over two or more regions of Russia that constitute a judicial district, checking and reviewing decisions of lower-level courts. This category includes appeal and cassation ordinary and commercial courts, with a total of 47 such courts in Russia. The location data was obtained from the Supreme Court of Russia website¹ and the legal information system called “Consultant Plus”². While not the primary focus of this paper, the court location data was utilized to supplement the regional analysis by examining the relationship between the legal business geography and the placement of district-level courts.

Finally, an aggregated official statistic on the annual total number of employees in the regions of Russia³ and on the average annual resident population⁴ was utilized. This data is provided by the Federal Statistics Service (Rosstat) through the publicly available Unified Interdepartmental Information and Statistical System. It contains region names and corresponding numbers of employees in all sectors of the economy for each selected year.

Methods

A Python command line tool, `ru-smb-companies`, was developed by the author of this paper to initially process large and complex raw XML datasets from the FTS servers and transform them into a single CSV table. The source code of this tool, along with a brief documentation, is published in the author’s personal GitHub account⁵. Here, a concise summary of the data processing workflow is provided. The data processing takes several steps.

Step 1 is data download. The dumps of the SMB registry and the archives of Information about employees were downloaded from the FTS servers and stored on the local machine. Additionally, their backup was uploaded to the author’s personal Yandex.Disk account, thus enabling other researchers to access the raw data even if FTS decides to remove it (as indeed occurred with the data on employees).

Step 2 is data unpacking. A “filter-on-extract” approach was used to facilitate the retrieval of necessary information into intermediary CSV tables. This approach entails the program reading the contents of the archive file by file, rather than unpacking the entire archive on the disk. Each XML file is temporarily extracted from the archive to the memory and parsed. The program filters the records with the data on organizations and individuals contained in the XML file by activity code equal to 69.10 (“activity in the area of law” according to the All-Russia Classifier of Kinds of Economic Activity). The resulting set of filtered records is then subjected to attribute extraction, and the extracted data is stored on disk. Once this process is complete, the memory occupied by the temporarily extracted XML file is freed, and the next file is processed. The preliminary filtering

¹ Information about cassation and appeal ordinary courts (in Russian). Web resource: https://vsrf.ru/press_center/news/28148/ (accessed 15.04.2024)

² Reference information: “Commercial courts” (in Russian). Web resource: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_56549/ (accessed 15.04.2024)

³ Number of people employed (in Russian). Web resource: <https://fedstat.ru/indicator/34051> (accessed 24.04.2024)

⁴ Average annual resident population (in Russian). Web resource: <https://fedstat.ru/indicator/31556> (accessed 06.07.2024)

⁵ Russian small and medium business dataset generator. Web resource: <https://github.com/PavelSyomin/russian-smb-companies> (accessed 15.04.2024)

by activity code decreases the runtime of the application, while the direct reading of archive contents reduces the disk space occupied by temporary files. Consequently, this step is executed relatively fast in comparison to the less optimized “extract, then filter” approach.

Step 3 is data aggregation. The intermediary CSV tables generated in Step 2 were processed to remove duplicate records. The reason for the duplicates is the procedure of data publication. As previously stated, each version of the source datasets contains the complete data for the time of publication rather than updates only. This results in a significant number of repeating records.

Step 4 is geocoding. This involves the addition of the geographical coordinates and municipal codes of the settlements where the SMB subjects are located to the original data table. Furthermore, the addresses were normalized by converting from the original administrative division format, which consists of region, district, city, and settlement names, to a simpler yet useful format with region, area, and settlement names.

Step 5 is data panelization. The data on SMB subjects was combined with the data on employees using taxpayer ID as a unique identifier common to both datasets and converted into a panel time series table that includes yearly information for each company or individual. This resulting table is used in the further analysis.

The research adheres to the general framework of regional analysis and employs the methods of descriptive statistics and data visualization, including the plotting of data on a tile-grid map of Russia. In this study, the concept of legal business is approached in a relatively narrow sense and with a strong emphasis on formal considerations. The term encompasses commercial legal entities or individual entrepreneurs registered in Russia according to the Russian civil law whose main activity is classified under code 69.10 in the All-Russia Classifier of Kinds of Economic Activity. This technique is consistent with the selection criterion for law firms used in [Moiseeva, Skougarevskiy, 2016]. The analysis does not include non-profit legal services providers or specialized professionals such as notaries and advocates. Due to data availability constraints, it also omits large companies that are not present in the small and medium-sized businesses registry. In essence, the legal business, as it is defined in this context, encompasses legal counseling or similar activities. The analysis is comprised of four research problems, or questions, which are enumerated below with the description of the relevant techniques used to find the answers. The term “law firm” denotes both companies (organizations) and individuals (individual entrepreneurs). The term “lawyers” in this paper refers to the employees of these firms.

Problem 1 is the distribution of law firms across Russia’s regions. To discover this distribution, the median number of law firms in each region per 100 000 population is calculated for the period from 2016 to 2021. This result is then visualized on a map.

Problem 2 is the structure of legal business in the regions with respect to the kind of firms (either individuals or companies). To address this issue, the median share of organizations among law firms in each region over the 2016–2021 period is calculated and then mapped.

Problem 3 is the relative importance of regional legal business. This issue is divided into two sub-problems. The first is the importance of a region’s legal services in the Russian legal market measured by the share of lawyers in a region in the number of country’s lawyers. The second is the importance of these services within a given region estimated as a share of lawyers in a region in the total number of employees in that region. Both metrics are calculated for each year from 2018 to 2021, averaged by a median function, and then plotted on a tile-grid map. Additionally, regions with district-level courts are marked on the map to analyze the relationship between the location of such courts and the development of legal business.

Problem 4 is the temporal change in the legal business sector across regions. To reach conclusions, law firms are calculated by region and year for the 2016–2021 period. The time series of counts are visualized as line plots to identify temporal patterns. The regions are divided into

three groups based on the overall growth, decline, or stability of legal business in the observed period, and the group is also marked on the map.

Technically, the analysis is carried out using the R programming language (including additional packages). A tile grid map of Russia by I. Dianov¹ is used with a modified implementation by Yu. Tukachev². The source code of this paper is published in the author's repository on GitHub³.

RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 1 depicts the average relative annual number of law firms by region. Several conclusions can be drawn from this visualization. First, Moscow and Saint Petersburg stand out as the only cities in Russia where the number of law firms exceeds 100 per 100 000 inhabitants. Secondly, certain regions also have a relatively high number of law firms per capita. Geographically, these regions are situated in different parts of the country, and in some cases they form clusters or groups. The most prominent of these groups is located in the Middle and Southern Urals with Western Siberia and consists of Sverdlovsk, Chelyabinsk, Tyumen, Omsk, and Novosibirsk regions. Another group is located in the Far East and includes Primorye territory, Sakhalin Region, and, somewhat surprisingly, Kamchatka territory. Krasnodar territory, the Republic of Tatarstan, the Republic of Karelia, and Arkhangelsk Region are distinct centers with a high number of law firms per capita surrounded by the regions with a more moderate number of such firms. Moscow Region and its neighboring Ivanovo Region are also characterized by a considerable number of law firms per capita, but it seems that their metrics may be the result of a “spillover effect” originating from Moscow City. Third, several republics of the North Caucasus and Altai and a portion of regions of the Russian North have relatively small number of law firms, sometimes incorporating less than ten such businesses. It can be hypothesized that the number of law firms per capita is contingent upon the economic development of a region.

The relative location of regions and groups with different numbers of law firms per capita suggests the possibility of central-periphery relations between them. For instance, Moscow City and Region, St. Petersburg City, and the Republic of Tatarstan may serve as hubs for their surrounding areas of Central, North-Western Russia, and Volga Region (Povolzhye). A similar phenomenon may be observed in other parts of the country: the Ural-Siberian cluster provides legal services for Eastern Siberia and the Far East, while the Krasnodar Territory serves Rostov and Stavropol.

Fig. 2 illustrates the median annual share of organizations among all law firms in regions. The value varies considerably, ranging from approximately 30 % to almost 70 %. However, a substantial proportion of regions exhibit a share of companies ranging from 45 % to 55 %, which is almost equal to the share of individuals. All other regions may be divided into two broad groups: either having a dominance of individuals or organizations in the legal market. The former category encompasses the European North and South, as well as certain regions in the Far East, Central Russia, and Western Siberia. The latter category comprises Moscow and St. Petersburg cities, along with the majority of the Volga and Siberian regions. The comparison of Fig. 1 with Fig. 2 leads to the conclusion that there is no clear relationship between the number of law firms and the share of companies among them.

¹ Tile grid map of Russia (in Russian). Web resource: <https://dianov.org/all/plitochnaya-karta-rossii/> (accessed 23.04.2024)

² Tile grid map of Russia. Web resource: <https://gist.github.com/tukachev/c3262242a20b3050e0459b4e3afc3a51> (accessed 23.04.2024)

³ PavelSyomin. Russian smb companies papers. Web resource: <https://github.com/PavelSyomin/ru-smb-companies-papers/tree/main/law-firms-geography> (accessed 23.04.2024)

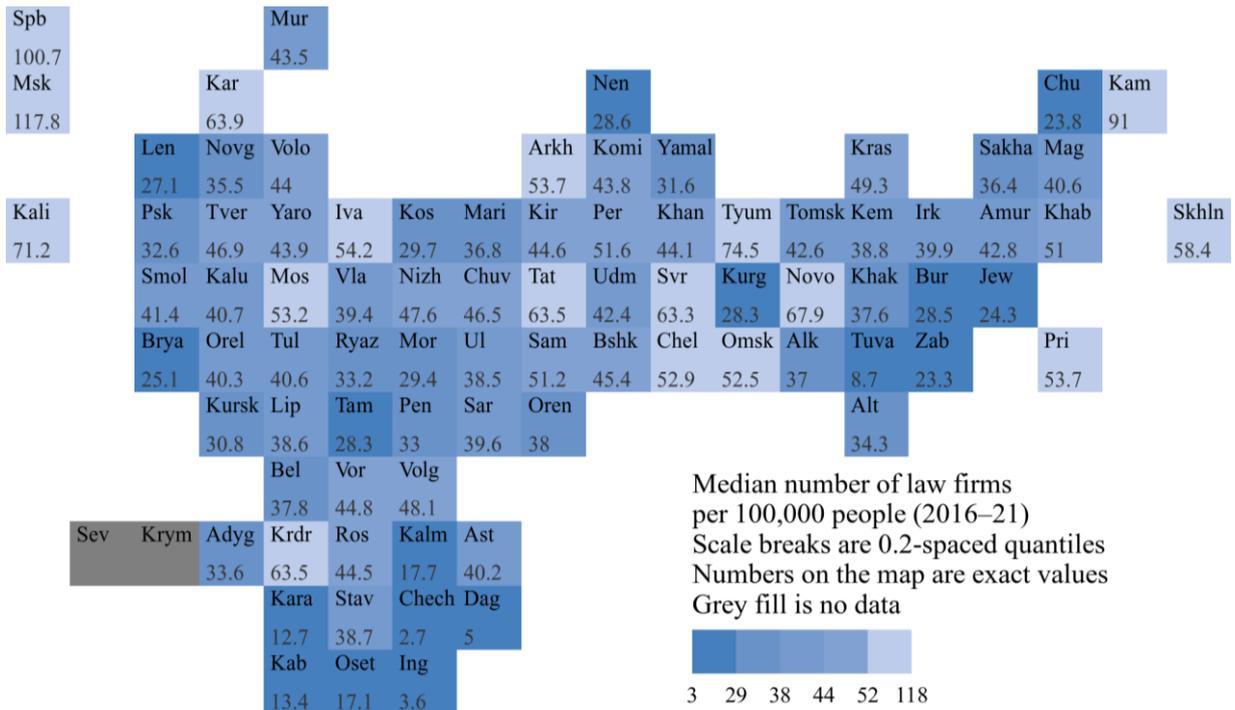


Fig. 1. The median annual count of law firms per capita by regions of Russia over the period from 2016 to 2021

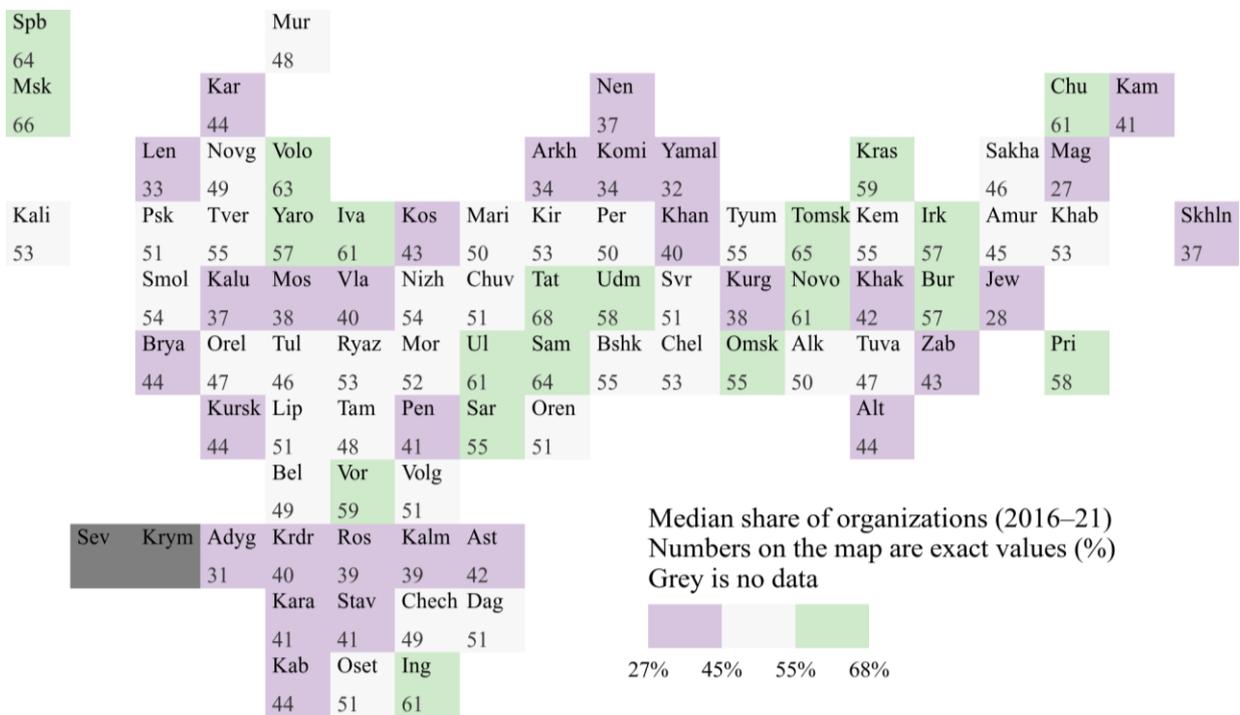


Fig. 2. The median annual share of companies among law firms by regions of Russia over the period from 2016 to 2021

Fig. 3 presents the combined results of the regional analysis based on the number of lawyers. The distribution of lawyers across regions is similar to that of law firms themselves (see Fig. 1), suggesting that legal companies in different regions are quite similar to each other in the number of employees. However, the role of legal business in regions' economies, as indicated by the share of lawyers in regions' labor forces, is distributed differently. Moscow and St. Petersburg, the two most populous cities, account for the largest number of lawyers and also exhibit the highest proportion of lawyers in the region's labor force. In contrast, the vast majority of other regions is characterized by a relatively uniform low share of lawyers (0.1–0.2 %) in the local labor force, with Sverdlovsk, Tyumen, and Novosibirsk regions being remarkable exceptions. Regions with an extremely low representation in the country's legal sector (for example, the Republic of Tuva and Altai Territory) also typically have a low proportion of lawyers in their regional labor force, except for the Jewish Autonomous Region.

The regional role of legal business does not appear to be contingent upon the presence or absence of district-level courts. However, it seems that the national role of a region in the legal sector is somehow connected with the location of such courts. This is evidenced by the fact that almost all regions with a relatively high share of the country's lawyers (>1 %) have at least one district-level court, while other regions typically do not have such courts. It is important to note that there are exceptions to this trend. For instance, the Republic of Bashkortostan and Volgograd Region have relatively high shares of lawyers but no district-level courts. In contrast, three sub-Moscow regions, Vologda and Tomsk regions, as well as Khabarovsk and Trans-Baikal territories, have an opposite situation. These discrepancies may be explained by several factors. For example, the presence of district-level courts in Tula, Vladimir, and Kaluga regions is not associated with the development of legal business, because the proximity to Moscow reduces the necessity for local law firms.

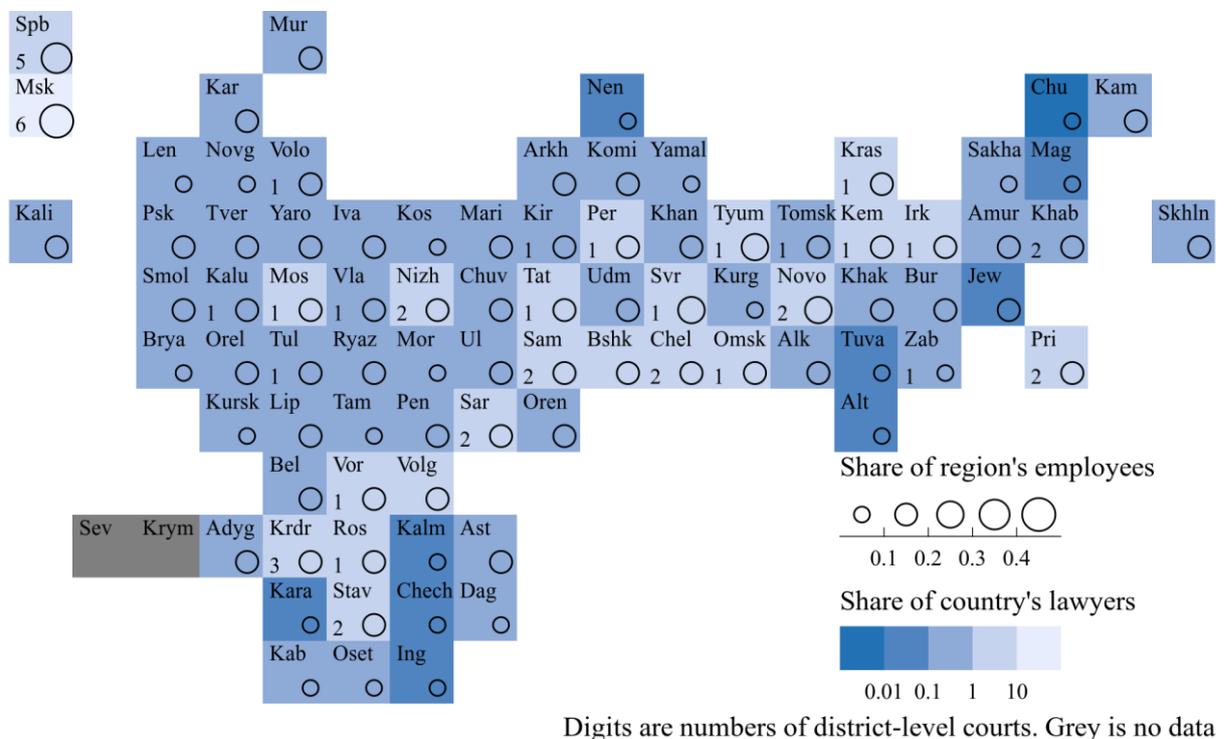


Fig. 3. The national and regional median annual shares of lawyers in regions of Russia over the period from 2018 to 2021

The changes in the number of law firms by region are depicted in Fig. 4. The number of such firms increased in the majority of regions, indicating the development of the legal business sector. In contrast, several regions, all of which are located in the European part of Russia, have experienced a net decrease in the number of law firms. In comparison to the increase rates observed in other regions, the net change in the number of law firms from 2016 to 2021 in these regions is relatively low (usually less than 10 %). In some cases, neither decline nor growth was clearly expressed (for example, in the Republic of Altai, Lipetsk, and Tambov regions). The regions with the most significant growth are some republics in the North Caucasus, as well as the Republic of Kalmykia and Nenets Autonomous Area. Their results are likely attributable to the low base effect, given that the absolute counts of law firms in all these regions are below 100 (see Fig. 1). It is noteworthy that Leningrad and Moscow regions also demonstrated one of the highest growth rates. It is likely that the relocation of law firms from the cities of Moscow and St. Petersburg to the surrounding regions has contributed to this outcome. Nevertheless, both Moscow and St. Petersburg cities also exhibited high net gain of law firms.

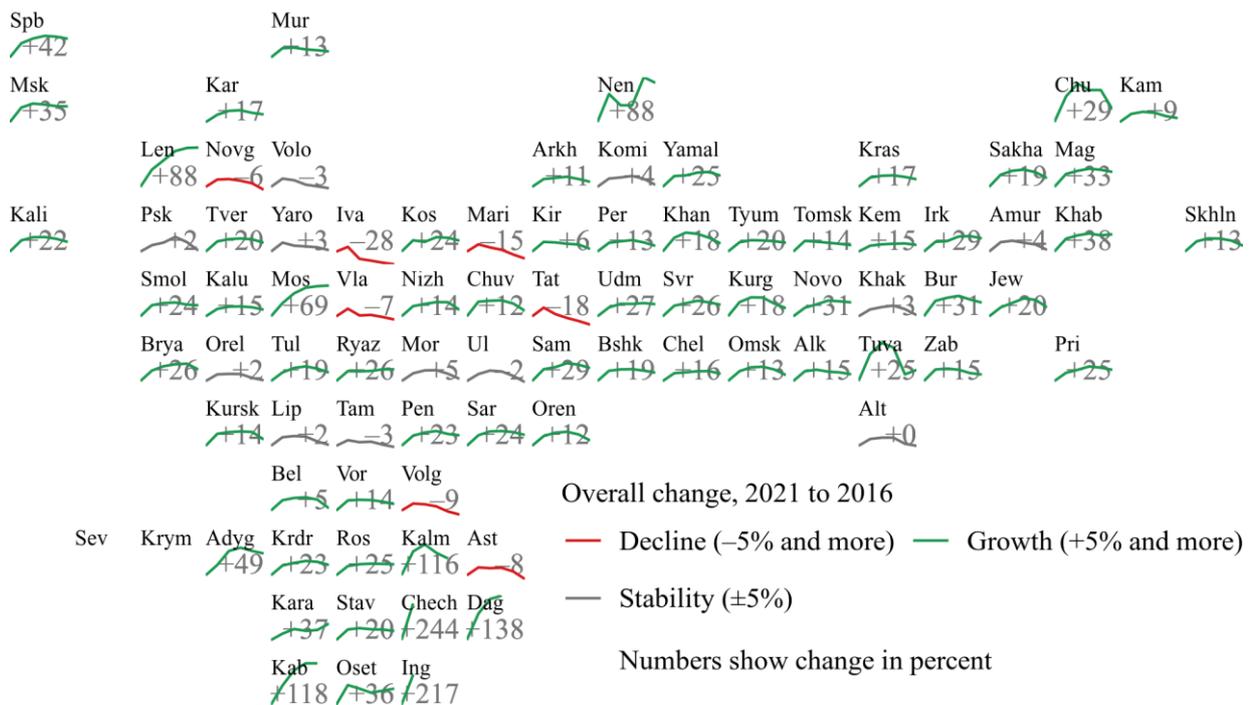


Fig. 4. The change in the number of law firms by region over the period from 2016 to 2021

The observed patterns of change indicated by line plots on the map can be divided into several groups. The first is the stable yet saturating increase typical for Moscow and Leningrad regions, and, to a lesser extent, Khabarovsk Territory, Rostov, and Ryazan Regions. The second is the inverted U-shaped curve which is characteristic of the majority of regions with overall growth in the number of legal firms. This pattern can be explained by the effect of the coronavirus (COVID-19) pandemic, which has negatively impacted small and medium-sized businesses and reversed the previous trend of growth. The height of the inverted U varies by region, with the highest observed in Chukotka Autonomous Area, the Republic of Tuva, and the Republic of Adygea. It can be hypothesized that the first group is a subset of the second, but that its intrinsic growth rate before the pandemic was higher, resulting in a slowing down of the growth rather than in a final decrease. The third pattern is typical of the regions with a general fall in the number of

law firms, and it can be described as a continuous decline following an initial period of short-term growth. The fourth group is a mixture of increase and decrease. For example, Nenets Autonomous Area and the Republic of North Ossetia — Alania demonstrate this pattern.

CONCLUSIONS

The regional analysis revealed several spatial features of legal business in Russia. First, the regions exhibit considerable variation in the number of law firms and lawyers. Several areas with a relatively high number of lawyers per capita are identified, including the Urals and Western Siberia cluster, a few regions of the Far East, Krasnodar Territory, the Republic of Tatarstan, and a number of other regions. As might be expected, the cities of Moscow and St. Petersburg are home to the largest number of law firms and lawyers. Furthermore, it is again Moscow and St. Petersburg cities that have the highest share of lawyers in their total labor force. Nevertheless, there are other regions with a relatively high role of legal businesses in their regional economies, including Sverdlovsk, Tyumen, and Novosibirsk.

Regions can be roughly divided into three categories: one with the legal organizations prevailing in the legal business, another with individual entrepreneurs prevailing over companies, and the last one where the proportion of individuals is almost equal to the proportion of companies. The high role of companies is typical for Moscow, Saint Petersburg, Volga, and Siberian regions. The opposite is observed in the European North and South, as well as certain regions in the Far East, Central Russia, and Western Siberia.

The role of the region in the country's legal business is typically associated with the presence of one or more district-level courts in the administrative center of the region. Only two regions do not act as hosts for any of these courts but still have a relatively high level of legal business development: Volgograd Region and the Republic of Bashkortostan. This observation can be explained in two ways. One possibility is that the courts act as a magnet for legal business because they are necessary for many legal activities. Alternatively, the courts are placed in regions and cities with already highly developed legal business sector. Further research may shed light on the direction of this court-business relationship.

From 2016 to 2021, the number of law firms in the majority of Russia's regions generally increased. However, a decrease was observed in some regions. The cities of Moscow and St. Petersburg with the surrounding regions are characterized by one of the highest increase rates. Additionally, some regions (mainly in the North Caucasus) exhibited extreme growth, but this may be attributed to the low base effect. The yearly patterns of change can be categorized into four groups. The inverted U-shaped change, which is likely explained by the coronavirus (COVID-19) pandemic, is the most common pattern among the regions.

The results of this exploratory study provide an overview of Russia's recent legal business geography and may be used as support for data-driven business and governmental decisions. Several research hypotheses may also be conducted from this analysis; thus, this study may be treated as a base for further academic development in the field of legal services geography in Russia. Furthermore, the reproducible data-driven methodology employed in this study, which is based entirely on open data and open source software tools may be utilized (with minor modifications) for regional analysis and mapping of other narrow service sector areas.

REFERENCES

- Baxter J., Yoon A.* No lawyer for a hundred miles?: Mapping the new geography of access of justice in Canada. *Osgoode Hall Law Journal*, 2015. V. 52. Iss. 1. P. 9–57. DOI: 10.60082/2817-5069.2791.
- Berry B. J. L.* Geography of market centers and retail distribution. Prentice-Hall, 1967. 146 p.

Brush J. E. The hierarchy of central places in Southwestern Wisconsin. *Geographical Review*, 1953. V. 43. No. 3. P. 380–402.

Christaller W., Baskin C. W. Central places in Southern Germany. Prentice-Hall, 1966. 230 p.

Daniels P. W. The geography of services. *Progress in Human Geography*, 1985. V. 9. No. 3. P. 443–451. DOI: 10.1177/030913258500900309.

Daniels P. W. The geography of services. *Progress in Human Geography*, 1986. V. 10. No. 3. P. 436–444. DOI: 10.1177/030913258601000308.

Daniels P. W. The geography of services. *Progress in Human Geography*, 1987. V. 11. No. 3. P. 433–447. DOI: 10.1177/030913258701100308.

Faulconbridge J. R. Business services and the financing of global production networks: The case of global law firms in Southeast Asia. *Journal of Economic Geography*, 2019. V. 19. No. 4. P. 897–919. DOI: 10.1093/jeg/lby066.

Gumenyuk I. S. On the dynamics of economic activity and its impact on the budgetary stability of municipalities of the Kaliningrad region. *IKBFU's Vestnik. Series: Natural and Medical Sciences (Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences)*, 2022. No. 1. P. 44–56 (in Russian).

Hansen N. The strategic role of producer services in regional development. *International Regional Science Review*, 1993. V. 16. No. 1–2. P. 187–195. DOI: 10.1177/016001769401600109.

Henderson W. D., Alderson A. S. The changing economic geography of large U.S. law firms. *Journal of Economic Geography*, 2016. V. 16. No. 6. P. 1235–1257. DOI: 10.1093/jeg/lbw036.

Hermelin B., Rusten G. The organizational and territorial changes of services in a globalized world. *Geografiska Annaler: Series B, Human Geography*, 2007. V. 89. Iss. sup1. P. 5–11. DOI: 10.1111/j.1468-0467.2007.00256.x.

Hitchens D. M. W. N. The adequacy of the supply of professional advisory services to manufacturing firms in rural Mid Wales. *The Service Industries Journal*, 1997. V. 17. No. 4. P. 669–689. DOI: 10.1080/02642069700000040.

Lachininsky S. S., Sorokin I. S. Spatial structure and development of settlements in the Saint Petersburg agglomeration. *Baltic Region*, 2021. V. 13. No. 1. P. 48–69 (in Russian). DOI: 10.5922/2079-8555-2021-1-3.

Lai K. P. Y., Samers M. Towards an economic geography of FinTech. *Progress in Human Geography*, 2021. V. 45. No. 4. P. 720–739. DOI: 10.1177/0309132520938461.

Lisin D. A., Semina I. A., Folomeykina L. N. Foreign European countries: Development of the service sector according to the composite purchasing managers' index. *Russian Journal of Regional Studies*, 2020. V. 28. No. 2. P. 214–238 (in Russian). DOI: 10.15507/2413-1407.111.028.202002.214-238.

Moiseeva E. N., Skougarevskiy D. A. Rynok iuridicheskikh uslug v Rossii: Chto govorit statistika (Seriiia "Analiticheskie obzory po problemam pravoprimereniia") = Legal services market in Russia: What does statistics say (Analytical reviews on law enforcement problems series). IRL EUSPb Publishing, 2016. 28 p. (in Russian).

Preobrazhenskiy Yu. V., Kushnir K. S. Territorial aspects of the development of public catering in the Saratov region and Saratov city. *Vestnik TVGU Series "Geography and Geoecology" (Tver State University Herald Series "Geography and Geoecology")*, 2018. No. 2. P. 30–40 (in Russian).

Reilly W. J. The law of retail gravitation. W. J. Reilly, 1931.

Rostislav K. V. Does geographical concentration affect the profitability of Russian enterprises? *Regional Studies*, 2021. No. 1(71). P. 4–17 (in Russian).

Shulgina O. V. The geography of the public services sphere in Russia: New development factors at the turn of the XX–XXI centuries on the example of the education system. *MCU Journal of Natural Sciences*, 2019. No. 2(34). P. 49–64 (in Russian). DOI: 10.25688/2076-9091.2019.34.2.5.

Shustova E. A. Geography of banking in Germany. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5: Geografiya (Moscow University Bulletin. Series 5: Geography)*, 2015. No. 3. P. 79–85. (in Russian).

Tkachenko A. A., Fomkina A. A. The geography of the service sector: The passed way, the current situation and prospects. *Regional Studies*, 2016. No. 3. P. 5–13 (in Russian).

Wójcik D. Financial geography I: Exploring FinTech — maps and concepts. *Progress in Human Geography*, 2021. V. 45. No. 3. P. 566–576. DOI: 10.1177/0309132520952865.

Yastrebov O. A., Tinkova A. A. Legal services global market: Current state and development prospects. *RUDN Journal of Economics*, 2021. V. 29. No. 3. P. 510–523 (in Russian). DOI: 10.2363/2313-2329-2021-29-3-510-523.

Zyrianova I. S. Rent-a-car as a service industry: Geographic and organizational aspects. *Regional Studies*, 2018. No. 1(59). P. 156–165 (in Russian).

УДК: 599.51

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-66-79

Е. А. Криксунов¹, С. В. Чистов², А. Р. Аляутдинов³, А. Е. Бобырев⁴, Д. Г. Ковзель⁵,
В. А. Гриценко⁶, М. Ю. Фершалов⁷

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЕРЫХ КИТОВ В ПИЛЬТУНСКОМ НАГУЛЬНОМ РАЙОНЕ С УЧЕТОМ ДАНЫХ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

АННОТАЦИЯ

Систематические исследования западной (охотско-корейской) популяции серого кита, занесенного в Красную книгу Российской Федерации, проводятся с 1997 г. С начала 2000-х гг. эти исследования носят мониторинговый характер и обеспечиваются группой нефтедобывающих компаний, ведущих активную деятельность на шельфе Сахалина. К настоящему времени накоплен большой объем сведений, относящихся к различным сторонам жизни серого кита. Получены оценки численности популяции серого кита, изучен ее размерный и половой состав, а также пищевое и миграционное поведение этих животных у берегов Сахалина. Ранее нами были проанализированы материалы мониторинга, относящихся к 2001–2012 гг. Прделанная работа ставила целью оценить пространственную сопряженность в динамике распределения серых китов и их кормовых объектов. Был создан ГИС-проект, с помощью которого апробированы и реализованы подходы к оценке пространственного соответствия элементов системы «киты – бентос». Проведенный анализ показал, что наиболее привлекательными для китов являются лежащие на малых глубинах обширные поля с высокой, относительно равномерно распределенной, биомассой амфипод. К району нагула кита примыкают участки, на которых установлены нефтедобывающие платформы и элементы транспортной системы углеводородов. Деятельность инженерных систем может оказывать негативное воздействие на животных, дезориентировать их, отпугивать, нарушать коммуникации и даже приводить к физическому повреждению. Данные постоянного акустического мониторинга были включены в созданную ранее ГИС для оценки влияния производственного шума на поведение китов. Полученные результаты не позволяют считать акустическое воздействие значимым фактором, влияющим на пространственное распределение нагуливающейся популяции кита в Пильтунском районе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: серые киты, акустический мониторинг, шельф северо-востока о. Сахалин, пространственные сопряжения, картографическое моделирование

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, биологический факультет, ул. Колмогорова, д. 1-12, Москва, Россия, 119234, *e-mail*: kriksunov@mail.ru

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: svchistov@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: alik@geogr.msu.ru

⁴ Институт проблем экологии и эволюции (ИПЭЭ РАН) им А. Н. Северцова, Ленинский пр-т, д. 33, Москва, Россия, 119071, *e-mail*: abobyrev@mail.ru

⁵ Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева, ул. Балтийская, д. 43, Владивосток, Приморский Край, Россия, 690041, *e-mail*: mfershalov@poi.dvo.ru

⁶ Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева, ул. Балтийская, д. 43, Владивосток, Приморский Край, Россия, 690041, *e-mail*: mfershalov@poi.dvo.ru

⁷ Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева, ул. Балтийская, д. 43, Владивосток, Приморский Край, Россия, 690041, *e-mail*: mfershalov@poi.dvo.ru

**Evgeny A. Kriksunov¹, Sergey V. Chistov², Ali R. Alyautdinov³, Alexander E. Bobyrev⁴,
Dmitry G. Kovzel⁵, Vladimir A. Gritsenko⁶, Mikhail Yu. Fershalov⁷**

SPATIAL DISTRIBUTION OF GRAY WHALES IN THE PILTUN FEEDING AREA TAKING INTO ACCOUNT ACOUSTIC MONITORING DATA

ABSTRACT

Systematic studies of the western (Okhotsk-Korean) population of the Gray Whale, listed in the Red Book of the Russian Federation, have been carried out since 1997. Since the early 2000s, these studies have been of a monitoring nature and are carried out by a group of oil producing companies active on the Sakhalin shelf. To date, a large amount of information has been accumulated relating to various aspects of the life of the gray whale. Estimates of the population size of the gray whale were obtained, its size and sex composition was studied, as well as the feeding and migratory behavior of these animals off the coast of Sakhalin. Previously, we analyzed monitoring materials relating to 2001–2012. The work done was aimed at assessing the spatial contingency in the dynamics of the distribution of gray whales and their food items. A GIS project was created, with the help of which approaches to assessing the spatial correspondence of elements of the whales-benthos system were tested and implemented. The analysis showed that the most attractive for whales are vast fields lying at shallow depths with a high, relatively evenly distributed amphipod biomass. The whale feeding area is adjacent to areas where oil production platforms and elements of the hydrocarbon transport system are installed. The activities of engineering systems can have a negative impact on animals, disorient them, scare them away, disrupt communications and even lead to physical damage. Continuous acoustic monitoring data was included in a previously created GIS to assess the impact of industrial noise on whale behavior. The results obtained do not allow us to consider acoustic impact as a significant factor influencing the spatial distribution of the feeding gray whale population in the Piltun area.

KEYWORDS: gray whale, acoustic monitoring, shelf of the northeast of Sakhalin Island, spatial connections, geoprocessing cartography

ВВЕДЕНИЕ

Серый кит охотско-корейской (или западной) популяции занесен в V категорию Красной книги Российской Федерации, а по критериям МСОП принадлежит к видам, находящимся под угрозой исчезновения. В исторические времена эта популяция насчитывала несколько тысяч особей [Yablokov, Bogoslovskaya, 1984], но из-за интенсивного и нерегулируемого промысла ее численность сократилась настолько, что к началу 1970-х гг.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Biology, 1-12, Kolmogorova str., Moscow, 119991, Russia, *e-mail*: kriksunov@mail.ru

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

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail*: alik@geogr.msu.ru

⁴ Institute of Ecology and Evolution A. N. Severtsov, 33, Leninsky ave., Moscow, 119071, Russia, *e-mail*: abobyrev@mail.ru

⁵ V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, 43, Baltiyskaya str., Vladivostok, Primorsky Kray, 690041, Russia, *e-mail*: mfershalov@poi.dvo.ru

⁶ V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, 43, Baltiyskaya str., Vladivostok, Primorsky Kray, 690041, Russia, *e-mail*: mfershalov@poi.dvo.ru

⁷ V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, 43, Baltiyskaya str., Vladivostok, Primorsky Kray, 690041, Russia, *e-mail*: mfershalov@poi.dvo.ru

она была сочтена исчезнувшей [Bowen, 1974]. Дальнейшие наблюдения показали, что популяция продолжает существовать как небольшая остаточная группа, численность которой в настоящее время оценивается величиной порядка 150 особей [Тюрнева и др., 2019]. С начала 2000-х гг. проводятся интенсивные мониторинговые исследования этой популяции, обеспечиваемые группой компаний, ведущих нефтедобывающую деятельность на шельфе Сахалина.

В годы больших подходов (встречаемости) китов в их кормодобывающей деятельности и формировании зон повышенной встречаемости возрастает значение участков с высокой плотностью равноногих раков [Будникова, Бузруков, 2003; Ильяшенко, 2012; Блохин, Литовка, 2014; Lang et al., 2011].

Основной участок нагула, где киты проводят летне-осенний сезон, имеет весьма компактные размеры. Он представляет собой узкую (до глубин не более 50 м) вдольбереговую акваторию протяженностью около 100 км, расположенную на северо-востоке о. Сахалин [Ильяшенко, 2012; Рутенко, Соснин, 2014], в районе залива Пильтун.

Этот Пильтунский район нагула особенно богат кормовым бентосом, составляющим основу пищи серого кита — амфиподами, изоподами, моллюсками и червями. В этом же районе находятся нефтедобывающие платформы и другие элементы производственной инфраструктуры, деятельность которой может нарушать условия нагула китов. В настоящей работе сделана попытка оценки влияния производственного шума на характер пространственного распределения нагуливающейся группировки серого кита. Исследование проведено на основе включения в математико-картографический анализ данных ученых съемок по встречаемости китов, распределения их пищевых объектов и данных акустического мониторинга, ведущегося на площади нагула этих животных.

Общая схема исследования пространственно-временных особенностей встречаемости китов с учетом наличия корма и воздействий различных шумов представлена на рис. 1.

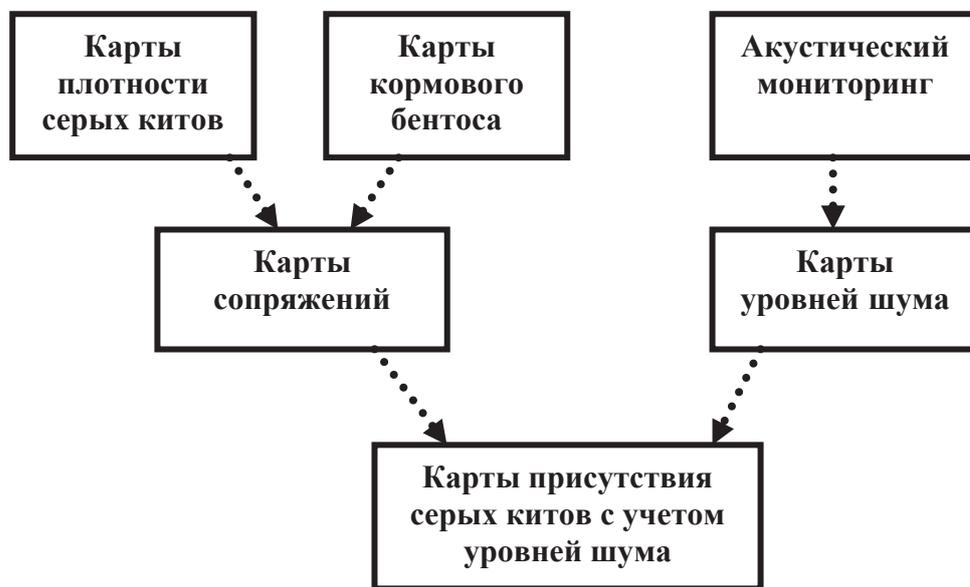


Рис. 1. Этапы картографического исследования факторов, влияющих на пространственное распределение серых китов
Fig. 1. Stages of cartographic research of factors influencing the spatial distribution of gray whales

Проведенная ранее работа с материалами мониторинга по оценке встречаемости китов и распределению и кормовых объектов (относящихся к 2001–2012 гг.) ставила целью анализ пространственной сопряженности в динамике распределения серых китов и их кормовых объектов. Ее итогом явилось создание ГИС-проекта, в котором разработаны и реализованы различные варианты учета степени пространственного соответствия друг другу элементов системы «киты – бентос» [Kriksunov et al., 2016]. Анализ динамики пространственных сопряжений (пространственных связей) позволил установить, что наиболее привлекательными для китов являются лежащие на малых глубинах обширные поля с высокой, относительно равномерно распределенной биомассой амфипод, где формируются зоны повышенной встречаемости китов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценки интенсивности шума

В основу анализа влияния шума на пространственно-временную динамику нагуливающейся группировки китов положены материалы акустического мониторинга (2002–2012 гг.), ведущегося на стационарных станциях в акватории Пильтунского района нагула [Рутенко, Гриценко, 2010; Borisov et al., 2008; Bradford et al., 2008; Rutenko et al., 2012], а также полученные ранее картографические оценки пространственного распределения животных [Kriksunov et al., 2016]. Число станций акустического мониторинга [Borisov et al., 2008; Rutenko et al., 2012], схема их расположения, характеристики размещения и глубины представлены в табл. 1 и на рис. 2. Картографические оценки пространственного распределения китов разделены на месячные интервалы (августа и сентября), что соответствует данным полевых учетов.

Табл. 1. Характеристики станций акустического мониторинга
Table 1. Characteristics of acoustic monitoring stations

Станция		Широта	Долгота	Глубина
Orlan	Орлан	52°21'36" N	143°35'00" E	32 m
Piltun-S	Пильтун-Ю	52°40'51" N	143°22'34" E	13 m
Piltun	Пильтун	52°49'18" N	143°24'54" E	20 m
PA-B-10	ПА-Б-10	52°53'2.1" N	143°20'10.6" E	10 m
PA-B-20	ПА-Б-20	52°54'00" N	143°23'20.5" E	20 m
Odoptu-PA-B	Одопту-ПА-Б	53°00'00" N	143°21'18" E	20 m
Odoptu-S-10	Одопту-Ю-10	53°03'42" N	143°18'18" E	10 m
Odoptu-S-20	Одопту-Ю-20	53°03'42" N	143°19'58" E	20 m
Odoptu-N-10	Одопту-С-10	53°09'06" N	143°17'24" E	10 m
Odoptu-N-20	Одопту-С-20	53°09'06" N	143°18'42" E	20 m
Control	Контрольная	53°25'57" N	143°11'06" E	20 m
Molikpaq	Моликпак	52°45'52" N	143°26'38" E	24 m

Обобщенные показатели акустической нагрузки представлены в форме интегральных оценок уровня шума для последовательных интервалов времени продолжительностью 10 суток. Средние арифметические значения SPL_{rms} получены специалистами группы акустического мониторинга на основе следующего подхода.



Рис. 2. Положение станций акустического мониторинга в Пилтунском нагульном районе

Fig. 2. Position of acoustic monitoring stations in the Piltun feeding area

При первичном спектральном анализе акустических измерений вариаций акустического давления $p(t)$ в частотном диапазоне 2–15 000 Гц по последовательным 1-секундным реализациям рассчитаны значения периодограмм $G(f)$, которые затем приведены к абсолютным значениям в $\text{мкПа}^2/\text{Гц}$. В результате усреднения полученных значений периодограмм по 60 последовательным реализациям (за 1 мин) рассчитана оценка спектра акустических шумов, измеренных за 1 мин, $\hat{G}(f)$, т. е. определено значение спектральной плотности мощности вариаций $p(t)$ в полосе 1 Гц. После этого проведено интегрирование в разных частотных диапазонах и соответственно определены значения дисперсии $D(\Delta f)$ измеренных акустических шумов в частотном диапазоне $\Delta f = 20\text{--}5\ 000$ Гц.

При оперировании с дБ уровень дисперсии совпадает с уровнем rms акустического шума в заданном диапазоне Δf , в дБ. Таким образом, значение SPL_{rms} (20–5000 Hz), полученное на временном интервале 60 сек, является первым дискретным значением для оценки акустических шумов в данной точке мониторинга. Далее найдены соответствующие дискретные значения для 24 часов, 10 суток, 1 месяца и 2 месяцев и т. д.

На рис. 3 представлен фрагмент данных, характеризующих динамику суточных уровней шума в августе и сентябре 2009 г., рассчитанных для двух стационарных станций акустического мониторинга — Odoptu-N-10 и Odoptu-N-20.

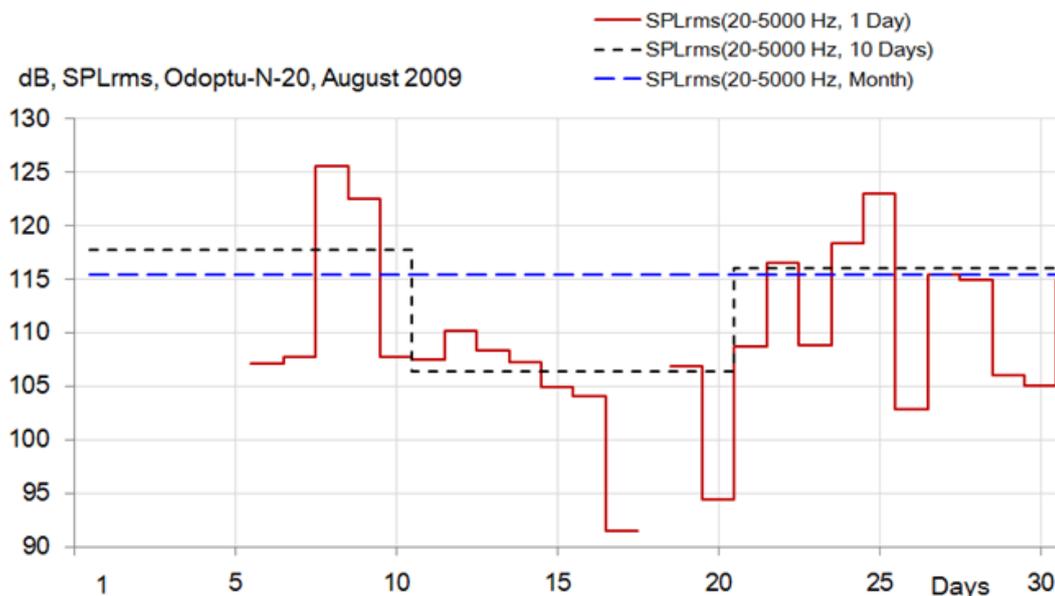


Рис. 3. Фрагмент данных о суточных уровнях шума в августе 2009 г. для станции мониторинга Odoptu-N-20

Fig. 3. Fragment of data on daily levels of acoustic noise in August 2009 for monitoring station Odoptu-N-20

Варианты картографического анализа

На этапе предварительного анализа, имеющего целью отработку методики, проведена картографическая оценка влияния шума на особенности пространственно-временной динамики серых китов в 2009 и 2010 гг. В ходе анализа в качестве показателя акустической нагрузки использованы дискретные среднемесячные оценки акустических шумов, разделенные на интервалы: <110 дБ; 110–120 дБ; >120 дБ.

Картографические результаты экспериментов представлены на рис. 4 и 4а, где на фоне карт пространственных сопряжений между численностью китов и обилием кормовых организмов (всего 9 типов сопряжений, представляющих возможные комбинации низкой, средней и высокой численности китов и, соответственно, низкого, среднего и высокого обилия кормовых организмов) кружками различного тона показаны осредненные по месяцам три типа шумовых воздействий (плотность цвета в значке соответствует уровню шума).

Как видно из рис. 4 и 4а, представление данных картографического анализа в детализированной форме, учитывающей различные уровни пространственного сопряжения в системах «киты – кормовой бентос», создает значительные трудности для интерпретации

полученных результатов. По этой причине решено ограничить детализацию представления результатов за счет использования в процедуре оверлея следующих карт:

- 1) карты ареала встречаемости китов (без учета повторности регистраций);
- 2) картографической модели распределения кормового бентоса с градациями плотности <math><40; 40-60; >60 \text{ г/м}^2</math>;
- 3) карты станций акустического мониторинга с диаграммами, передающими зарегистрированный уровень шума.

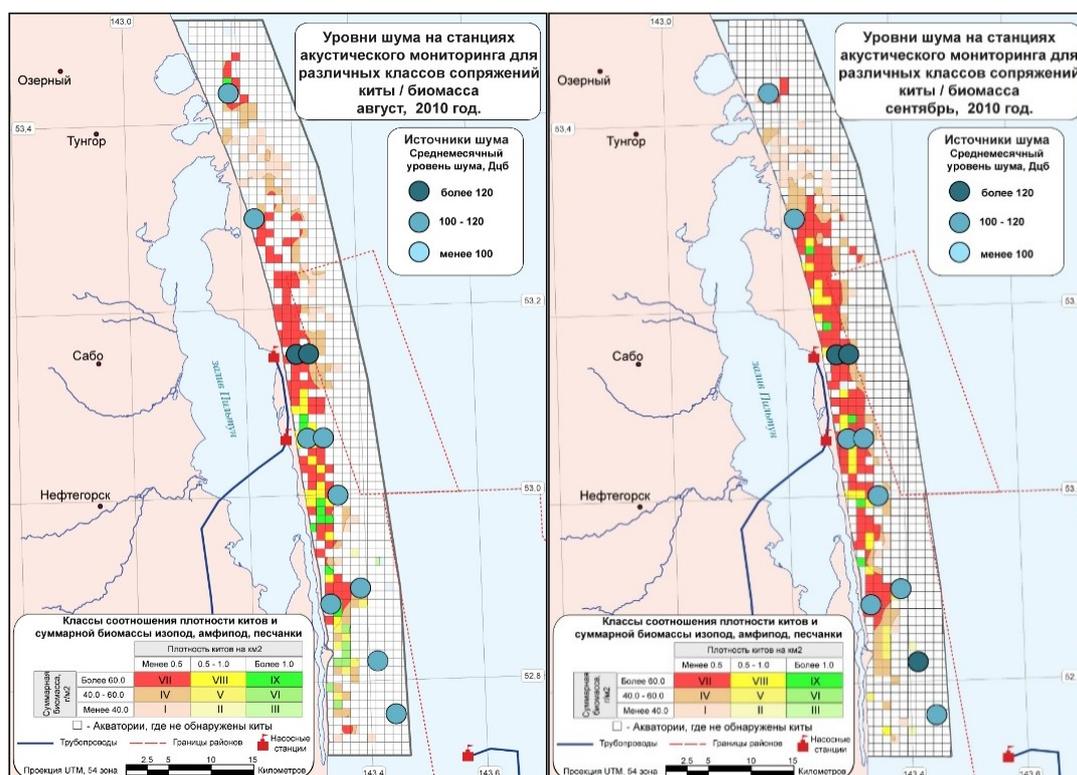


Рис. 4. Акустические станции на картах, в которых цветом переданы уровни сопряжения в пространственном положении китов и их кормовых организмов
 Fig. 4. Acoustic stations on maps in which communication levels in the spatial position of whales and their food organisms are shown in color

Классы соотношения плотности китов и суммарной биомассы изопод и амфипод				
		Плотность китов на км ²		
		Менее 0.09	0.09 - 0.30	Более 0.30
Суммарная биомасса, г/м ²	Более 7.5	VII	VIII	IX
	3.1 - 7.5	IV	V	VI
	Менее 3.1	I	II	III

□ Акватории с отсутствием данных о китах

Рис. 4а. Стандартные условные обозначения к картам пространственных сопряжений плотности китов и суммарной биомассы их кормовых видов (на примере 2008 г.)
 Fig. 4a. Standard symbols for maps of spatial correlations of whale density and total biomass of their forage species (using the example of 2008)

Для картографического отображения уровня шума использованы данные регистраций на станциях акустического мониторинга, которые приводят к следующему распределению значений SPLrms (рис. 5).

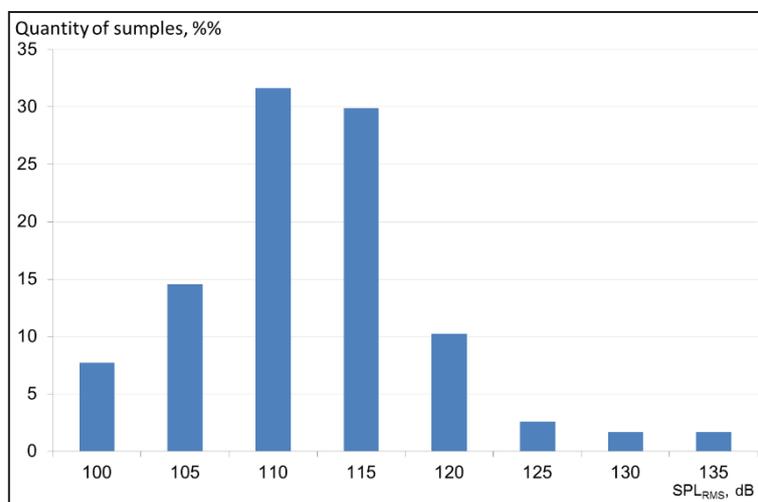


Рис. 5. Гистограмма встречаемости уровней шума за период наблюдений
Fig. 5. Histogram of the occurrence of noise levels during the observation period

Результаты статистической обработки распределения дают следующие оценочные категории уровня шума: <105; 105–115; >115 дБ. Соответствующие уровни отображены на серии карт за различные годы мониторинга по стандартной легенде с помощью разделенных на сектора круговых диаграмм, относящихся к каждой станции акустического мониторинга (рис. 6 и 6а). Цвет каждого сектора отражает тот или иной уровень шума, а площадь сектора — его относительную продолжительность в течение периода регистрации (табл. 2).

Табл. 2. Данные для расчета параметров круговых диаграмм (на примере августа 2009 г.)
Table 2. Data for calculating pie chart parameters (using the example of August 2009)

Акустические станции	Доля (%) интервала уровней шума для соответствующих станций мониторинга (август 2009)		
	<105 дБ	105–115 дБ	>115 дБ
Control	75	12.5	12.5
A10	79	10.5	10.5
A9	67	25	8
Odoptu PA-B	86	0	14
Odoptu N-10	6	67	27
Odoptu N-20	16	52	32
Odoptu S-10	77	17	6
Odoptu S-20	52	29	19
PA-B-10	81	0	19
PA-B-20	28	62	10
Piltun	13	83	4
Molikpaq	0	29	71
Piltun-S	67	26	7
Orlan	67	33	0

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате получена серия карт (рис. 6, на примере фрагмента южной части исследуемой акватории в 2010 г.), на которых отражены конкретные ситуации, характерные для августа и сентября каждого года. Всего составлено 22 экземпляра таких карт, по одному на конец лета и начало осени каждого года исследования.

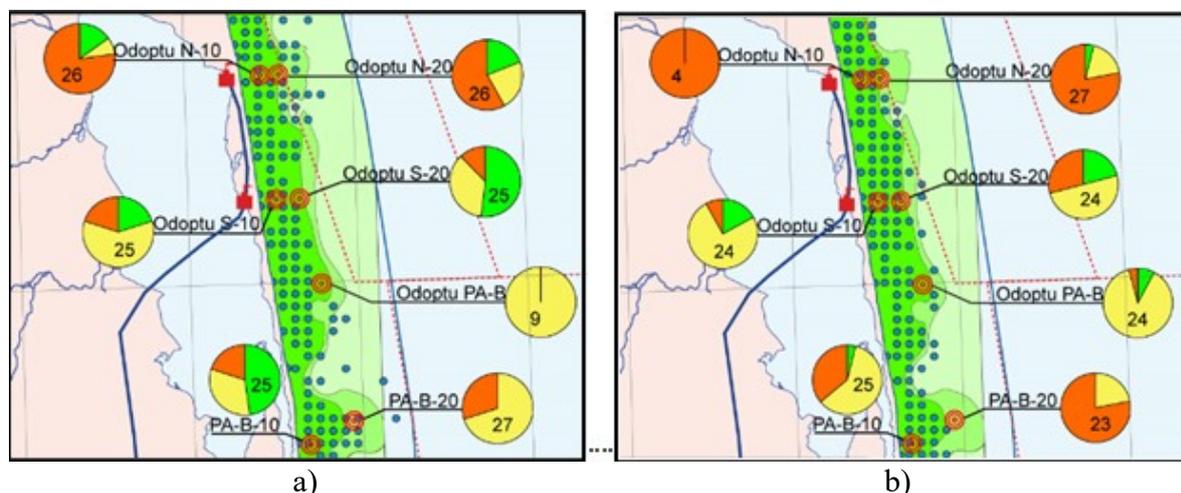


Рис. 6. Фрагмент карты, демонстрирующей уровень акустического воздействия, распределение китов и их кормовых организмов в августе (а) и сентябре (б) 2010 г.

Fig. 6. Fragment of a map showing the level of acoustic impact, the distribution of whales and their food organisms in August (a) and September (b) of 2010

В легендах (рис. 6а) отражаются конкретные результаты совмещения точек встречаемости китов, плотности распределения кормового бентоса и данные регистрации уровня шума на станциях акустического мониторинга в период с 2002 по 2012 гг.

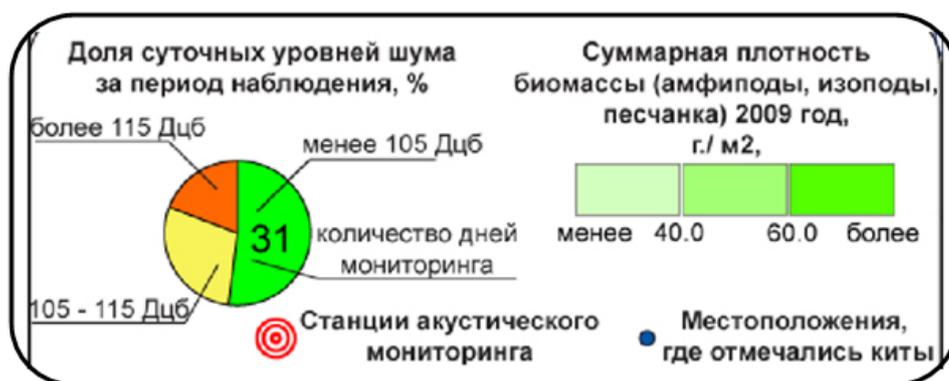


Рис. 6а. Схема условных обозначений к серии карт, показывающих акустическую нагрузку, регистрируемую станциями мониторинга в различные годы

Fig. 6a. Legend diagram for a series of maps showing acoustic forcing recorded by monitoring stations during the study period

Именно в соответствии с концепцией этой легенды построена серия итоговых карт на весь период настоящего исследования. Все карты отражают результаты совмещения ареалов встречаемости китов, плотности распределения кормового бентоса и данные регистрации уровня шума на станциях акустического мониторинга.

В первую очередь обращает на себя внимание заметные от августа к сентябрю изменения ареала регистрации китов в отдельные годы. Эти изменения наиболее отчетливо проявляются в 2005, 2007, 2008 и 2009 гг., для которых характерна мозаичная картина распределения кормового бентоса или его локализация на относительно небольших участках Пильгунского района.

К годам с высоким уровнем шума можно отнести 2004 г. (сентябрь) и 2005 г. (август), 2006 г. (август), 2007 г. (август), 2010 г. (август и сентябрь). Так, в сентябре 2004 г. зарегистрирован повышенный уровень шума на станциях «Одопту север 10», «Одопту север 20», что, однако, не отразилось на изменениях числа встреченных китов в зонах, находящихся в окрестностях этих станций.

В 2005 г. в августе зарегистрированы достаточно высокие уровни шума на станциях «РА В 20», «Пильтун». К сентябрю интенсивность шума на этих участках снизилась. Это также не привело к изменениям области регистрации китов.

В августе 2006 г. участки регистрации китов совпали с положением акустических станций «РА В 20, Пильтун» и соседних с ними, регистрирующих максимальный уровень шума. В сентябре уровень шума на этих участках снизился. Интересно, что одновременно с этим на прилегающих участках произошло снижение встречаемости китов, т. е. киты отреагировали на снижение шума уходом из района. Близкая картина характерна для 2007 г.

В серии «шумных лет» особо выделяется 2010 г. с длительными августовскими и столь же длительными сентябрьскими регистрациями шумов, превышающих уровень 115 дБ. В этом году от августа к сентябрю существенно повысился уровень шума, зарегистрированный на всех акустических станциях, лежащих к югу от станции «Одопту Север 10». Однако конфигурация области регистрации китов практически не изменилась. Таким образом, исходя из сопоставления положения акустических станций, регистрирующих максимальные уровни шума, и встречаемости китов на прилегающих к станциям участках, можно заключить, что накопленные к настоящему времени данные не дают оснований для отнесения шума к сколько-нибудь заметным факторам, влияющим на распределение серых китов.

Как уже было отмечено, гораздо большее влияние на конфигурацию области встречаемости китов оказывают межгодовые изменения обилия и распределения кормового бентоса. Экстремальными в этом отношении можно считать 2008, 2009, 2011 гг., в меньшей степени 2006, 2007 гг. Так, в 2008 г. зона распространения кормового бентоса с высокими показателями плотности (>60 г/м²) протягивалась узкой полосой вдоль мелководий, примыкающих к местам расположения основных акустических станций [Kriksunov et al., 2016]. В августе этого года область встречаемости серых китов практически полностью совпала с богатыми кормом участками акватории. В сентябре единичные встречи китов отмечены за пределами этих участков, видимо, из-за общего повышения численности нагуливающийся группировки, о чем свидетельствует более высокое количество регистраций животных в этом месяце. В 2009 г. произошло экстремальное сокращение акваторий, богатых кормовых бентосом. Меридиональная протяженность их зоны сократилась до нескольких десятков километров. В 2011 г. картина распределения бентоса почти полностью повторяла ситуацию 2009 г., за исключением южной части района, где сформировалась дополнительная небольшая зона высокой плотности бентоса.

В целом, хорошее совпадение области регистрации китов с зонами высокой плотности кормового бентоса наблюдается в годы, когда зоны распространения высококормных участков сливаются в единую, однородную область, занимающую часть Пильгунского района нагула. К таким годам относятся: 2003, 2004, 2008, 2010, 2012 гг. И наоборот, пространственная сопряженность в системе «киты – корм» нарушается, когда

распределение корма становится неоднородным, мозаичным, разделенным на отдельные сравнительно небольшие участки.

Разработанная ГИС-система позволила получить статистики, которые с определенной степенью приближения могут рассматриваться как площадные оценки акваторий распространения китов в зонах с различной плотностью бентоса. Они представляют собой суммарные площади стандартных километровых ячеек, в пределах которых регистрируется присутствие животных.

На графиках (рис. 7) представлена годовая динамика площадей регистрации китов по зонам, различающимся обилием кормового бентоса, отдельно для августа (верхний рисунок) и сентября (нижний рисунок) 11-летнего периода наблюдений. Прослеживается четкая закономерность: наибольшая площадь занятых китами участков приходится на зону с максимальной плотностью кормового бентоса. Соответствующая этому верхняя кривая располагается над двумя другими кривыми, соответствующими районам средней и низкой кормности. Иными словами, киты чаще всего регистрируются в акваториях с большой биомассой бентоса.

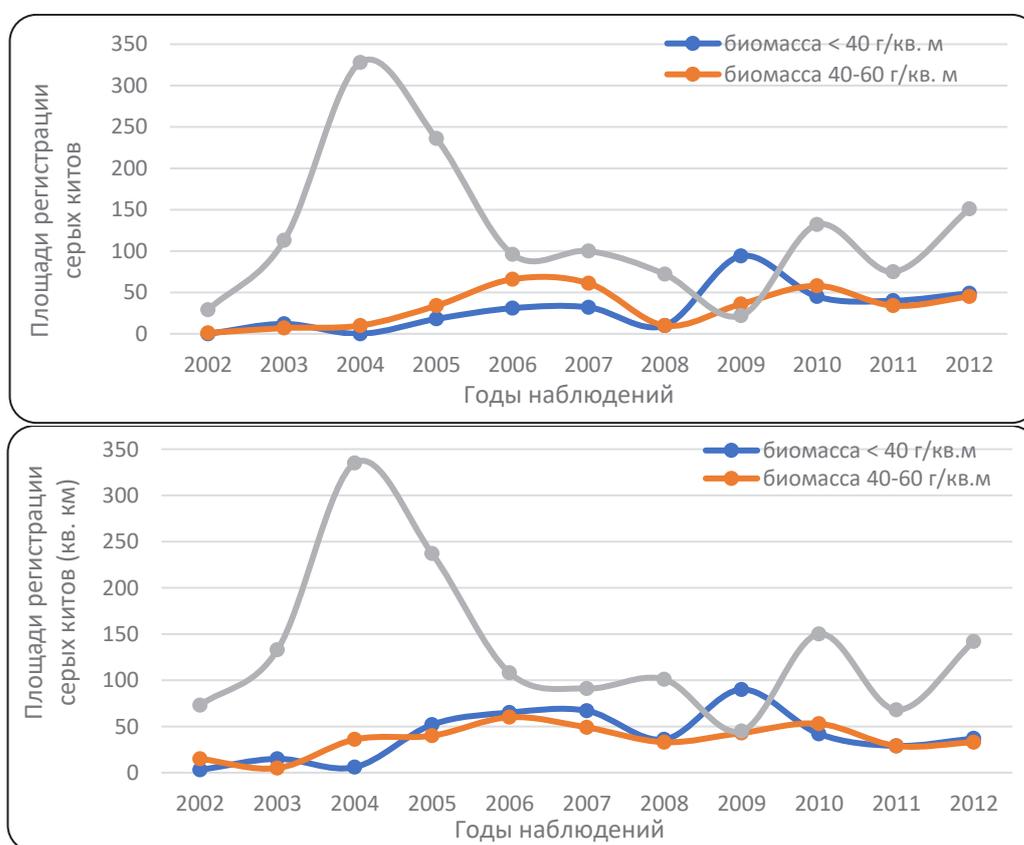


Рис. 7. Площади участков с разной концентрацией кормовых организмов, занятые китами в исследуемый период

Fig. 7. The size of areas with different concentrations of food organisms occupied by whales during the study period

Обращает на себя внимание и то, что линии графика, соответствующие площадям распространения китов в зонах средней и низкой плотности корма, имеют очень малые различия. Это может означать, что принятые в качестве характеристики «средней» и «низкой» плотности корма градации бентоса китами практически не различаются.

ВЫВОДЫ

Накопленная с 2002 по 2012 гг. статистика по встречаемости китов Пильтунского района в зонах с различным уровнем шума говорит об отсутствии ожидаемой простой зависимости между интенсивностью акустического фона и динамикой пространственного распределения нагуливающейся группировки.

Не исключено, что более определенные результаты могут быть получены за счет анализа отдельных видов работ, когда возникающий от них шум (например, при рытье траншей) одновременно сопровождается изменениями условий питания животных (например, за счет разрушения донных биоценозов).

В серии лет мониторинга наиболее «шумным» является 2010 г. В августе и сентябре этого года акустические станции, установленные на участках нагула серого кита, зарегистрировали шумы, уровень которых превышал 115 дБ. Картографическое сопоставление учетных данных по встречаемости серых китов в летние месяцы 2010 г. не выявило влияние шума на ареал нагула этих животных.

В результатах анализа прослеживается влияние на ареал встречаемости китов межгодовых изменений обилия и распределения кормового бентоса. Сопоставление площадных оценок ареалов регистрации китов, расположенных в зонах с различным обилием кормового бентоса (менее 40, 40–60 и более 60 г/м²), демонстрирует следующую закономерность: наибольшая площадь занятых китами участков приходится на зону с максимальной плотностью кормового бентоса.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность всем российским и иностранным исследователям, принимавшим участие в мониторинге популяции серого кита и его кормового ресурса в Пильтунском лицензионном районе. Особую благодарность выражаем специалистам Тихоокеанского океанологического института и компании Экссон нефтегаз лимитед, предоставившей необходимые материалы и поддержку в выполнении данного исследования.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express gratitude to all Russian and foreign researchers who took part in monitoring the gray whale population and its food resource in the Piltun license area. We express special gratitude to the specialists of the Pacific Oceanological Institute and Exxon Neftegaz Limited, who provided the necessary materials and support in carrying out this research.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Блохин С. А., Литовка Д. И.* Серый кит Дальнего Востока России: история открытия, изучения и добычи. Известия ТИНРО, 2014. Т. 179. С. 65–80.
- Будникова Л. Л., Бузруков Р. Г.* Состав и распределение амфипод (Amphipoda: Gammaridea, Caprellidea) на шельфе и верхней части склона восточного Сахалина. Известия ТИНРО, 2003. Т. 135. С. 197–220.
- Ильяшенко В. Ю.* Серый кит (*Eschrichtius robustus*, Lilljeborg, 1861) восстанавливает естественноисторический ареал. Сборник научных трудов по материалам VII Международной конференции «Морские млекопитающие Голарктики», 2012. С. 269–272.
- Рутенко А. Н., Гриценко В. А.* Мониторинг антропогенных акустических шумов на шельфе о. Сахалин. Акустический журнал, 2010. Т. 56. № 1. С. 77–81.
- Рутенко А. Н., Соснин В. А.* Гидродинамические процессы на шельфе о. Сахалин в прибрежном Пильтунском районе кормления серых китов и их связь с атмосферной циркуляцией. Метеорология и гидрология, 2014. № 5. С. 74–93.

Тюрнева О. Ю., Яковлев Ю. М., Вертянкин В. В., Ван Дер Вольв П., Скотт М. Д. Краткие результаты долгосрочных исследований по фотоидентификации серых китов (*Eschrichtius robustus*) у северо-восточного побережья острова Сахалин. Морские млекопитающие Голарктики. Сборник научных трудов по материалам X международной конференции, посвященной памяти А. В. Яблокова, Архангельск, 29 октября – 02 ноября 2018 г. М.: РОО «Совет по морским млекопитающим», 2019. Т. 1. С. 332–343.

Borisov S. V., Kovzel D. G., Rutenko A. N., Ushchipovskii V. G. A Self-Contained Hydroacoustic Station with Radio Channel for Acoustic Measurements on the Shelf. *Instruments and Experimental Techniques*, 2008. V. 51. No. 5. P. 762–767.

Bowen S. L. Probable Extinction of the Korean Stock of the Gray Whale (*Eschrichtius robustus*). *Journal of Mammalogy*, 1974. V. 55. Iss. 1. P. 208–209.

Bradford A. L., Weller D. W., Wade P. R., Burdin A. M., Brownell R. L. Jr. Population abundance and growth rate of western gray whales *Eschrichtius robustus*. *Endangered Species Research*, 2008. V. 6. P. 1–14.

Kriksunov Ye., Alyautdinov A., Bobyrev A., Chistov S. Study of associativity between the spatial distributions of gray whales and their prey species offshore north-east coast of Sakhalin Island. *Regional Studies in Marine Science*, 2016. V. 8. No. 3. P. 466–479.

Lang A. R., Weller D. W., Taylor B. L., LeDuc R. G., Calambokidis J., Burdin A. M., Pease V. L., Klimek A., Scordino J., Robertson K., Litovka D., Burkanov V., Gearin P., Jacobsen J., Craig G. J., Bruce M., Brownell R. L. Jr. Genetic analysis of gray whales in the eastern and western North Pacific. *Abstr. 19th Bien. Conf. on the Biol. of Marine Mammals*. Tampa, FL, 27 Nov – 02 Dec 2011. P. 170.

Rutenko A. N., Borovoi D. I., Gritsenko V. A., Petrov P. S., Ushchipovskii V. G., Boekholt M. Monitoring the Acoustic Field of Seismic Survey Pulses in the Near Coastal Zone. *Acoustical Physics*, 2012. V. 58. No. 3. P. 326–338.

Yablokov A. V., Bogoslovskaya L. S. A review of Russian research on the biology and commercial whaling of the gray whale. *The Gray Whale, Eschrichtius Robustus*. Orlando, FL: Academic Press Inc., 1984. P. 465–485.

REFERENCES

Blokhin S. A., Litovka D. I. Gray whale of the Russian Far East: history of discovery, study and production. *Izvestiya TINRO*, 2014. V. 179. P. 65–80 (in Russian).

Borisov S. V., Kovzel D. G., Rutenko A. N., Ushchipovskii V. G. A Self-Contained Hydroacoustic Station with Radio Channel for Acoustic Measurements on the Shelf. *Instruments and Experimental Techniques*, 2008. V. 51. No. 5. P. 762–767.

Bowen S. L. Probable Extinction of the Korean Stock of the Gray Whale (*Eschrichtius robustus*). *Journal of Mammalogy*, 1974. V. 55. Iss. 1. P. 208–209.

Bradford A. L., Weller D. W., Wade P. R., Burdin A. M., Brownell R. L. Jr. Population abundance and growth rate of western gray whales *Eschrichtius robustus*. *Endangered Species Research*, 2008. V. 6. P. 1–14.

Budnikova L. L., Buzrukov R. G. Composition and distribution of amphipods (Amphipoda: Gammaridea, Caprellidea) on the shelf and upper part of the slope of eastern Sakhalin. *Izvestiya TINRO*, 2003. V. 135. P. 197–220 (in Russian).

Ilyashenko V. Yu. The gray whale (*Eschrichtius robustus*, Lillijeborg, 1861) restores its natural historical habitat. *Proceedings of the VII International Conference “Marine mammals of the Holarctic”*, 2012. P. 269–272 (in Russian).

Kriksunov Ye., Alyautdinov A., Bobyrev A., Chistov S. Study of associativity between the spatial distributions of gray whales and their prey species offshore north-east coast of Sakhalin Island. *Regional Studies in Marine Science*, 2016. V. 8. No. 3. P. 466–479.

Lang A. R., Weller D. W., Taylor B. L., LeDuc R. G., Calambokidis J., Burdin A. M., Pease V. L., Klimek A., Scordino J., Robertson K., Litovka D., Burkanov V., Gearin P., Jacobsen J., Craig G. J., Bruce M., Brownell R. L. Jr. Genetic analysis of gray whales in the eastern and western North Pacific. *Abstr. 19th Bien. Conf. on the Biol. of Marine Mammals*. Tampa, FL, 27 Nov – 02 Dec 2011. P. 170.

Rutenko A. N., Borovoi D. I., Gritsenko V. A., Petrov P. S., Ushchipovskii V. G., Boekholt M. Monitoring the Acoustic Field of Seismic Survey Pulses in the Near Coastal Zone. *Acoustical Physics*, 2012. V. 58. No. 3. P. 326–338.

Rutenko A. N., Gritsenko V. A. Monitoring of anthropogenic acoustic noise on the shelf of the island. *Sakhalin. Akusticheskij Zhurnal (Acoustic Journal)*, 2010. V. 56. No. 1. P. 77–81 (in Russian).

Rutenko A. N., Sosnin V. A. Hydrodynamic processes on the shelf of the island. Sakhalin in the coastal Piltun feeding area of gray whales and their relationship with atmospheric circulation. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2014. No. 5. P. 74–93 (in Russian).

Tyrneva O. Yu., Yakovlev Y. M., Vertyankin V. V., Van Der Wolf P., Scott M. J. Summary of the long-term photo-ID studies of Gray Whales (*Eschrichtius robustus*) off the northeast coast of Sakhalin Island. *Marine Mammals of The Holarctic. Collection of scientific papers based on the proceedings of the X International conference dedicated to the memory of A. V. Yablokov*, Arkhangelsk, October 29 – November 2, 2018. Moscow: RPO “Council on Marine Mammals”, 2019. V. 1. P. 332–343 (in Russian).

Yablokov A. V., Bogoslovskaya L. S. A review of Russian research on the biology and commercial whaling of the gray whale. *The Gray Whale, Eschrichtius Robustus*. Orlando, FL: Academic Press Inc., 1984. P. 465–485.

УДК: 528.94+911.5

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-80-93

В. В. Занозин¹, А. Н. Бармин², В. В. Занозин³

ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КАРКАСА ДЕЛЬТЫ ВОЛГИ

АННОТАЦИЯ

В условиях стремительного экономического прогресса регионов наблюдается увеличение воздействия человека на окружающую среду. В связи с этим возникает потребность в разработке научно обоснованной системы управления природными ресурсами и сохранения неповрежденных экосистем. В последнее время широко распространяется концепция развития ландшафтно-экологических каркасов территорий (ЛЭК). ЛЭК может рассматриваться как система участков природы, ранжированных по степени экологического значения. ЛЭК представляет собой непрерывную сеть взаимосвязанных участков, способных обеспечить естественное экологическое равновесие и сдерживать негативное воздействие человека на окружающую среду. В данной статье предлагается разработка географической основы для формирования ЛЭК в центральном подрайоне ландшафта дельты р. Волга. В основе предлагаемой картографической модели лежит стиль построения тематических карт — точки Вурмана, получивший название на основе картографических работ Ричарда Саула Вурмана. Предлагаемый стиль был модифицирован: была применена регулярная геометрическая сетка, состоящая из правильных геометрических фигур — гексагонов. ЛЭК в данном случае разрабатывается в форме пространственной ячеистой сетки, вмещающей весь исследуемый регион, в границах которой фиксируются геосистемы с тем или иным порядком использования и уровнем антропогенной преобразованности. Для выделенных в ходе ранее выполненных исследований естественных геосистем был установлен уровень их антропогенной трансформации с применением специально разработанной формулы ($L_{антропо}$). Дальнейший анализ ЛЭК базируется на толковании специфической легенды к картосхеме, где по осям ординат и абсцисс отображается пригодность геосистем для интеграции в структуру ландшафтно-экологического каркаса центрального подрайона ландшафта дельты Волги.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дельта Волги, ландшафтно-экологический каркас, картографирование, точки Вурмана, ГИС

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева», Факультет наук о Земле, химии и техносферной безопасности, пл. Шаумяна, д. 1, Астрахань, Россия, 414000, e-mail: victor_z94@mail.ru

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева», Факультет наук о Земле, химии и техносферной безопасности, пл. Шаумяна, д. 1, Астрахань, Россия, 414000, e-mail: abarmin60@mail.ru

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева», Факультет наук о Земле, химии и техносферной безопасности, пл. Шаумяна, д. 1, Астрахань, Россия, 414000, e-mail: vvzanozin-67@mail.ru

Victor V. Zanozin¹, Aleksandr N. Barmin², Valery V. Zanozin³

GEOSPATIAL MODELING OF THE ORGANIZATION OF THE LANDSCAPE-ECOLOGICAL FRAMEWORK OF THE VOLGA DELTA

ABSTRACT

With the rapid economic progress of the regions, there is an increase in the human impact on the environment. In this regard, there is a need to develop a scientifically based system of natural resource management and preservation of intact ecosystems. Recently, the concept of developing ecological frameworks of territories has been widely spread. An ecological framework as a system of nature areas ranked by the degree of ecological importance is a continuous network of interconnected areas capable of ensuring natural ecological balance and restraining the negative human impact on the environment. This paper proposes a geographical framework for the implementation of a landscape-ecological framework in the central part of the Volga River Delta. The proposed cartographic model is based on the style of thematic map construction — Wurman dots, named on the basis of cartographic works of Richard Saul Wurman. The proposed style was modified: a regular geometric grid consisting of regular geometric figures — hexagons was applied. Landscape-ecological framework in this case is designed in the form of a spatial cellular grid covering the entire territory under consideration, within which geosystems with different modes of use and degree of anthropogenic transformation are distinguished. For the natural geosystems identified in the course of previously performed studies, the level of their anthropogenic transformation was established using a specially developed formula ($L_{\text{антропо}}$). The analysis of the landscape-ecological framework is based on the interpretation of a special legend to the map scheme, where the ordinate and abscissa axes show the suitability of geosystems for integration into the structure of the ecological framework of the central sub-area of the Volga Delta.

KEYWORDS: Volga delta, landscape-ecological framework, mapping, Wurman dots, GIS

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач в современной географии является исследование изменений в природных системах различного ранга. Природные территориальные комплексы (ПТК) быстро эволюционируют в современном обществе, изменяя как внешний облик, так и внутреннюю структуру. Не последнюю роль в этом играет постоянно растущее антропогенное воздействие. Это актуализирует разработку новых подходов современного природопользования и механизмов сохранения природной среды. Решение данной проблемы возможно путем научной организации экологического (или ландшафтно-экологического) каркаса того или иного региона, который будет являться основой устойчивого развития [Стаценко и др., 2011].

Термин «ландшафтно-экологический каркас» (ЛЭК) может интерпретироваться по-разному и часто ассоциируется с понятием «экологического каркаса». По одному из определений, ЛЭК представляет собой систему взаимосвязанных базовых природных и хозяй-

¹ Astrakhan Tatishchev State University, Faculty of Earth Sciences, Chemistry and Technosphere Safety, 1, Shaumyana sq., Astrakhan, 414000, Russia, *e-mail*: victor_z94@mail.ru

² Astrakhan Tatishchev State University, Faculty of Earth Sciences, Chemistry and Technosphere Safety, 1, Shaumyana sq., Astrakhan, 414000, Russia, *e-mail*: abarmin60@mail.ru

³ Astrakhan Tatishchev State University, Faculty of Earth Sciences, Chemistry and Technosphere Safety, 1, Shaumyana sq., Astrakhan, 414000, Russia, *e-mail*: vvzanozin-67@mail.ru

ственных элементов территории, которая определяет устойчивость, экологическое состояние и эстетику природно-хозяйственного ландшафта [Казаков, 2004].

Согласно другому определению, ландшафтно-экологический каркас — это природно-антропогенная система, включающая малоизмененные участки, окруженные буферными зонами и коридорами, объединенными в единый «скелет» территории. Он частично соответствует границам геосистем и их морфологическим элементам [Белов, 2015].

Согласно Н. Ф. Реймерсу, экологический каркас как система участков природы, ранжированных по степени экологического значения, представляет собой непрерывную сеть взаимосвязанных участков, которые могут сохранить экологический баланс и нейтрализовать отрицательное воздействие человека на природу. При этом экологический каркас представляет собой особую ячеистую структуру, внутри которой выделяются разнообразные геосистемы, отличающиеся режимами использования и уровнями воздействия человека на природу [Реймерс, 1990; Понамарев и др., 2012].

В течение многих лет влияние человеческой деятельности оказывало сильное воздействие на уникальный ландшафт дельты р. Волги, что привело к глубоким изменениям в ее первозданной природной среде. Центральный подрайон этого ландшафта пострадал от таких изменений наиболее сильно, что требует поиска способов достижения экологического баланса между хозяйственной деятельностью и естественной основой региона. Одним из способов решения данной проблемы является создание сети ландшафтно-экологического каркаса. Под *ландшафтно-экологическим каркасом* в данном случае будем понимать комплекс взаимосвязанных природно-территориальных комплексов, обеспечивающих экологическую стабильность в хозяйственно освоенной территории.

В связи с тем, что карта исторически сложилась как самая распространенная модель в географических исследованиях, а картографический метод всегда имел первостепенное значение, то результатом формализации элементов экологического каркаса должна стать специально разработанная карта (или картосхема). Таким образом, задачами выполненного исследования является поиск, разработка и представление оригинального способа отображения пространственной организации ландшафтно-экологического каркаса исследуемого региона.

На основе анализа литературных источников и комплексных маршрутных исследований, совершавшихся с 2018 г., были представлены точные границы центрального подрайона ландшафта дельты р. Волги (рис. 1) [Занозин, Бармин, 2018]. Согласно полученным результатам, площадь исследуемой территории составляет 3 899,44 км².

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сегодня в методах и критериях определения экологических каркасов для территорий нет единых алгоритмов и правил. Это вызвано отсутствием общепринятых принципов выделения экологического каркаса и недостатком рекомендаций по его созданию. Различные методы могут лечь в основу формирования элементов экологического каркаса, что подчеркивает важность исследований в этой области [Батуев, Лопаткин, 2008]. В данном исследовании при разработке ЛЭК дельты р. Волги применены системный, ландшафтный и картографический подходы.

Применение системного метода дает возможность рассматривать ландшафтно-экологический каркас как систему, где все элементы взаимосвязаны между собой и взаимобусловлены. Такой подход позволяет более эффективно как управлять природными комплексами, так и охранять их.

Ландшафтный метод — это мощный инструмент, который позволяет глубже понять природные условия региона и их изменения под воздействием человеческой деятельности. Важной частью ландшафтного метода является анализ природных геосистем и их

изменений, вызванными человеческой деятельностью. Эта комплексность позволяет выделить ключевые малонарушенные геосистемы, которые могут войти в состав ЛЭК. Ландшафтный метод позволяет не только лучше понять уникальность и взаимосвязь различных геосистем, но и выработать более эффективные стратегии управления природными ресурсами с учетом человеческого вмешательства в окружающую среду.

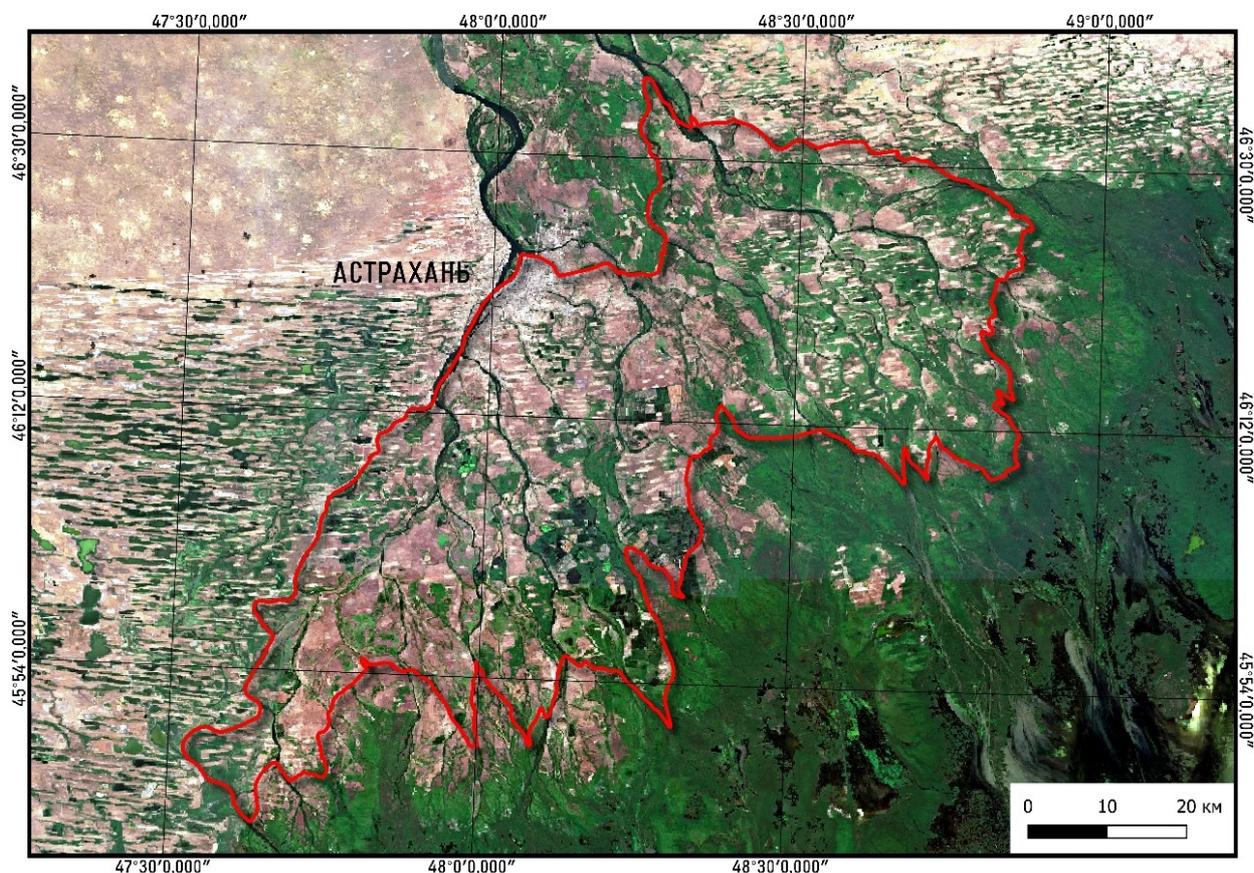


Рис. 1. Границы центрального подрайона ландшафта дельты р. Волги (границы по [Занозин, Бармин, 2018])

Fig. 1. General scheme outline of the border of the central part of the Volga River delta (borders by [Zanozin, Barmin, 2018])

Картографический метод совместно с применением данных дистанционного зондирования Земли дает возможность раскрыть пространственную структуру природных систем различного ранга и их антропогенные преобразования и обосновать пространственную организацию геосистем. В работе использовались космические снимки аппаратов Sentinel-2A и 2B, которые были получены в весенний, летний и осенний периоды 2018–2023 гг. Полный цикл исследования выполнялся в программном комплексе геоинформационной системы QGIS (v. 3.10–3.22.4), а также программном комплексе SNAP (Sentinel Application Platform).

Идентификация опорных геосистем как ключевых структурных элементов ландшафтно-экологического каркаса была реализована в несколько этапов. Первый заключался в комплексном физико-географическом исследовании центрального подрайона ландшафта дельты р. Волга. В ходе таких работ в исследуемом регионе было выделено пять групп локальных геосистем ранга «урочище», исходя из их происхождения и морфологии:

- русловые;
- култучные;
- бугровые;
- сформировавшиеся на основе морских островов;
- гидрологические (ильмени).

В группе култучных урочищ было выделено семь видов ПТК. Три вида ПТК отнесены в группу урочищ, сформированных на основе морских островов. Пять видов ПТК были включены в группу гидрологических урочищ (без учета рек и водотоков). Пять видов ПТК были отнесены в группу бугровых урочищ:

- сами бугры Бэра;
- бугровые шлейфы;
- межбугровые урочища, пологонаклонные равнинные, высокого уровня;
- межбугровые урочища, пологонаклонные равнинные, среднего уровня;
- межбугровые урочища, пологовогнутые равнинные, низкого уровня.

В рамках исследования центрального подрайона ландшафта дельты р. Волги в ГИС-среде был проведен анализ взаимосвязей и пространственной структуры локальных геосистем региона. В результате была создана векторная карта, которая демонстрирует распределение основных природных территориальных комплексов в исследуемой местности. В ходе исследования было выявлено 2 712 уникальных ландшафтных выделов (контурных единиц), что подчеркивает разнообразие и сложность ландшафтного устройства данного региона.

Следующий этап заключался в установлении степени антропогенной преобразованности выявленных естественных природно-территориальных комплексов. Используя как отечественные, так и зарубежные исследования по данной теме, было отобрано несколько факторов преобразованности, например, застройка городская и сельская, залежные земли и земли, используемые под пашни; карьеры, дороги, кладбища; сенокосы и пастбища. На основе интеграции математического аппарата был рассчитан коэффициент антропогенной преобразованности ($L_{antropo}$) естественных урочищ (рис. 2) по разработанной формуле (1) [Занозин и др., 2019; Занозин, 2021]:

$$L_{antropo} = \frac{SA_1 * k_1 + SA_2 * k_2 + \dots + SA_n * k_n}{S_{NTC}} \quad (1),$$

где SA — площадь модифицированного участка природного территориального комплекса;
 k — числовой коэффициент степени антропогенной преобразованности ПТК;
 S_{NTC} — площадь естественного природного территориального комплекса.

Принимая во внимание концепцию Н. Ф. Реймерса, где естественная структура представлена в виде пространственной сетки, охватывающей всю территорию, а также используя особый метод построения карт, известный как «точки Вурмана» (созданный Ричардом Саулом Вурманом в ходе работы над «Атласом городов» [Passonneau, Wurman, 1966]), и полученные данные, была создана картографическая модель, которая отображает статистическое положение урочищ в центральном подрайоне ландшафта дельты р. Волги, рекомендованных для включения в ландшафтно-экологический каркас. «Точки Вурмана» в «Атласе городов» отображают статистическую информацию на значительную площадь и представляют собой сетку из окружностей фиксированной ширины, внутри которых

расположены окружности, несущие основную смысловую нагрузку карты. Например, карты в книге выражают плотность с помощью символа, внутренняя заливка которого основана на значении плотности населения для этой ячейки (рис. 3а). Более заполненные символы представляют более высокие значения, а менее заполненные окружности отображают наименьшую плотность населения [Amoroso, 2010; Katz, 2012]. Использование такого стиля отображения пространственной информации хорошо работает, когда необходимо показать, где сосредоточены основные статистические показатели, в каком месте расположены проблемные части.

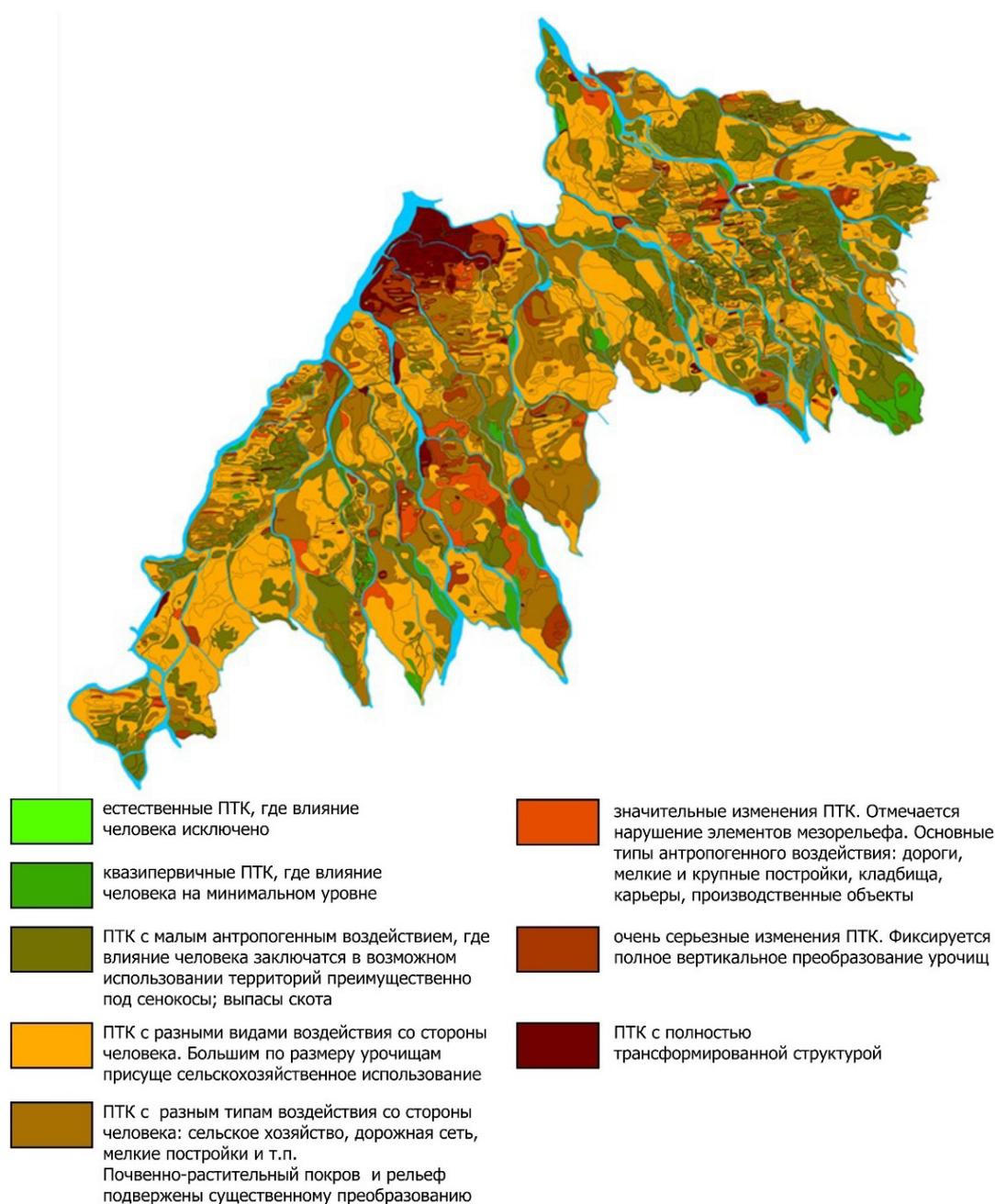
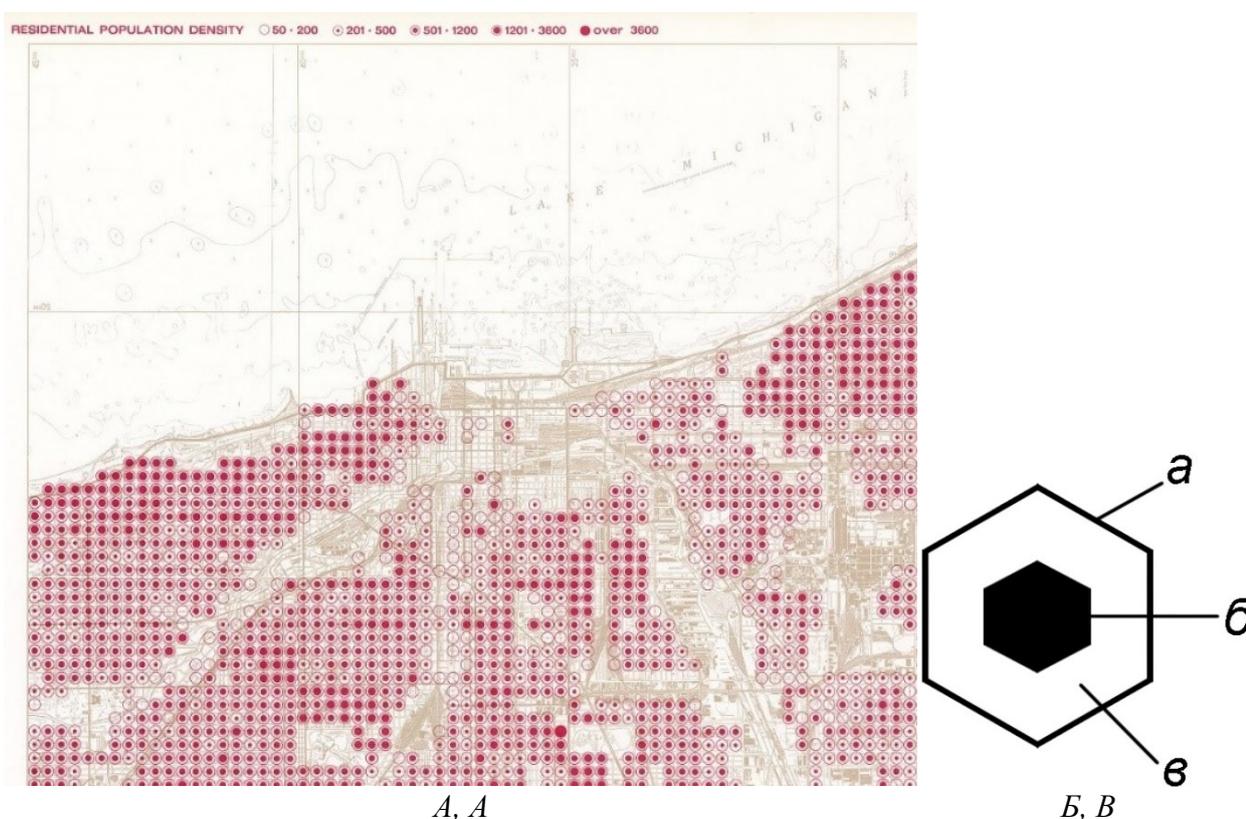


Рис. 2. Схема антропогенного преобразования ПТК центрального подрайона ландшафта дельты реки Волга (согласно формуле $L_{antropo}$)

Fig. 2. Scheme of anthropogenic transformation of natural territorial complexes of the central sub-area of the Volga River delta landscape (according to the $L_{antropo}$ formula)

В географических исследованиях применение регулярных геометрических сеток является избранной методологией, что обусловлено стремлением минимизировать гетерогенность, которая характерна для фигур со свободными очертаниями (которыми, собственно, и являются естественные ПТК того или иного ранга). В настоящее время исследователи применяют сетки, состоящие из равносторонних многоугольников. Внешний облик таких полигонов способствует формированию целостной мозаики исследуемой территории, которая исключает формирование наложений и пробелов. Это дает возможность продуцировать однородные сети, охватывающие всю исследуемую площадь. Однако, как было описано выше, в оригинальных работах «точками Вурмана» были представлены окружности фиксированного диаметра.

Для настоящего исследования было принято решение использовать данный стиль оформления проектируемой карты для отображения пространственной организации ландшафтно-экологического каркаса, но с его некоторой модификацией.



*Рис. 3. А — Фрагмент карты плотности населения Чикаго;
Б — ячейка-гексагон, где а — внешняя фиксированная ячейка площадью 21,65 км²,
б — внутренняя ячейка фиксированного размера, в — буферная зона между двумя
фиксированными ячейками, отражающая смысловую нагрузку тематической карты*
*Fig. 3. А — fragment of Chicago North, Chicago South Residential Population Density Map;
Б — a hexagon cell, where а is an external fixed cell with an area of 21.65 км²,
б is an internal fixed hexagon, в is a buffer zone between two fixed cells
reflecting the semantic information of the thematic map*

Во-первых, в данном исследовании вместо окружностей была апробирована сетка шестиугольников-гексагонов, успешно примененная при географических исследованиях на других территориях [Griffith et al., 2000; Schindler et al., 2008; Braun, Hochschild, 2017].

Построение гексагональной сети зависело от нескольких факторов. Размер анализируемой пространственной ячейки гексагональной сети подбирался с условием исключения вероятности соответствия ее размеров с минимальным размером типов территориальных комплексов (ПТК). Также было предотвращено включение только одного ПТК в границы одной гексагональной ячейки. Использование чрезмерно больших размеров ячеек также было исключено, т. к. это могло привести к включению в ячейку сети значительного количества ландшафтных единиц. В итоге площадь целой внешней фиксированной ячейки составила 21,65 км² (рис. 3б). Этот подход позволил минимизировать вероятность статистического искажения данных при проведении ландшафтно-структурных измерений. Регулярная сеть ячеек-гексагонов полностью покрывала регион исследования, осколочных ячеек не создавалось.

Размер внутренней фиксированной ячейки оставался неизменным. Оставшееся пространство между двумя гексагонами составляет смысловую нагрузку картографической модели: малый гексагон является «отправным» значением для будущего буфера, который зависит от выборки информации в каждом внешнем гексагоне.

Процесс заполнения промежутка между двумя фиксированными гексагонами заключался в поиске того, какой должна стать буферная зона от малого фиксированного гексагона относительно внешнего в зависимости от содержащегося в нем числа естественных ПТК (полигонов). Для этого сначала был рассчитан процент содержания ПТК во внешнем гексагоне: количество ПТК в выбранном гексагоне было поделено на максимальное значение ПТК, зафиксированное в одном из гексагонов, а затем полученное число было умножено на значение буферной зоны между фиксированными ячейками-гексагонами. Тем самым была получена «плавающая» ячейка, содержащая в себе статистическую информацию о количестве ПТК в одной из внешних фиксированных ячеек.

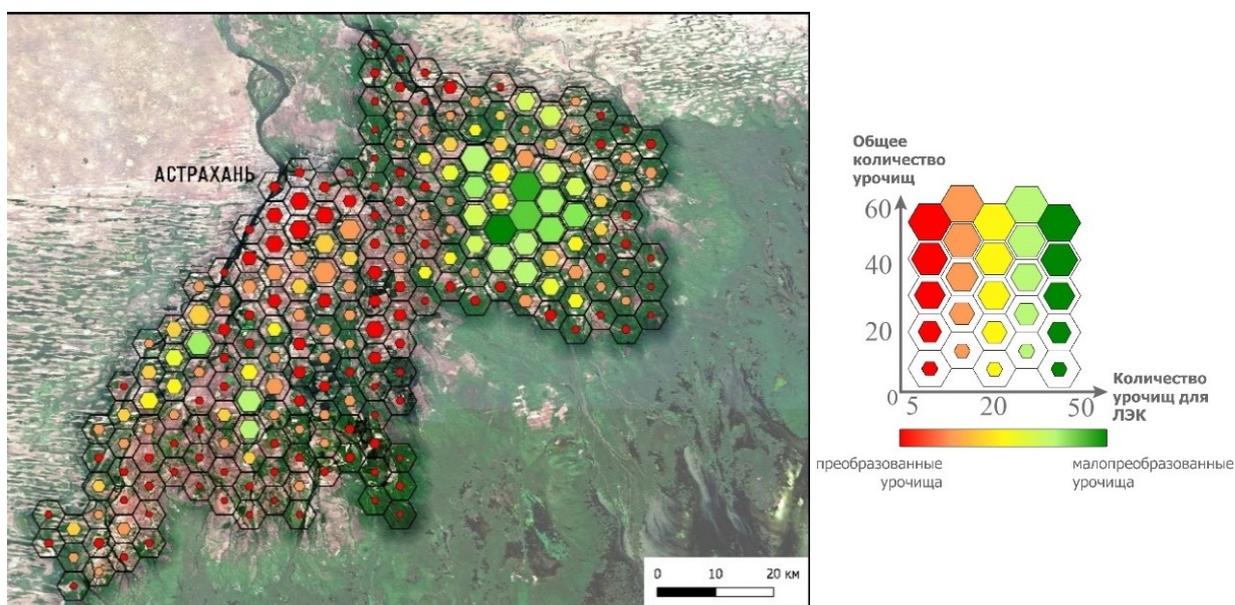


Рис. 4. Картограмма пространственно-статистического положения урочищ, рекомендованных для включения в ЛЭЖ центрального подрайона ландшафта дельты реки Волги
Fig. 4. Scheme of the spatial and statistical position of the natural territorial complexes, recommended for inclusion in the ecological framework of the central part of the Volga Delta landscape

Второй модификацией стиля стало добавление цвета «плавающей» ячейке для отображения дополнительной переменной, выраженной в количестве ПТК, которые можно рекомендовать для включения в ландшафтно-экологический каркас центрального подрайона ландшафта дельты реки Волги. Итоговый результат картографической модели пространственной организации ландшафтно-экологического каркаса представлен на рис. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Интерпретация смысловой нагрузки полученной картографической модели также представлена на рис. 4. Размер «плавающих» гексагонов зависит от общего количества ландшафтных выделов (полигонов), находящихся в рассматриваемых внешних гексагонах с фиксированной площадью. Количество полигонов отображается по оси ординат. Цвет внутренних гексагонов зависит от количества ландшафтных полигонов, находящихся в рассматриваемых гексагонах с фиксированной площадью и рекомендованных к включению в ЛЭК центрального подрайона ландшафта дельты р. Волга.

Количество таких выделов (полигонов) отображается по оси абсцисс. Анализ распределения урочищ на заданном участке возможен при рассмотрении размера полигонов внутри стандартизированных гексагональных секций фиксированной площади. Обнаружение малых полигонов красного цвета означает, что количество урочищ, а также их пригодность для интеграции в структуру экологического каркаса на данной местности низка. В контрасте, наличие в таком же гексагоне крупных зеленых полигонов указывает на обратную ситуацию: присутствие значительного количества урочищ, которые представляют интерес для включения в экологический каркас.

Картографическая модель пространственной организации ландшафтно-экологического каркаса была сопоставлена с результатами расчета индексов ландшафтного разнообразия, в ходе которых также была построена регулярная сетка ячеек гексагонов, и построена корреляционная матрица (рис. 5) [Занозин и др., 2020].

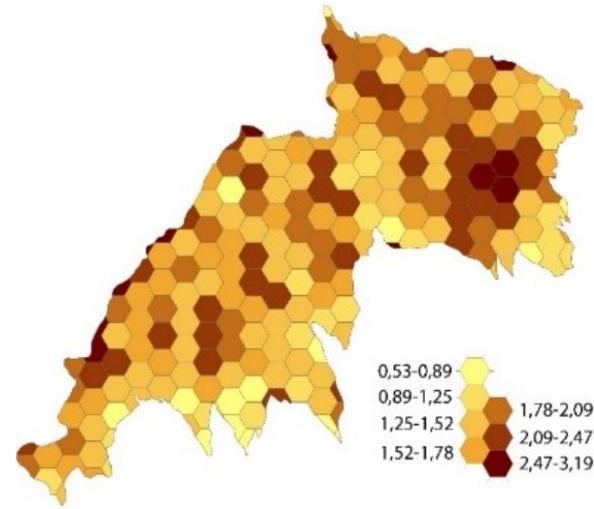
В ходе пространственно-аналитического анализа организации ЛЭК было установлено несколько зон, где зафиксированные геосистемы могут служить основой формируемого ландшафтно-экологического каркаса.

Высокий уровень корреляции данных был установлен между такими метриками, как коэффициенты ландшафтной дробности и сложности. Эти коэффициенты отображают среднее число дифференцированных ландшафтных единиц и соотношение их количества к занимаемой средней площади, что, в свою очередь, обеспечивает научно-обоснованную основу проектирования ландшафтно-экологического каркаса.

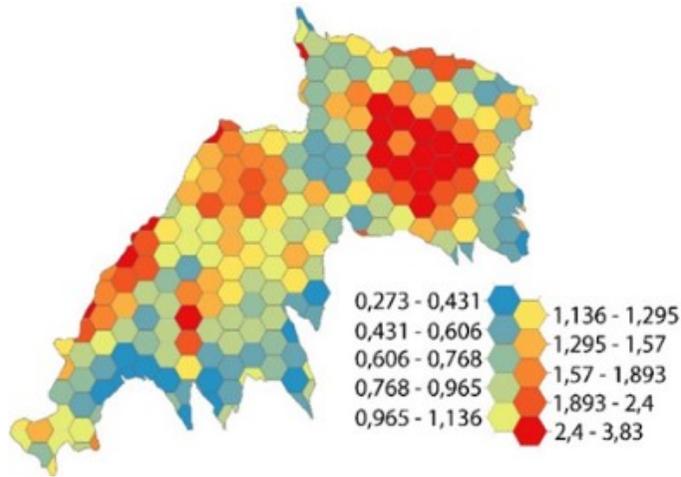
Гексагоны с большим количеством ландшафтных выделов и минимальным уровнем антропогенного влияния на их территории рекомендуются для включения в экологический каркас исследуемого района. Именно эти обстоятельства и служат еще одним доказательством правомочности использования рассмотренных методических приемов.

	POINTofECO	Ldr	Lsl	Lmh	Lm	Lb
POINTofECO	1.00	0.77	0.87	0.40	0.56	0.48
Ldr	0.77	1.00	0.90	0.72	0.77	0.71
Lsl	0.87	0.90	1.00	0.47	0.61	0.54
Lmh	0.40	0.72	0.47	1.00	0.61	0.94
Lm	0.56	0.77	0.61	0.61	1.00	0.70
Lb	0.48	0.71	0.54	0.94	0.70	1.00

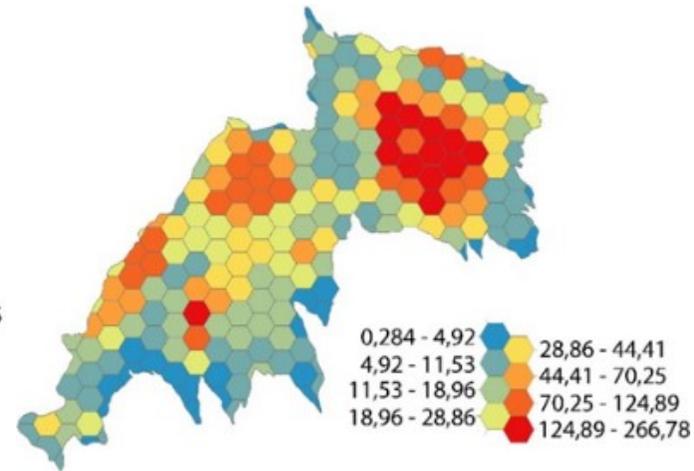
a, a



b, b



c, c



d, d

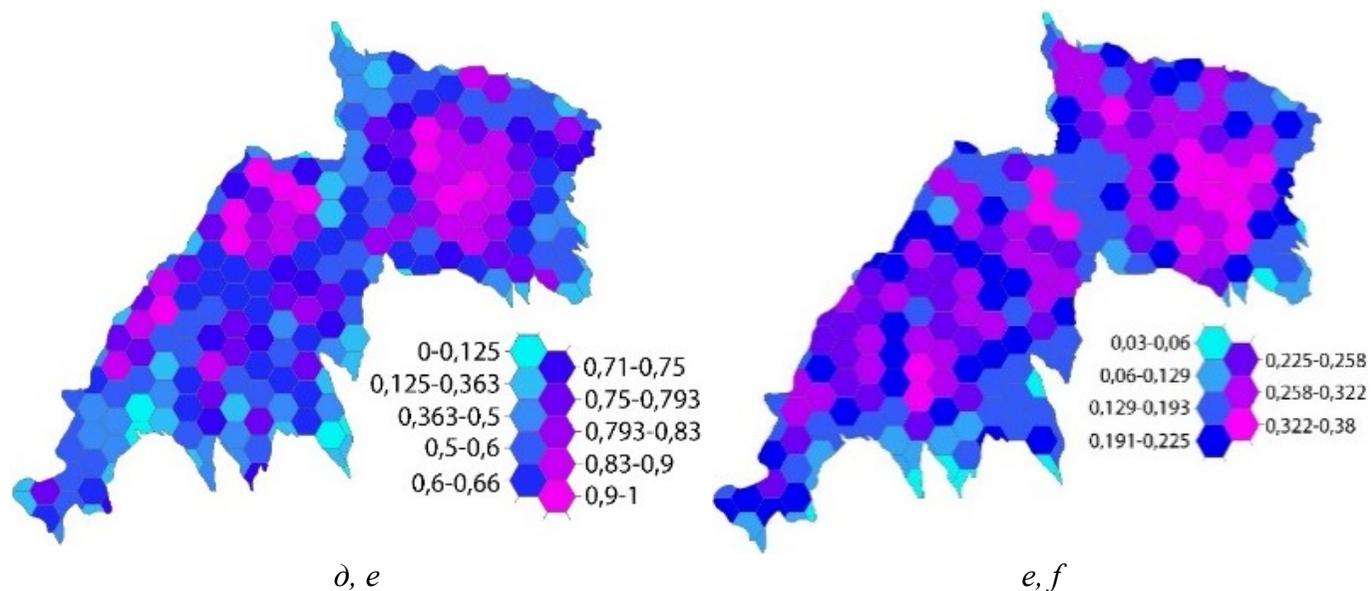


Рис. 5. а — корреляционная матрица пространственно-статистического анализа урочищ, рекомендованных для включения в ЛЭК и результатов анализа ландшафтного разнообразия, где POINTofECO — количество урочищ, рекомендованных во включение в ЛЭК, Ldr — индекс ландшафтной дробности, Lsl — индекс ландшафтной сложности, Lm — индекс ландшафтной мозаичности, Lb — индекс относительного богатства, Lmh — индекс Менхиника.

Схемы ландшафтного разнообразия центрального подрайона ландшафта дельты реки Волга, где: б — ландшафтное разнообразие по индексу Менхиника, в — ландшафтная дробность, г — ландшафтная сложность, д — ландшафтная мозаичность, е — относительное ландшафтное богатство

Fig. 5. a — correlation matrix of spatial and statistical analysis of natural territorial complexes recommended for inclusion in the landscape ecological framework and the results of landscape diversity analysis, where POINTofECO — number of natural territorial complexes recommended for inclusion in ecological framework, Ldr — landscape fragmentation index, Lsl — landscape complexity index, Lm — landscape mosaic index, Lb — relative richness index, Lmh — Menchinik index.

Schemes of landscape diversity of the central sub-area of the Volga River delta landscape, where: b — landscape diversity according to Menchinik index, c — landscape fractionality, d — landscape complexity, e — landscape mosaicity, f — landscape relative richness

ВЫВОДЫ

Примененный в проведенном исследовании модифицированный стиль точек Вурмана отличается рядом особенностей. Во-первых, для анализа была использована сетка гексагонов. В отличие от исследований, где используются окружности, шестиугольники позволили уменьшить смещение выборки из-за краевых эффектов, вызванных геометрией сетки, что связано с низким значением соотношения периметра к площади шестиугольника. Наименьшее соотношение имеет окружность, но окружности не могут создать замощение в виде непрерывной сетки. Шестиугольники обладают наиболее близкой к окружности геометрией и могут складываться в мозаику, формируя равномерную сетку.

Во-вторых, использование модифицированного стиля точек Вурмана в виде гексагональной сетки позволяет одновременно показать несколько явлений и отношения между явлениями (проценты, медианы, средние значения и т. п.). Однако важно помнить, что только определенное количество переменных может быть разумно отображено в одной ячейке гексагональной сети.

Помимо этого, результаты выполненного пространственно-статистического анализа коррелируют как с анализом ландшафтного разнообразия центрального подрайона дельты р. Волги, так и с результатами анализа антропогенного преобразования урочищ рассматриваемого региона.

В рамках создания ландшафтно-экологического каркаса исследуемого региона примерами рекомендуемых во включение в ландшафтно-экологический каркас могут быть такие ПТК, как незначительно трансформированные антропогенным воздействием боровские бугры и прилегающие к ним култучно-равнинные урочища восточной периферии с. Бекетовки, слабоизмененные человеком култучные и русловые урочища, сосредоточенные к западу от с. Образцово-Травино. По результатам выполненных исследований наибольшее их количество соответствует участкам с высокой степенью ландшафтного разнообразия, что часто коррелирует с пространственным совпадением или близостью к особо охраняемым природным территориям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Батуев А. Р., Лопаткин Д. А. Обоснование и картографирование территориальной структуры экологического каркаса региона. Известия Иркутского Государственного Университета. Серия: Науки о Земле, 2008. № 1. С. 61–82.

Белов С. А. Перспективы развития ландшафтно-экологического каркаса в городе Челябинске и его окрестности. Наука ЮУрГУ. Секции технических наук: Материалы 67-й научной конференции Южно-Уральского государственного университета. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. С. 137–143.

Занозин В. В. Структура и современное антропогенное преобразование центрального района ландшафта дельты реки Волга. Диссертация кандидата географических наук: 25.00.23. Астрахань, 2021. 203 с.

Занозин В. В., Бармин А. Н. Особенности районирования дельтовых ландшафтов. Геология, география и глобальная энергия, 2018. № 3(70). С. 134–142.

Занозин В. В., Бармин А. Н., Валов М. В. Исследования степени антропогенной преобразованности природных территориальных комплексов. Геология, география и глобальная энергия, 2019. № 4(75). С. 168–183.

Занозин В. В., Бармин А. Н., Ямашкин С. А., Ямашкин А. А. Методы и алгоритмы оценки ландшафтного разнообразия в морфологическом аспекте на примере центральной части дельты реки Волги. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции. М.: Издательство

Московского университета, 2020. Т. 26. Ч. 4. С. 114–130. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-4-26-114-130.

Казаков Л. А. Ландшафтоведение: природные и природно-антропогенные ландшафты. М.: МНЭПУ, 2004. 264 с.

Пономарев А. А., Байбаков Э. И., Рубцов В. А. Экологический каркас: анализ понятий. Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные Науки, 2012. Т. 154. № 3. С. 228–238.

Реймерс Н. Ф. Природопользование: словарь-справочник. М.: Мысль, 1990. 637 с.

Стаценко Е. А., Корнилов А. Г., Жеребненко Ю. С. Экологический каркас Белгородской области как основа устойчивого развития региона. Географические основы формирования экологических сетей в России и Восточной Европе. Ч. 1. Материалы электронной конференции. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2011. С. 264–267.

Amoroso N. The Exposed City: Mapping the Urban Invisibles. 1st ed. New York: Routledge, 2010. 192 p.

Braun A., Hochschild V. A. SAR-Based Index for Landscape Changes in African Savannas. Remote Sensing, 2017. V. 9. 359 p. DOI: 10.3390/rs9040359.

Griffith J., Martinko E., Price K. Landscape Structure Analysis of Kansas at Three Scales. Landscape and Urban Planning, 2000. V. 52. P. 45–61. DOI: 10.1016/S0169-2046(00)00112-2.

Katz J. Designing Information: Human Factors and Common Sense in Information Design. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012. 224 p.

Passonneau J., Wurman R. S. Urban Atlas: 20 American Cities, a Communication Study Notating Selected Urban Data. MIT Press, 1966. 160 p.

Schindler S., Poirazidis K., Wrbka T. Towards a core set of landscape metrics for biodiversity assessments: A case study from Dadia National Park, Greece. Ecological Indicators, 2008. No. 8. P. 502–514. DOI: 10.1016/j.ecolind.2007.06.001.

REFERENCES

Amoroso N. The Exposed City: Mapping the Urban Invisibles. 1st ed. New York: Routledge, 2010. 192 p.

Batuev A. R., Lopatkin D. A. Substantiating and mapping of territorial structure of the ecological network of the region. Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: “Nauki o Zemle” (The Bulletin of Irkutsk State University. Series: “Earth Sciences”), 2008. No. 1. P. 61–82 (in Russian).

Belov S. A. Accounting of the Territorial Structure of the Environmental Framework when Planning and Building the City of Chelyabinsk. Section of Technical Sciences: Proceedings of 67 Scientific Conference of SUSU. Chelyabinsk: SUSU Publishing Centre, 2013. P. 137–143 (in Russian).

Braun A., Hochschild V. A. SAR-Based Index for Landscape Changes in African Savannas. Remote Sensing, 2017. V. 9. 359 p. DOI: 10.3390/rs9040359.

Griffith J., Martinko E., Price K. Landscape Structure Analysis of Kansas at Three Scales. Landscape and Urban Planning, 2000. V. 52. P. 45–61. DOI: 10.1016/S0169-2046(00)00112-2.

Katz J. Designing Information: Human Factors and Common Sense in Information Design. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012. 224 p.

Kazakov L. A. Landscape science (natural and anthropogenic landscapes). Moscow: MNEPU, 2004. 264 p. (in Russian).

Passonneau J., Wurman R. S. Urban Atlas: 20 American Cities, a Communication Study Notating Selected Urban Data. MIT Press, 1966. 160 p.

Ponomarev A. A., Baibakov E. I., Rubtsov V. A. Ecological framework: analysis of concepts. Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki (Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series), 2012. No. 3. V. 154. P. 228–238 (in Russian).

Reimers N. F. Nature Management: Dictionary-Reference Book. Moscow: Mysl', 1990. 637 p. (in Russian).

Schindler S., Poirazidis K., Wrbka T. Towards a core set of landscape metrics for biodiversity assessments: A case study from Dadia National Park, Greece. Ecological Indicators, 2008. No. 8. P. 502–514. DOI: 10.1016/j.ecolind.2007.06.001.

Statsenko E. A., Kornilov A. G., Zhrebneenko Y. S. Ecological framework of Belgorod region as a basis for sustainable development of the region. Geographical bases of formation of ecological networks in Russia and Eastern Europe. Part 1. Proceedings of the Electronic Conference. Moscow: KMK Scientific Press Ltd., 2011. P. 264–267 (in Russian).

Zanozin V. V. Structure and modern anthropogenic transformation of the central area of the landscape of the Volga River delta. Dissertation of PhD of Geographical Sciences: 25.00.23, V. V. Zanozin. Astrakhan, 2021. 203 p. (in Russian).

Zanozin V. V., Barmin A. N. Features of division into districts of deltoid landscapes. Geology, Geography and Global Energy, 2018. No. 3(70). P. 134–142 (in Russian).

Zanozin V. V., Barmin A. N., Valov M. V. Studies of the degree of anthropogenic transformation of natural territorial complexes. Geology, Geography and Global Energy, 2019. No. 4(75). P. 168–183 (in Russian).

Zanozin V. V., Barmin A. N., Yamashkin S. A., Yamashkin A. A. Methods and algorithms for assessing landscape diversity in morphological terms on the example of the central part of the Volga River Delta. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International Conference. Moscow: Moscow University Press, 2020. V. 26. Part 4. P. 114–130 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2020-4-26-114-130.

УДК: 91:656.022.836:004.9(470.345)

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-94-111

А. Н. Минеев¹, И. А. Семина², Л. Н. Фоломейкина³

АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНОЙ ДОСТУПНОСТИ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

АННОТАЦИЯ

Исследование посвящено анализу транспортной доступности населенных пунктов Республики Мордовия, которая предлагается авторами в качестве одного из показателей оценки уровня развития транспортной системы. Для создания модели транспортной сети используются методы пространственного анализа и теории графов. Выборка элементов графа включает в себя населенные пункты Мордовии с численностью населения 2 000 чел. и более, а также все участки автодорог, обеспечивающие кратчайшие маршруты между ними. В качестве импеданса используется мера расстояния. В статье рассматриваются возможности применения показателей географической и потенциальной доступности, а также индекса объезда для обнаружения проблемных элементов транспортной сети, проводится сравнение показателей методами ранжирования и классификации. С использованием веб-картографических сервисов и инструментов сетевого анализа в ГИС произведены расчеты выбранных показателей. Создана серия отображающих их карт с применением классификации методом естественных границ и градуированных символов в качестве способа картографического изображения. В ходе исследования было установлено, что некоторые кратчайшие маршруты между рассматриваемыми населенными пунктами Республики Мордовия проходят через Нижегородскую область, что говорит о выходе региональной транспортной сети за границы субъекта. Выявлена проблема искусственных барьеров внутри одной страны на уровне муниципальных районов и субъектов федерации. Рассматривается возможность создания проекта улучшения транспортной доступности региона, приводятся доводы в пользу строительства отсутствующих прямых сообщений между населенными пунктами Республики Мордовия. Обозначены целевые показатели и ограничивающие факторы для улучшения транспортной доступности населенных пунктов региона. Рассматриваются возможности дальнейших исследований с применением полученных результатов для комплексного анализа региональной транспортной системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: транспортная доступность, сетевой анализ, транспортная сеть, региональные транспортные системы, теория графов, ГИС

¹ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, географический факультет, ул. Большевистская, д. 68, Саранск, Россия, 430005,
e-mail: mineev.arseniy99@mail.ru

² Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, географический факультет, ул. Большевистская, д. 68, Саранск, Россия, 430005,
e-mail: isemina@mail.ru

³ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, географический факультет, ул. Большевистская, д. 68, Саранск, Россия, 430005,
e-mail: folomejkina@mail.ru

Arseniy N. Mineev¹, Irina A. Semina², Larisa N. Folomeikina³

ANALYSIS OF THE REPUBLIC OF MORDOVIA SETTLEMENTS TRANSPORT ACCESSIBILITY VIA GEOINFORMATION TECHNOLOGIES

ABSTRACT

The study is devoted to the analysis of transport accessibility of the settlements in the Republic of Mordovia, which is proposed by the authors as one of the indicators for assessing the level of the transport system development. Methods of spatial analysis and graph theory are used to create a transport network model. The selection of graph elements includes settlements in Mordovia with a population of 2 000 people or more, as well as all sections of highways that provide the shortest paths between them. The measure of distance is used as impedance. The article discusses the usability of geographic and potential accessibility, as well as the detour index to detect problematic elements of the transport network, and compares the indicators using the ranking and classification methods. Using web mapping services and network analysis tools in GIS, the selected indicators were calculated and a series of maps were created to display them, using natural breaks classification method and graduated symbols as a method of cartographic representation. During the study, it was found that some of the shortest paths between the considered settlements of the Republic of Mordovia pass through the Nizhny Novgorod Oblast, which indicates that the regional transport network goes beyond the borders of the federal subject. The problem of artificial barriers within one country at the level of municipal districts and federal subjects has been identified. The possibility of creating a project to improve transport accessibility of the region is being considered, and arguments in favor of the construction of missing direct connections between settlements of the Republic of Mordovia are given. The target indicators and limiting factors for improving the transport accessibility of settlements in the region are identified. The possibilities of further research using the obtained results for a comprehensive analysis of the regional transport system are considered.

KEYWORDS: transport accessibility, network analysis, transport network, regional transport systems, graph theory, GIS

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день развитие национальной транспортной инфраструктуры является основополагающим фактором экономического развития государства. Несмотря на это, вопросам транспорта зачастую уделяется недостаточно внимания. Темпы развития транспортной инфраструктуры в Российской Федерации отстают от развитых и некоторых развивающихся стран. Отдельные показатели, такие как среднегодовые инвестиции в транспорт, ниже даже среднемировых (по данным за 2014–2019 гг. — 2,3 % от ВВП, что в 1,4 раз меньше, чем в среднем по миру)⁴. В то же время транспортная инфраструктура является капиталоемкой отраслью, наиболее уязвимой к нерациональному использованию средств. Именно поэтому важны исследования в сфере развития научно и экономически

¹ Mordovian State University, Faculty of Geography, 68, Bolshevistskaya str., Saransk, Republic of Mordovia, 430005, Russia, *e-mail*: mineev.arseniy99@mail.ru

² Mordovian State University, Faculty of Geography, 68, Bolshevistskaya str., Saransk, Republic of Mordovia, 430005, Russia, *e-mail*: isemina@mail.ru

³ Mordovian State University, Faculty of Geography, 68, Bolshevistskaya str., Saransk, Republic of Mordovia, 430005, Russia, *e-mail*: folomejkina@mail.ru

⁴ Транспортная стратегия РФ на период до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г. Электронный ресурс: <https://rosavtdor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozom-na-period-do-2035-goda> (дата обращения 12.04.2024)

обоснованного транспортного планирования и моделирования на всех уровнях: муниципальном, региональном, национальном. В Стратегии научно-технологического развития страны приоритетом выступает связанность территории Российской Федерации за счет создания интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем, а также занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем. Это ответ на вызов, заключающийся в необходимости эффективного освоения и использования пространства.

Одним из индикаторов развития транспортной инфраструктуры является транспортная доступность. *Транспортной доступностью* называют характер удаленности (близости) какого-либо экономико-географического объекта (населенного пункта, экономического центра, промышленного предприятия, места, любой точки территории) по отношению к транспортной магистрали и/или транспортному узлу. Иными словами, транспортная доступность — это потенциальная и реальная возможность достижения какой-либо точки территории с помощью транспортных средств по существующей транспортной сети¹.

Доступность является одним из показателей пространственного неравенства, что, в свою очередь, положительно или отрицательно сказывается на транспортно-географическом положении территории.

Среди всех видов транспорта Российской Федерации автомобильный, пожалуй, играет самую значительную роль. По данным на 2023 г., автомобильный транспорт преобладает в структуре грузоперевозок Российской Федерации — его доля составляет 71,9 %². Крайне важно и его значение в обеспечении транспортной доступности и связности территории, поскольку автодороги — единственный вид транспорта, представленный на территории всех субъектов федерации [Крылов, 2007, с. 176; Савруков, Савруков, 2020].

Целью данного исследования является анализ транспортной доступности населенных пунктов Республики Мордовия с использованием теории графов и инструментов пространственного анализа. Ожидается, что данный подход позволит выявить проблемные места транспортной сети, требующие внимания при планировании дальнейшего развития инфраструктуры, а также оценить возможности применения названных методов в дальнейшем. Основной акцент исследования направлен на анализ конфигурации и пространственного размещения автомобильных дорог Республики Мордовия. Методика данного исследования может рассматриваться как один из этапов оценки развитости и функциональности региональной транспортной системы, которая будет проводиться в дальнейшем с привлечением большего объема данных и показателей (в т. ч. интегральных).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для измерения транспортной доступности активно применяется теория графов. Транспортная сеть представляется в виде графа, где вершины — это экономико-географические объекты, а ребра — пути сообщения (автодороги, железные дороги, речные и морские пути, маршруты авиатранспорта). Ребра графа имеют импеданс (стоимость перемещения по сети), единица измерения которого зависит от целей исследования и доступности данных.

Импеданс может быть измерен как время, затраченное на перемещение, либо как преодоленное расстояние. «Время» является в этом случае интегральной характеристикой, учитывающей и протяженность дороги, и качество покрытия (влияющее на фактическую

¹ Транспортная доступность. Большая российская энциклопедия. Электронный ресурс: <https://bigenc.ru/c/transportnaia-dostupnost-3feb4f> (дата обращения 12.04.2024)

² Росстат. Транспорт. Электронный ресурс: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (дата обращения 20.04.2024)

скорость перемещения), и пропускную способность в целом. Использование в данном исследовании «расстояния» позволяет оценить конфигурацию транспортной сети без учета других характеристик.

Существуют исследования, где в роли импеданса используются как время [Семина, Фоломейкина, 2009; Бугроменко, 2012], так и расстояние [Gankhuyag et al., 2021], или даже комплекс показателей, включающих в себя расстояние, время и различные экономические показатели [Савруков, Савруков, 2020]. Поскольку данное исследование рассматривается как определенный этап оценки транспортной системы Республики Мордовия, рассмотрим расстояние в качестве импеданса для оценки самых базовых характеристик транспортной системы.

Из разработанных к настоящему моменту методов измерения доступности можно вывести два простых и весьма практичных показателя — географическую и потенциальную доступность. *Географическая доступность* (geographic accessibility) предполагает, что доступность местоположения — это сумма всех расстояний между другими местоположениями, деленная на их количество. Чем ниже значение показателя, тем доступнее местоположение. Рассчитывается по формулам (1) и (2):

$$d_{ij} = L \quad (1),$$

$$A(G) = \sum_i^n \sum_j^n \frac{d_{ij}}{n} \quad (2),$$

где d_{ij} — кратчайшее расстояние между местоположениями i и j ,
 L — матрица взвешенного графа (с учетом импеданса),
 $A(G)$ — матрица географической доступности,
 n — количество местоположений.

Географическая доступность является адаптацией индекса Шимбела и взвешенного графа, при которой самое доступное местоположение имеет наименьшую сумму расстояний.

Потенциальная доступность (potential accessibility) является более сложным показателем, чем географическая, поскольку она предполагает использование концепции расстояния, взвешенного атрибутами местоположения. Не все местоположения равнозначны — некоторые из них имеют большую важность. Потенциальная доступность может быть рассчитана следующим образом по формуле (3):

$$A(P) = \sum_i^n P_i + \sum_j^n \frac{P_j}{d_{ij}} \quad (3),$$

где $A(P)$ — матрица потенциальной доступности,
 d_{ij} — импеданс между местоположениями i и j (берется из матрицы взвешенного графа),
 P_j — атрибуты местоположения j , такие как численность населения, площадь, используемая для торговли или парковочных мест и т. д.,
 n — количество местоположений.

Матрица потенциальной доступности не может быть транспонирована, поскольку местоположения обладают неодинаковыми характеристиками, что приводит к основополагающим понятиям излучательности и притягательности:

- *излучательность* (emissiveness) — это способность покинуть местоположение, равная сумме значений по строке в матрице $A(P)$;
- *притягательность* (attractiveness) — это способность добраться до местоположения, равная сумме значений по столбцу в матрице $A(P)$.¹

В матрице $A(P)$ все ячейки рассчитываются по формуле (4):

$$A(P)_{i,j} = \frac{P_i}{A(G)_{i,j}} \quad (4),$$

где P_i — численность населения населенного пункта строки i ,
 $A(G)_{i,j}$ — соответствующая ячейка матрицы географической доступности, рассчитанной ранее.

Исключением является главная диагональ матрицы $A(P)$, ячейкам которой присваиваются значения численности населения соответствующего населенного пункта. Это число обозначает потенциальную возможность перемещения внутри населенного пункта.

Еще одним показателем, используемым в исследовании, является индекс объезда. *Индексом объезда* (detour index) называется мера эффективности транспортной сети с точки зрения того, насколько хорошо она преодолевает расстояние (трение расстояния). Чем ближе индекс объезда к единице, тем больше пространственная эффективность сети. Сети с индексом объезда, равным единице, практически не встречаются — значения большинства сетей помещаются на асимптотической кривой, приближаясь к единице, но не достигая ее. Сложность рельефа часто является хорошим индикатором уровня объезда. Индекс объезда DI рассчитывается по формуле (5):

$$DI = \frac{D(S)}{D(T)} \quad (5),$$

где $D(S)$ — расстояние по прямой между пунктом отправления и пунктом назначения,
 $D(T)$ — транспортное расстояние по существующей дороге или маршруту [Rodrigue et al., 2013, p. 317].

Для построения графа транспортной сети использовался программный комплекс ArcGIS Desktop, в частности модуль и набор инструментов «Сетевой анализ». Он же был использован для картографирования транспортной сети и рассчитанных показателей.

На первом этапе исследования при создании модели транспортной сети (графа) в ГИС необходимо произвести выборку изучаемых населенных пунктов и путей сообщения. От выборки напрямую зависят значения рассчитанных показателей, что приводит нас к утверждению об относительной природе показателей транспортной доступности. Если существует конкретный стратегический транспортный план, нормы и цензы отбора в отношении местоположений, доступность которых необходимо улучшить, или путей сообщения, которые необходимо реконструировать или проложить «с нуля», они могут быть прописаны в нем. В случае, когда плана нет, в качестве цензов могут выступить

¹ The Geography of Transport Systems. A.4 — Transportation and Accessibility. Электронный ресурс: <https://transportgeography.org/contents/methods/transportation-accessibility/> (дата обращения 07.02.2024)

административный статус и/или численность населения. При этом выбранные населенные пункты должны обеспечивать достаточное покрытие исследуемой территории.

В данном исследовании учитывались населенные пункты Республики Мордовия с численностью населения 2 000 чел. и более (37 объектов), суммарная численность населения которых составляет 74 % населения Мордовии (по данным на 2023 г.¹). Исходя из сущности рассчитываемых показателей географической и потенциальной доступности необходимо включить в графе лишь те участки автодорог, которые задействованы в кратчайших маршрутах между всеми рассматриваемыми населенными пунктами. Кратчайшие маршруты рассчитывались с помощью онлайн-сервиса Яндекс.Карты. Примечательно, что сервис не учитывает в маршрутах автодороги без покрытия, поскольку движение по ним на автомобилях затруднено, а в отдельные сезоны и вовсе невозможно.

В определенных случаях расстояние из пункта *A* в пункт *B* не равно расстоянию из пункта *B* в пункт *A*, что может быть обусловлено односторонним движением по некоторым дорогам. Этот фактор важно учитывать при анализе внутригородской транспортной сети, но на уровне региона им можно пренебречь.

Расстояния по прямой (евклидовы расстояния) между населенными пунктами можно рассчитать уже в ArcGIS, с помощью инструмента «Расстояние между точками». Исходя из допущения о том, что расстояние *AB* идентично расстоянию *BA*, число уникальных расстояний будет равно $\frac{37 \cdot 36}{2} = 666$.

Полученные значения представим в виде матрицы с использованием программы MS Excel, где и произведем дальнейшие расчеты.

В отличие от исследования, выполненного для дорожной сети Монголии [Gankhuyag et al., 2021], авторами рассчитан индекс объезда не для отдельных ребер графа, а непосредственно для маршрутов между населенными пунктами. Это очень важное изменение, поскольку сами по себе дорожные участки могут иметь достаточно высокий индекс объезда, а их последовательность от пункта отправления до пункта назначения — плохо справляться с преодолением расстояния, образуя дуги с большими значениями кривизны (рис. 1).

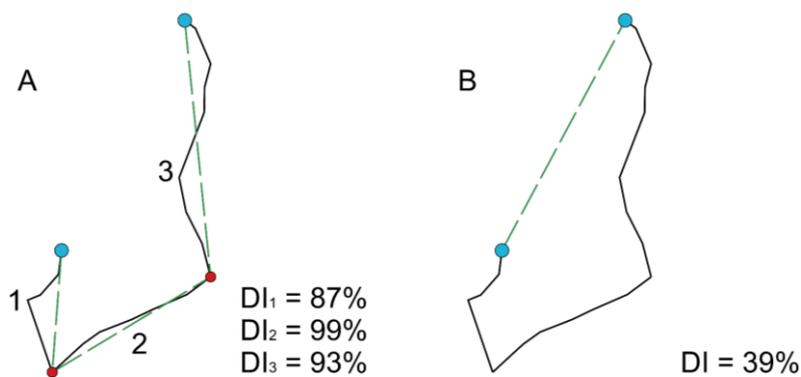


Рис. 1. Разница в методах вычисления индекса объезда
Fig. 1. Difference between methods of detour index calculation

Другим важным дополнением, связанным с предыдущим, становится суммирование и усреднение по строке или столбцу (что равнозначно) индексов объезда для каждого

¹ Росстат. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям. Электронный ресурс: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (дата обращения 21.03.2024)

населенного пункта. Таким образом, средний индекс объезда, рассчитываемый для населенных пунктов, показывает пространственную эффективность маршрутов от данного населенного пункта до всех других в преодолении расстояния.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При построении графа транспортной системы Республики Мордовия было установлено, что некоторые кратчайшие маршруты между населенными пунктами проходят через Нижегородскую область (рис. 2). Полученный граф выходит за пределы административных границ Республики Мордовия; это говорит о том, что самоорганизация сети происходит независимо от границ региона, формируется функциональная дорожная сеть по кратчайшим маршрутам [Крылов, 2007, с. 51; Тархов, 2018]. И хотя экономический фактор взаимодействия не доказан данным исследованием в полной мере, с пространственной точки зрения можно говорить, что такие населенные пункты Нижегородской области, как Вознесенское, Дивеево, Первомайск, Лукоянов, Починки и Большое Болдино (а также и другие населенные пункты вдоль дорог, не указанные на карте), могут быть отнесены к расширенной региональной транспортной сети (РТС) Мордовии.



Рис. 2. Граф расширенной региональной транспортной сети Республики Мордовии
Fig. 2. Graph of the Republic of Mordovia expanded regional transport network

Примечательно, что находящийся внутри расширенной РТС крупный населенный пункт Саров и проходящие через него автодороги не используются в кратчайших маршрутах между рассматриваемыми населенными пунктами Мордовии. Это же справедливо и для участка трассы Р-158 от Лямбиров до Починков. Такие «островки» незадействованных дорог говорят об их не востребоваемости исключительно для рассматриваемой выборки и региональной системы Мордовии. В связи с этим может быть выдвинута следующая гипотеза: если автодороги не задействованы при анализе региональных систем двух субъектов в отдельности, но задействованы при совместном анализе регионов, это

говорит о связующем, межрегиональном характере рассматриваемых автодорог. Если же ни на каких других уровнях дороги не используются в кратчайших маршрутах, имеет место факт их невостребованности.

Дорога через Лукоянов используется в маршрутах «Ельники–Кемля», «Ельники–Ичалки», «Ельники–Большое Игнатово», «Темников–Большое Игнатово», «Теньгушево–Ардатов», «Теньгушево–Тургенево», «Теньгушево–Большое Игнатово», «Теньгушево–Кемля», «Теньгушево–Ичалки».

В ходе рассмотрения рисунков транспортных сетей районов Мордовии и граничащих с ними районов Нижегородской области было замечено, что административные границы как субъектов федерации, так и муниципальных районов могут выступать в роли барьера при развитии транспортной сети. Безусловно, если речь идет о государственной границе между двумя странами, такой барьер будет более чем обусловлен. Обычно его прерывают лишь отдельные магистрали, проходящие через макрорегион или континент. Барьер менее заметен, если речь идет о странах, которые ранее были частью одного государства; он также может сглаживаться со временем, если между странами развиваются добрососедские отношения, чему способствует нахождение в политическом или экономическом союзе (Европейский Союз).

Наличие же искусственных барьеров между транспортными системами на уровне муниципалитетов и регионов говорит о малом их взаимодействии в рамках единой страны. Среди возможных причин этого явления можно выявить как экономическую несамостоятельность рассматриваемых субъектов и зависимость от федеральных средств, так и отсутствие необходимой правовой и юридической базы, регламентирующей совместные транспортные проекты. Поднятие и решение данной проблемы может стать ключевым фактором в дальнейшем развитии транспортной системы Российской Федерации.

Авторами рассчитано пять матриц размерности 37×37 :

- L — кратчайшие расстояния между населенными пунктами по дорогам, км;
- D — расстояния по прямой, км;
- $A(G)$ — географическая доступность;
- $A(P)$ — потенциальная доступность;
- DI — индекс объезда.

Из матрицы $A(G)$ путем суммирования по строке или столбцу (что равнозначно) были получены показатели географической доступности, из матрицы $A(P)$ — излучательности ($Emiss$) путем суммирования по строке и притягательности ($Attract$) путем суммирования по столбцу, а из матрицы DI — средний индекс объезда \overline{DI} путем суммирования и усреднения по строке или столбцу (что равнозначно). Показатели приведены в табл. 1; для наглядности использована цветовая шкала от зеленого (наилучшие значения) до красного (наихудшие).

Табл. 1. Показатели транспортной доступности для населенных пунктов Республики Мордовии

Table 1. Indicators of transport accessibility for settlements of Republic of Mordovia

Нас. пункт	Население (чел.)	A(G)	Emiss	Attract	\overline{DI}
Саранск	314 871	82	658317	322374	0,83
Рузаевка	42 989	90	82676	59972	0,79
Ковылкино	19 793	116	26883	25477	0,79
Комсомольский	11 255	111	18608	21642	0,79

Нас. пункт	Население (чел.)	A(G)	Emiss	Attract	DI
Зубова Поляна	10 996	173	15759	15029	0,77
Чамзинка	9 464	109	15706	20570	0,78
Ромоданово	9 139	96	14781	23418	0,75
Торбеево	8 970	146	11985	13417	0,78
Краснослободск	8 910	118	12183	14440	0,78
Ардатов	8 857	159	12471	13964	0,77
Луховка	8 812	85	16903	49416	0,81
Лямбирь	8 346	89	14437	33884	0,74
Инсар	7 920	110	11122	15270	0,81
Темников	6 451	157	8311	10316	0,75
Ялга	6 204	85	12757	45056	0,81
Большие Березники	6 077	118	8662	14594	0,80
Атяшево	6 046	130	8642	12874	0,80
Явас	5 849	175	7512	9395	0,73
Ельники	5 247	143	6773	9609	0,67
Старое Шайгово	4 818	97	6856	13249	0,76
Тургенево	4 453	165	6196	9873	0,76
Кемля	4 358	120	7424	12788	0,72
Атемар	4 245	91	7182	26412	0,77
Большая Елховка	4 009	90	6887	26266	0,75
Кадошкино	3 960	111	5581	11534	0,72
Атюрьево	3 920	136	5266	8725	0,77
Теньгушево	3 731	192	4573	6811	0,76
Николаевка	3 725	84	7943	56501	0,81
Потьма	3 681	178	5150	8258	0,72
Татарская Пишля	3 326	92	6273	31995	0,77
Дубёнки	3 307	133	4589	9810	0,83
Белозерье	3 078	95	5078	18819	0,73
Кочкурово	3 004	103	4634	18507	0,76
Большое Игнатово	2 842	150	3701	7857	0,76
Ичалки	2 665	118	4567	11891	0,73
Берсеневка	2 553	84	4828	47793	0,78
Умёт	2 461	183	3326	6733	0,75

Полученные данные были отображены на картах (рис. 3–5) способом градуированных символов (классификация выполнена методом естественных границ).

Поскольку географическая доступность учитывает исключительно пространственные характеристики, она будет выше в местах большой концентрации населенных пунктов, что обычно соответствует расположению крупного города (рис. 3). В Мордовии выделяется городской округ Саранск — он и становится единственным центром притяжения, по аналогии с гравитационными моделями. Географическая доступность ухудшается по мере отдаления от Саранска; пропорционально с этим увеличиваются и расстояния между населенными пунктами. Поверхность, отображающую изменение географической доступности, можно интерполировать полиномом второй или третьей степени.

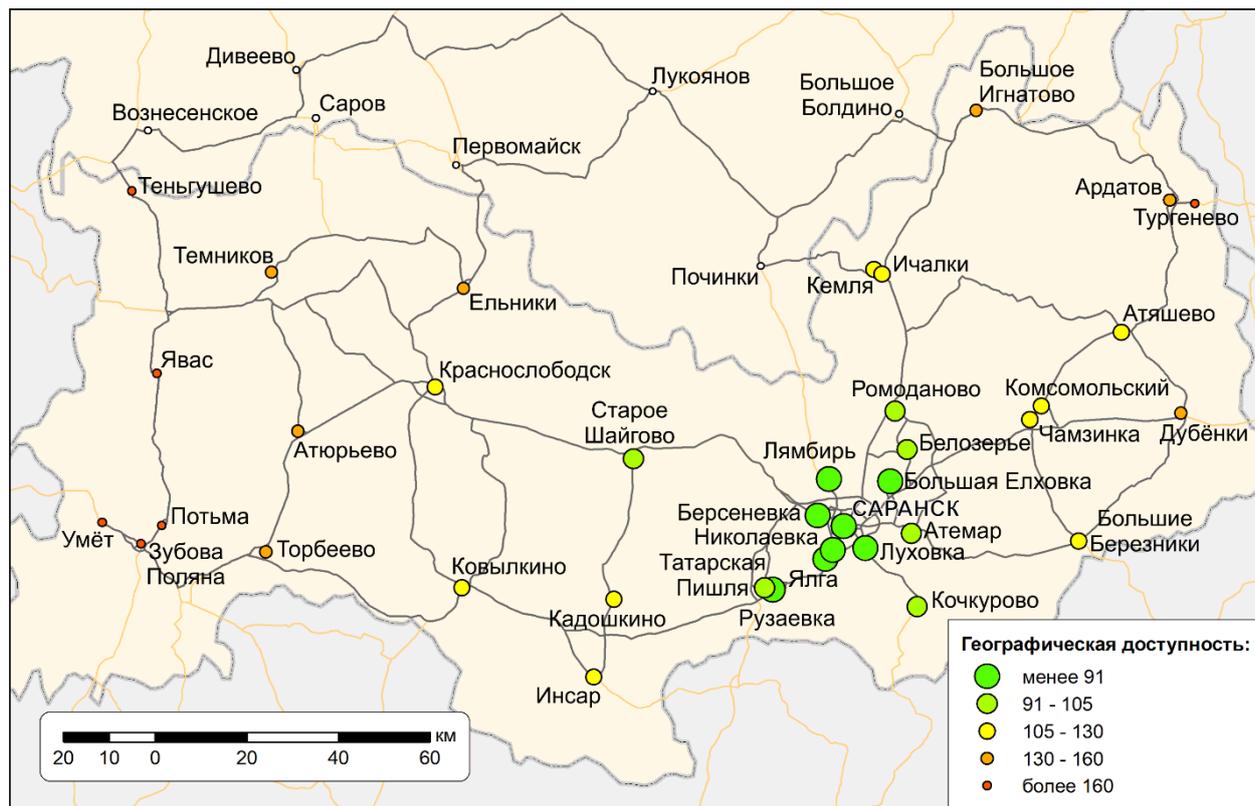


Рис. 3. Географическая доступность населенных пунктов Республики Мордовия
 Fig. 3. Geographic accessibility of settlements of Republic of Mordovia

Потенциальную доступность характеризуют два показателя — излучательность и притягательность (рис. 4). Здесь закономерности с пространственным положением уже не столь очевидны. Излучательность в большей степени, чем притягательность, зависит от численности населения, однако не идентична ей. Населенные пункты, такие как Кемля или Николаевка, имеющие меньшее население в сравнении со Старым Шайговым или Ельниками, будут иметь лучшие показатели излучательности из-за близости к другим населенным пунктам, независимо от размера последних. Притягательность же в большей степени зависит от близости к другим населенным пунктам. Не считая Саранска, самые высокие показатели притягательности демонстрируют сплошь пригородные населенные пункты и спутники — Рузаевка (имеющая свой пригород — Татарскую Пишлю), Николаевка, Луховка, Берсеневка, Ялга, Лямбиров, Атемар, Большая Елховка.

При расчете матрицы $A(P)$ существует возможность не учитывать потенциалы перемещения внутри населенных пунктов. Для этого элементам матрицы по главной диагонали нужно присвоить значение 0. Особый интерес при таком расчете представляют значения внешней притягательности ($Attract_2$, см. табл. 2): самые высокие значения будут соответствовать спутникам или населенным пунктам, имеющим потенциал спутника (Николаевка, Берсеневка, Луховка), в середине списка расположатся потенциальные (Кадошкино, Атяшево) и реальные (Саранск) центры притяжения, а самые низкие значения будут у отдаленных населенных пунктов, не имеющих ни потенциала центра притяжения, ни потенциала спутника (Теньгушево, Явас, Темников).

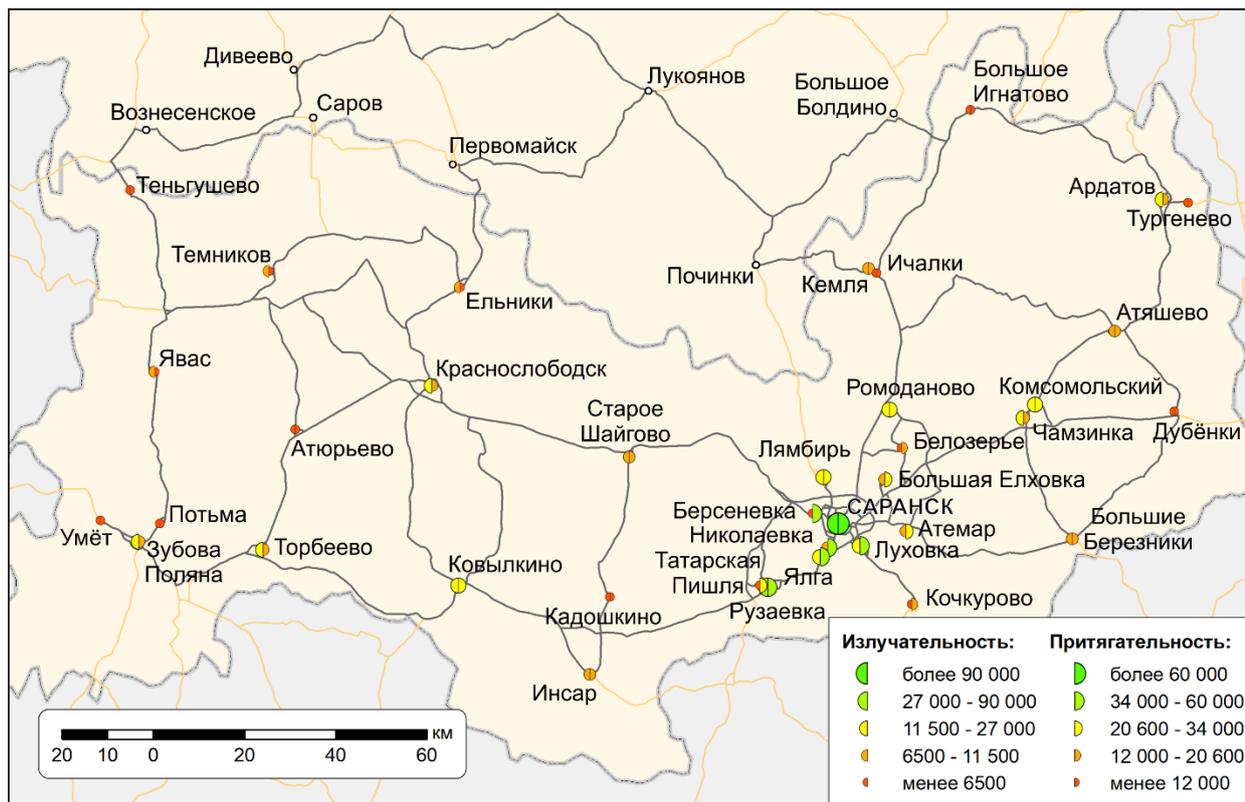


Рис. 4. Потенциальная доступность населенных пунктов Республики Мордовия
Fig. 4. Potential accessibility of settlements of Republic of Mordovia

Табл. 2. Значения внешней притягательности населенных пунктов
Table 2. Values of external attractiveness of settlements

Нас. пункт	Attract ₂	Нас. пункт	Attract ₂	Нас. пункт	Attract ₂
Николаевка	52776	Комсомольский	10387	Ардатов	5107
Берсеневка	45240	Ичалки	9226	Большое Игнатово	5015
Луховка	40604	Большие Березники	8517	Атюрьево	4805
Ялга	38852	Старое Шайгово	8431	Потья	4577
Татарская Пишля	28669	Кемля	8430	Торбеево	4447
Лямбирь	25538	Кадошкино	7574	Ельники	4362
Большая Елховка	22257	Саранск	7503	Умёт	4272
Атемар	22167	Инсар	7350	Зубова Поляна	4033
Рузаевка	16983	Атяшево	6828	Темников	3865
Белозерье	15741	Дубёнки	6503	Явас	3546
Кочкурово	15503	Ковылкино	5684	Теньгушево	3080
Ромоданово	14279	Краснослободск	5530		
Чамзинка	11106	Тургенево	5420		

В табл. 3 показан фрагмент матрицы DI (индекс объезда). В зависимости от кривизны маршрута он варьируется от наилучшего значения 95 % (Атяшево–Комсомольский) до наихудшего 39,4 % (Белозерье–Большая Елховка). 6 маршрутов из 666 имеют индекс объезда менее 50 %, 27 маршрутов — менее 60 %, 142 маршрута — менее 70 %.

Индекс объезда практически не зависит от местоположения, поскольку он учитывает степень отклонения маршрута от прямой линии. С географической точки зрения о неэффективности дорог говорит относительно ровный рельеф республики, отсутствие препятствий в виде гор и крупных внутренних водоемов, при которых типичны низкие значения индекса объезда. К значительным препятствиям на территории Мордовии можно отнести лишь массивы леса, способные в перспективе увеличить расходы на строительство новых дорог.

Табл. 3. Фрагмент матрицы DI (индекс объезда)¹
Table 3. Part of DI (Detour Index) matrix

	SAR	RUZ	KOV	KOM		BIG	ICH	BER	UME	\bar{DI}
SAR		83,5 %	84,4 %	90,3 %		92,0 %	91,6 %	76,5 %	80,9 %	83,2 %
RUZ	83,5 %		90,4 %	87,9 %		85,2 %	82,3 %	65,5 %	84,1 %	79,3 %
KOV	84,4 %	90,4 %		85,0 %		74,5 %	70,3 %	78,4 %	78,3 %	78,8 %
KOM	90,3 %	87,9 %	85,0 %			55,8 %	55,2 %	86,4 %	78,9 %	79,0 %
BIG	92,0 %	85,2 %	74,5 %	55,8 %			94,2 %	86,8 %	69,2 %	76,4 %
ICH	91,6 %	82,3 %	70,3 %	55,2 %		94,2 %		81,8 %	67,7 %	72,8 %
BER	76,5 %	65,5 %	78,4 %	86,4 %		86,8 %	81,8 %		77,3 %	78,4 %
UME	80,9 %	84,1 %	78,3 %	78,9 %		69,2 %	67,7 %	77,3 %		75,5 %
\bar{DI}	83,2 %	79,3 %	78,8 %	79,0 %		76,4 %	72,8 %	78,4 %	75,5 %	76,8 %



Рис. 5. Средний индекс объезда населенных пунктов Республики Мордовии
Fig. 5. Mean detour index of settlements of Republic of Mordovia

¹ Расшифровка индексов: SAR — г. Саранск, RUZ — г. Рузаевка, KOV — г. Ковылкино, KOM — пгт Комсомольский, BIG — с. Большое Игнатово, ICH — с. Ичалки, BER — с. Берсеневка, UME — пгт Умёт

Для более точных выводов и сравнительного анализа необходимы данные, полученные по такой же методике для транспортных систем со схожими и отличными от Мордовии условиями и конфигурациями. Рассчитанные показатели позволяют выявить населенные пункты с наименьшей транспортной доступностью. В целях ее повышения могут быть разработаны проекты новых автодорог.

На рис. 6 показано одно из возможных решений для повышения эффективности РТС Мордовии, задачей которого является достижение минимального значения индекса объезда — 60 % и более для каждого маршрута. Все проектируемые дороги позволят увеличить транспортную доступность между населенными пунктами Республики Мордовии. Кроме того, прямые сообщения «Ельники–Починки» и «Теньгушево–Темников» будут способствовать тому, что ряд автодорог Нижегородской области будет «выключен» из расширенной транспортной системы Республики Мордовии, сдвинув ее ближе к административным границам и улучшив сообщение между северо-западными и северо-восточными районами республики. При предлагаемой конфигурации сети в кратчайшие маршруты также включится участок «Лямбировь–Починки».

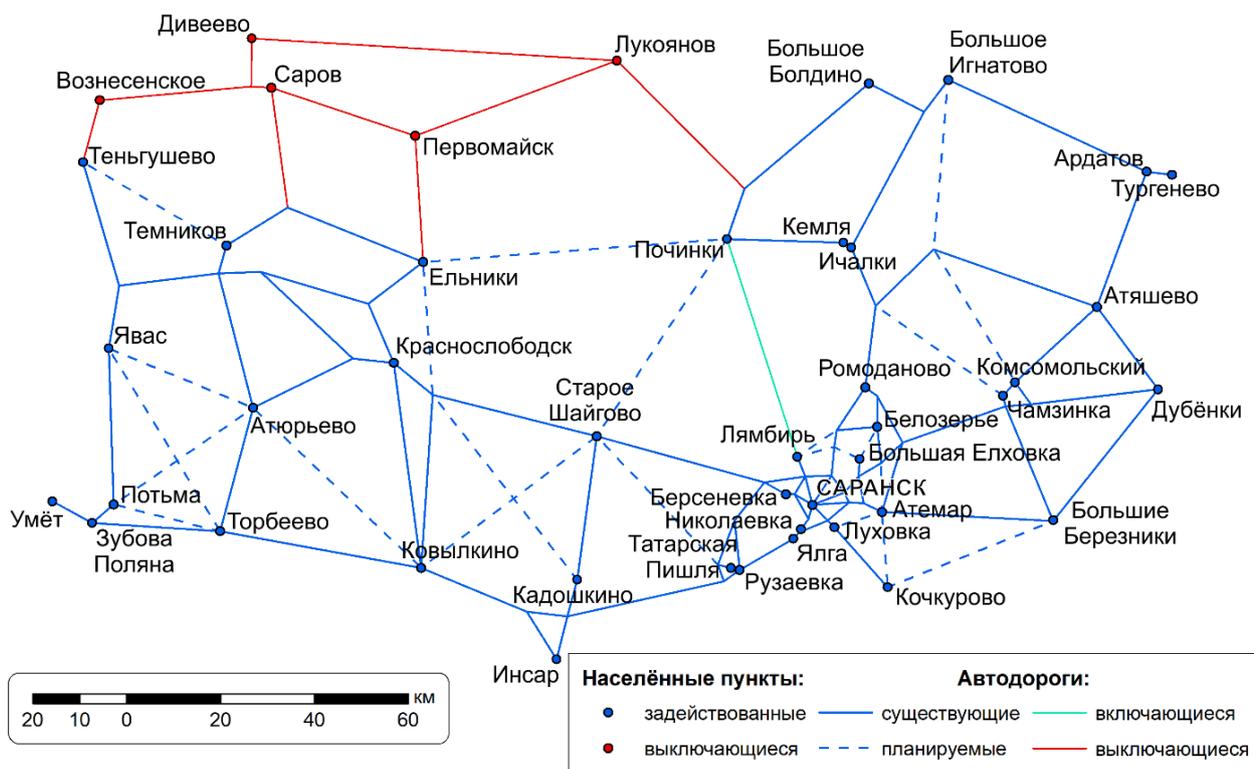


Рис. 6. Проект предлагаемых дорог для повышения эффективности региональной транспортной системы Республики Мордовии
 Fig. 6. Project of proposed roads for regional transport system of the Republic of Mordovia efficiency improvement

По расчетам авторов, при условии, что длина прямого сообщения «Ельники–Починки» будет равна 78 км, а «Теньгушево–Темников» — 50 км, показатели некоторых других маршрутов улучшатся, как показано в табл. 4. Косвенным положительным эффектом от строительства станет также улучшение показателей для маршрутов, имеющих

индекс объезда более 60 % и не рассматриваемых как проблемные в рамках предлагаемого плана.

Табл. 4. Изменение протяженности и индекса объезда некоторых маршрутов
Table 4. Changes in length and detour indexes of some routes

Маршрут	Новая длина, км	Старая длина, км	Новый DI	Старый DI
«Ельники–Кемля (Ичалки)»	109	173	0,82	0,52
«Ельники–Большое Игнатово»	150	188	0,78	0,63
«Теньгушево–Темников»	50	61	0,70	0,57
«Теньгушево–Кемля (Ичалки)»	218	250	0,74	0,65
«Теньгушево–Большое Игнатово»	260	267	0,72	0,69
«Теньгушево–Тургенево»	322	330	0,72	0,70
«Темников–Большое Игнатово»	213	261	0,74	0,60

Подобные косвенные эффекты в очередной раз подтверждают, что любое изменение конфигурации транспортной сети, такое как добавление или исключение сегмента дороги затронет всю систему, поскольку один сегмент может использоваться более чем в одном маршруте. Благодаря этому свойству транспортных сетей, а также близости нахождения некоторых населенных пунктов (либо расположению на одной линии) возможны комплексные решения, когда для улучшения n проблемных маршрутов необходимо m дорог, причем $m \leq n$. В предлагаемом плане (рис. 6) для улучшения 27 проблемных маршрутов со значением индекса объезда менее 60 % было предложено всего 20 новых дорог.

Если на плане две и более планируемые дороги пересекаются (например, «Явас–Торбеево» и «Потьма–Атюрьево», рис. 6), пересечение можно запланировать в конкретном населенном пункте, что однозначно улучшит его доступность и потенциально даст толчок к экономическому развитию. То же самое касается и населенных пунктов, находящихся в зоне планируемой дороги.

Поскольку любое изменение в конфигурации сети влияет на показатели географической и потенциальной доступности, а также индекса объезда, на этапе поиска оптимального решения важно производить пересчет этих показателей после каждого добавления нового ребра в граф. Число вычислений при добавлении нового элемента графа растет в геометрической прогрессии, но эта проблема решается благодаря использованию ГИС и возможности написания алгоритмов автоматизации расчетов и вывода данных в табличной форме.

Постановка итоговой цели проекта может осуществляться несколькими способами, в зависимости от целевого либо ограничивающего фактора. Такими факторами могут быть:

- 1) средний индекс объезда для всех населенных пунктов (ребра добавляются до тех пор, пока не будет достигнуто целевое значение);
- 2) минимальное значение индекса объезда для каждого маршрута (ребра добавляются до тех пор, пока все маршруты не будут иметь целевое значение или выше);
- 3) предельная протяженность новых дорог, в соответствии с выделенным бюджетом (необходимо учитывать запас, с поправкой на кривизну дороги).

Первые два показателя являются целевыми для улучшения транспортной доступности, а предельная протяженность — ограничивающим фактором. Алгоритм для целевых показателей выглядит следующим образом:

- 1) поиск маршрута с наихудшим значением индекса объезда;
- 2) добавление нового ребра в граф, улучшающего индекс объезда для рассматриваемых пунктов (в приоритете — примыкающего к существующей дорожной сети или проходящей через населенный пункт);
- 3) пересчет индексов объезда;
- 4) проверка выполнения условия;
 - 4.1) если условие не выполнено — возврат к шагу 1;
 - 4.2) если выполнено — конец алгоритма.Для ограничивающего фактора в алгоритме изменяются шаги, начиная с 4:
- 4) проверка превышения лимита протяженности нового дорожного полотна;
 - 4.1) если лимит превышен — удаление последнего добавленного ребра, пересчет индексов, возврат к шагу 1, с переходом на последующее наихудшее значение;
 - 4.2) если лимит не превышен — возврат к шагу 1;
 - 4.3) если невозможно добавить ни одно новое ребро, не превысив лимит (проверены все маршруты) — конец алгоритма.

Одним из возможных решений может стать реализация не полностью автоматического, а автоматизированного алгоритма, выполняемого с активным участием оператора, чья задача заключается в добавлении (оцифровке) новых дорог. Может быть реализован и вариант, когда оператор оцифровывает сразу несколько дорог, а алгоритм выбирает ту из них, которая окажет наибольшее положительное влияние на транспортную сеть. Степень такого влияния может быть рассчитана как сумма изменений по модулю показателей в матрице географической или потенциальной доступности, либо в матрице индекса объезда.

ВЫВОДЫ

По результатам исследования можно констатировать, что показатели географической доступности, потенциальной доступности (излучательности и притягательности) и индекса объезда могут быть использованы для оценки конфигурации транспортной сети, ее способности преодолевать расстояния и эффективно связывать населенные пункты исследуемой территории. В то время как географическая доступность зависит лишь от концентрации населенных пунктов (с учетом реальных расстояний по дорожной сети), потенциальная доступность является более комплексным показателем, учитывающим значимость населенных пунктов, которая может выражаться не только в численности населения, но и в других показателях.

Преимущество предлагаемого авторами метода расчета транспортной доступности населенных пунктов в сравнении с классическими методами заключается в учете конфигурации транспортной сети и обнаружении ее проблемных элементов для совокупности всех маршрутов между населенными пунктами. Принципы построения графа (главным образом, выбор вершин) можно модифицировать в зависимости от решаемой задачи и масштаба, на котором планируется поиск проблем транспортной сети, что говорит об универсальности метода.

Граф транспортной системы, построенный в ГИС, можно расширять как интенсивно (добавлением новых населенных пунктов и связывающих их путей сообщения на имеющуюся территорию), так и экстенсивно (продолжая граф на территории соседних субъектов). Информационную систему, включающую в себя элементы графа, можно насыщать новыми показателями и весами, дающими все более полное и комплексное представление о транспортной системе. В частности, могут быть учтены классы дорог и их

текущий износ, выраженные понижающимся коэффициентом, представляющим собой градиент от 1 (для дорог самого высокого качества, не требующих ремонта) до 0 (для дорог, непригодных в эксплуатации). При использовании такого коэффициента отдельные маршруты могут только ухудшить свои показатели, но не наоборот.

Если рассчитывать участки дорог с минимальной протяженностью между многими пунктами, становится возможным ликвидировать т. н. коммуникационную периферию посредством добавления новых ребер в сеть. Пути повышения доступности, в зависимости от преобладающего фактора, также будут различаться: если низкий индекс объезда обусловлен качеством дороги — необходимо усовершенствовать покрытие, если же он обусловлен самой конфигурацией сети — необходимо построить новый сегмент, сокращающий расстояние между населенными пунктами.

На основании выявленных проблем в транспортной системе Мордовии возможна разработка конкретных планов по повышению транспортной доступности и эффективности РТС, основанных на проектировании новых дорог.

Предложенный проект транспортной сети, направленный на повышение эффективности функционирования транспортной системы Республики Мордовия, не является итоговым решением и требует оптимизации с привлечением дополнительных данных. В дальнейшем исследовании необходимо учесть следующее:

- 1) Окупаемость проекта — исчисляется с помощью оценки возможной прибыли при перевозке пассажиров и грузов с учетом конфигурации сети, а также уменьшения издержек.
- 2) Уровень спроса — насколько часто будет использоваться дорога по сравнению с уже существующими маршрутами.
- 3) Возможность покрытия планируемого маршрута другими видами транспорта, их эффективность и доступность для населения (стоимость поездки).
- 4) Затраты на новое дорожное полотно — для обеспечения одних дорожных соединений достаточно проложить 4,6 км новой дороги (как в случае с сообщением «Ельники–Починки», рис. 7), для других — улучшить существующее покрытие (на участке «Теньгушево–Темников»), для третьих — необходимо строительство дороги с нуля.
- 5) «Трение расстояния» — включает в себя все препятствия, увеличивающие затраты на строительство и обслуживание дороги: перепады высот, наличие крупных внутренних водоемов и т. п. С использованием цифровой модели рельефа в ГИС и специализированного алгоритма может быть рассмотрен целый спектр возможных проектов строительства, расположенный между двумя радикально различающимися решениями: минимизацией затрат и максимизацией эффективности. Под эффективностью может пониматься как минимизация индекса объезда, так и охват наибольшего числа промежуточных населенных пунктов. В зависимости от доступных ресурсов, поверхности и приоритетных целей проекта в итоге будет выбран наиболее оптимальный вариант.
- 6) Степень влияния строительства новой дороги на функциональность транспортной сети. Учитывается как положительное влияние (повышение транспортной доступности населенных пунктов вдоль маршрута, создание новых рабочих мест для обслуживания дорожного полотна, постройка автозаправочных станций, гостиниц и кафе для удовлетворения нужд проезжающих пассажиров), так и отрицательное (шумовое загрязнение, автомобильные выхлопы и даже нарушение эстетического образа местности [Семина, Фоломейкина, 2003]).

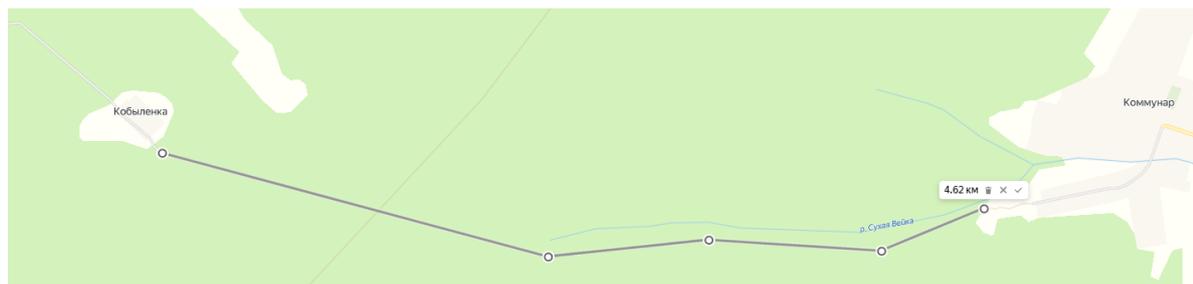


Рис. 7. Предполагаемый участок дорожной сети (с. Кобыленка–с. Коммунар Починковского района), способный обеспечить прямое сообщение «Ельники–Починки»
Fig. 7. Proposed road segment (between villages Kobylenka and Kommunarny in the Pochinkovsky district), which could provide a direct connection “Elniki–Pochinki”

Для полного учета в модели всех необходимых факторов необходимы данные, получение которых может быть затруднительно. Идеальным вариантом стало бы наличие данных об уровне трафика, содержащих информацию о пункте направления, пункте назначения и количестве поездок за период времени (г.). Возможным решением может стать проведение опроса населения с целью выявления наиболее востребованных маршрутов.

Интерпретация полученных результатов в категориальной шкале осложнена отсутствием сопоставимых расчетов показателей для других субъектов Российской Федерации. Тем не менее, классификация полученных значений методом естественных границ однозначно позволяет выделить лидеров и аутсайдеров по каждому показателю, выявить слабые места региональной транспортной системы, которые необходимо учитывать при последующих инвестициях в инфраструктуру и территориальном планировании. Полученные показатели транспортной доступности могут быть использованы при расчете рентабельности транспортных проектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бугроменко В. Н.* Транспортная доступность, ТПП и нерешенные проблемы транспортной географии. Географическое положение и территориальные структуры. Сборник научных трудов: Памяти И. М. Маергойза. М.: Новый хронограф, 2012. С. 403–420.
- Крылов П. М.* Типологии региональных транспортных систем России. Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. М., 2007. 199 с.
- Савруков А. Н., Савруков Н. Т.* Методика расчета индекса и оценка транспортной доступности субъектов РФ. Финансы и кредит, 2020. Т. 26. № 11. DOI: 10.24891/fc.26.11.2410. Электронный ресурс: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44264207> (дата обращения 05.03.2024)
- Семина И. А., Фоломейкина Л. Н.* Воздействие автомобильного транспорта на окружающую среду (на примере Республики Мордовия). Экологические системы и приборы, 2003. № 7. С. 25–28.
- Семина И. А., Фоломейкина Л. Н.* Пространственный анализ в региональном исследовании транспорта с использованием ГИС-технологий. Географический вестник, 2009. № 2. С. 58–67.
- Тархов С. А.* Транспортная освоенность территории. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2018. № 2. С. 3–9.

Gankhuyag U., Myagmarsuren A., Altankhuyag B. Spatial Analysis of Road Network in Mongolia. *Advances in Engineering Research*, 2021. V. 206. P. 146–151. DOI: 10.2991/aer.k.211029.026

Rodrigue J. P., Comtois C., Slack B. The geography of transport systems. 3rd edition. Routledge, 2013. 413 p.

REFERENCES

Bugromenko V. N. Transport accessibility, TGL and unsolved problems of transport geography. Geographical location and territorial structures. Collection of scientific papers: In memory of I. M. Maergoyz. Moscow: New Chronograph, 2012. P. 403–420 (in Russian).

Gankhuyag U., Myagmarsuren A., Altankhuyag B. Spatial Analysis of Road Network in Mongolia. *Advances in Engineering Research*, 2021. V. 206. P. 146–151. DOI: 10.2991/aer.k.211029.026

Krylov P. M. Typologies of regional transport systems in Russia. Dissertation for the scientific degree of PhD in Geography. Moscow, 2007. 199 p. (in Russian).

Rodrigue J. P., Comtois C., Slack B. The geography of transport systems. 3rd edition. Routledge, 2013. 413 p.

Savrukov A. N., Savrukov N. T. A methodology for computing and assessing the transport accessibility index: the Russian Federation subjects case study. *Finance & Credit*, 2020. V. 26. No. 11. DOI: 10.24891/fc.26.11.2410. Web resource: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44264207> (accessed 05.03.2024) (in Russian).

Semina I. A., Folomeikina L. N. Impact of automobile transportation on the environment (by the example of the Republic of Mordovia). *Ecological Systems and Devices*, 2003. No. 7. P. 25–28 (in Russian).

Semina I. A., Folomeikina L. N. Spatial analysis in regional exploration of transport by using GIS-technologies. *Geographical Bulletin*, 2009. No. 2. P. 58–67 (in Russian).

Tarkhov S. A. Transportation development of territories. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5. Geografiya (Lomonosov Geography Journal. Series 5. Geography)*, 2018. No. 2. P. 3–9 (in Russian).

Ю. А. Спирин¹, С. И. Зотов², В. С. Таран³, С. А. Янковский⁴

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕК ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ОСЕННИМ ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ СЕЗОНАМ

АННОТАЦИЯ

Объектом нашего исследования стал бассейн реки Анграпы, обладающий трансграничным статусом и состоящий в основном из малых рек первой и высшей категории рыбохозяйственного значения. С целью объективной оценки загрязненности водосбора выбраны реки, которые смогли бы его в должной мере охарактеризовать: Писса, Красная, Русская и непосредственно сама р. Анграпа. На момент 1 марта 2024 г. проведены шесть последовательных сезонных полевых выездов, начиная с осени 2022 г. и заканчивая зимой 2024 г. В обозначенный период наибольшая загрязненность водотоков зафиксирована осенью 2022 г., поэтому внимания заслуживает вопрос динамики сложившейся ситуации. С этой целью был проведен сравнительный анализ химического состава и индекса загрязнения воды осенью 2022 г. и 2023 г. на предмет динамики загрязняющих веществ. Для каждого водотока определены 4 точки от верховья до устья, в которых 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 и кратностей превышения ПДК различных показателей. В дальнейшем полученные результаты были сопоставлены между собой, что сформировало понимание о пространственно-временной изменчивости рассматриваемых характеристик и факторов, влияющих на них. Исследование показало, что увеличение водности осенью 2023 г. по отношению к осени 2022 г. благоприятно сказалось на качестве воды. Выявленное пространственное загрязнение складывается традиционным образом — качество воды от истока к устью ухудшается с рядом особенностей. В качестве основных загрязнителей осенью 2023 г. выделены: нефтепродукты, железо, БПК₅, растворенный кислород. Другие загрязнители оказывают влияние локально, и не так широко распространены этой осенью по всему бассейну, к ним относятся: аммоний, хлориды, фосфаты и ХПК.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: динамика загрязнения водотоков, бассейн реки Анграпы, гидрохимический анализ, качество вод, картографирование загрязнения рек

¹ Институт географии РАН, лаборатория гидрологии, ул. Вавилова, д. 37, Москва, Россия, 117312, *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:* yankov-sky@mail.ru

Yuri A. Spirin¹, Sergey I. Zotov², Veronika S. Taran³, Serafim A. Yankovsky⁴

COMPARATIVE ANALYSIS OF SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF RIVERS POLLUTION IN THE SOUTHEASTERN PART OF THE KALININGRAD REGION BY AUTUMN HYDROLOGICAL SEASONS

ABSTRACT

The object of our study was the Angrapa River basin, which has transboundary status and consists mainly of small rivers of the first and highest category of fishery importance. In order to objectively assess the pollution of the catchment area, the rivers that could adequately characterize it were selected: Pissa, Krasnaya, Russkaya and directly the Angrapa River itself. As of March 1, 2024, six consecutive seasonal field trips were carried out, starting in the fall of 2022 and ending in winter of 2024. During the specified period, the highest pollution of watercourses was recorded in the fall of 2022, so the issue of the dynamics of the current situation deserves attention. For this purpose, a comparative analysis of the chemical composition and water pollution index was carried out in the fall of 2022 and 2023 for the dynamics of pollutants. For each watercourse, 4 points were identified from the headwaters to the mouth, where hydrological parameters were measured and water samples were taken for chemical analysis. The multiples of exceeding the maximum permissible concentrations (MPC) for a large list of chemical elements were calculated, the water pollution index (WPI) and the corresponding water quality class in the studied rivers were determined. Mapping was carried out and spatial differentiation of WPI and multiples of exceeding the MPC of various indicators was revealed. Subsequently, the obtained results were compared with each other, which formed an understanding of the spatio-temporal variability of the characteristics under consideration and the factors influencing them. The study showed that the increase in water content in the fall of 2023 compared to the fall of 2022 had a beneficial effect on water quality. The identified spatial pollution is formed in a traditional way — water quality from source to mouth deteriorates with a number of features. The main pollutants in the fall of 2023 were: oil products, iron, BOD₅, dissolved oxygen. Other pollutants have a local effect and are not so widespread this fall throughout the basin, they include: ammonium, chlorides, phosphates and COD.

KEYWORDS: dynamics of watercourse pollution, Angrapa River basin, hydrochemical analysis, water quality, river pollution mapping

ВВЕДЕНИЕ

Речная сеть Калининградской области представляет собой важный источник водных ресурсов, необходимых для обеспечения потребностей региона, однако с ростом индустриализации и урбанизации экологическое состояние водотоков стало предметом озабоченности населения [Нагорнова и др., 2011, 2014; Нагорнова, 2012; Ахмедова и др., 2015; Zotov и др., 2021; Zotov, Spirin, 2022]. Современное состояние водных объектов в

¹ Institute of Geography, Russian Academy of Science, Laboratory of Hydrology, 37, Vavilova str., Moscow, 117312, 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*: yankov-sky@mail.ru

значительной степени характеризуется как загрязненное¹. Для разработки эффективной стратегии водоохранной и водозащитной деятельности необходимо иметь доступ к достоверным гидрохимическим данным по водным объектам, однако такая информация часто остается недоступной. Осуществление сезонного мониторинга по гидрохимическим параметрам водотоков является ключевым инструментом для анализа текущей экологической ситуации в регионе. Важность таких мероприятий усиливается в свете отсутствия у региона сухопутной границы с основной частью Российской Федерации.

Объектом нашего исследования выбраны реки юго-восточной части Калининградской области, относящиеся к бассейну реки Анграпы. Это реки Писса, Красная, Русская и непосредственно сама р. Анграпа (рис. 1). Интерес для изучения именно этой территории подробно описан в публикации [Спирин и др, 2023], поэтому тезисно его можно выразить в следующих аспектах: высотная расчлененность ландшафтов, связанная с особенностями рельефа; ООПТ, находящаяся в границах исследуемого бассейна — природный парк «Виштинецкий»; трансграничность водосбора в верховьях рек, расположенных на территории Польши, сопряженность различных природно-хозяйственных условий местности, активная сельскохозяйственная деятельность и умеренная урбанизация.



Рис. 1. Картограмма водосборного бассейна р. Анграпы относительно РФ, Литвы, Польши, Калининградской области и ее муниципалитетов
 Fig. 1. Map of the drainage basin of the river Angrapa regarding: Russian Federation, Lithuania, Poland, Kaliningrad region and its municipalities

¹ Государственный доклад «Об экологической обстановке в Калининградской области в 2021 году». Калининград: ООО «ВИА Калининград», 2022. 51 с.

На момент 1 марта 2024 г. проведены шесть последовательных сезонных полевых выездов, начиная с осени 2022 г. и заканчивая зимой 2024 г. В обозначенный период наибольший уровень загрязнения водотоков отмечался осенью 2022 г. [Спирин и др, 2023], поэтому внимания заслуживает вопрос динамики сложившейся ситуации. Для этого необходимо сопоставить данные осени 2022 и 2023 гг., чтобы выявить потенциальные закономерности загрязнения от циклов природной и антропогенной активности, присущие данному сезону. В связи с этим формируется следующая цель работы: провести сравнительный анализ и оценить пространственно-временную изменчивость уровней химического загрязнения в рамках двух последовательных осенних гидрологических сезонов в бассейне р. Анграпы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор водотоков и пунктов для гидрохимического мониторинга осуществлялся таким образом, чтобы дать объективную сравнительную картину пространственно-временной динамики содержания загрязняющих веществ. Более подробно с методикой выбора водотоков можно ознакомиться в нашей прошлой работе [Спирин и др., 2023]. Картограмма наблюдений представлена на рис. 2, а расположение пунктов мониторинга — в табл. 1.

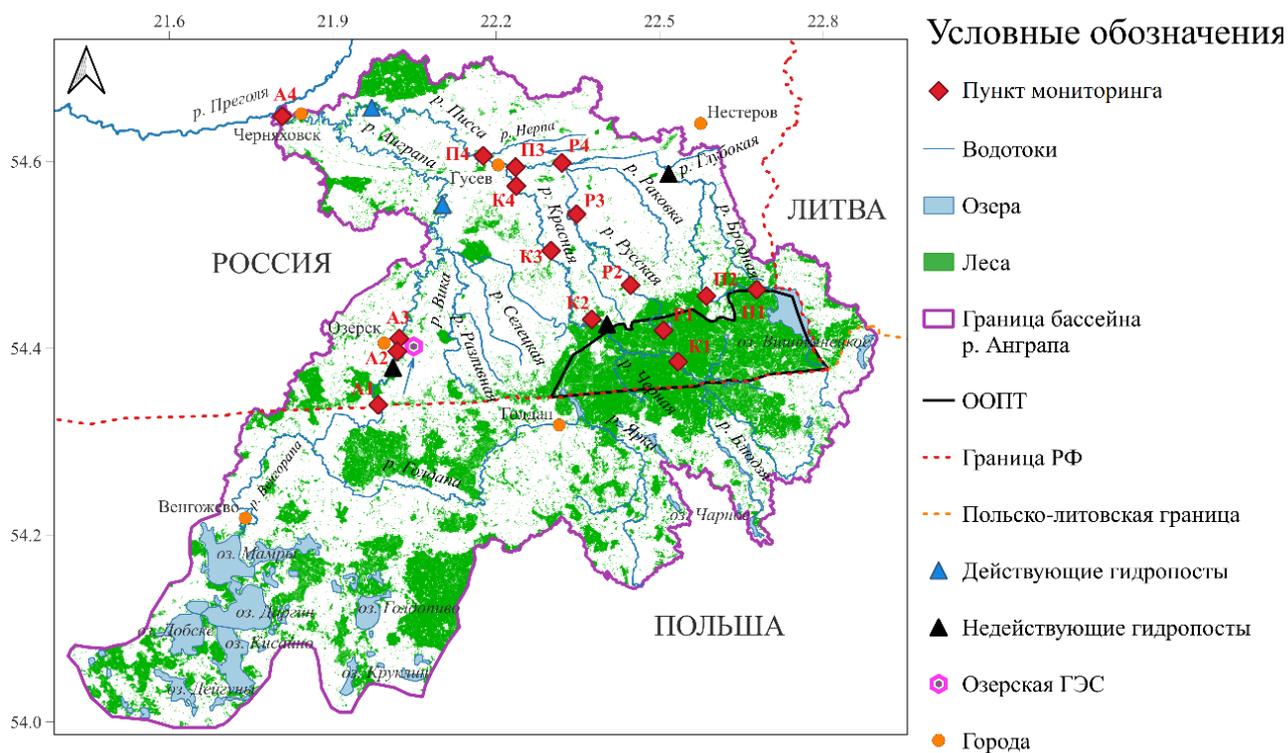


Рис. 2. Картограмма расположения исследуемых водотоков и локация пунктов мониторинга воды
Fig. 2. Map of the location of the researched watercourses and the location of water monitoring points

Табл. 1. Выбранные реки и местоположение пунктов мониторинга
Table 1. Selected rivers and locations of monitoring points

№	Река Анграпа (А)	Река Писса (П)	Река Русская (Р)	Река Красная (К)
1	п. Междулесье	п. Ягодное	п. Пугачево	п. Радужное
2	с. Минское	п. Калинино	п. Чистые пруды	п. Токаревка
3	г. Озерск	п. Брянское	п. Новостроевка	п. Ольховатка
4	г. Черняховск	г. Гусев	п. Подгоровка	п. Липово

Полевые исследования на реках были осуществлены в два осенних гидрологических сезона: 15.10.2022 и 15.10.2023. Отмечены следующие гидрометеорологические условия сезонов по метеостанции г. Черняховск: осень 2022 г. (средняя температура воздуха — 8,2 °С, сумма осадков — 146 мм), осень 2023 г. (средняя температура воздуха — 9,9 °С, сумма осадков — 320 мм). Химические анализы проб проведены на основе стандартных методик в лаборатории Высшей школы живых систем БФУ им. И. Канта. Соблюдена унифицированность методов исследования для корректного сравнения данных по двум выездам [Спирин и др., 2023]. Определены показатели взвешенных веществ, растворенного кислорода, биохимического потребления кислорода (БПК₅), химического потребления кислорода, нитратов, нитритов, аммония, фосфатов, сухого остатка, хлоридов, сульфатов, натрия, магния, калия, кальция, железа, нефтепродуктов, солености. С использованием совмещенного списка предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ из нормативных документов¹ рассчитаны кратности превышения ПДК гидрохимических показателей и индекс загрязнения воды (ИЗВ)².

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, 2019; Lata, 2020]. Качество воды в реках можно рассматривать как интегральный показатель экологической обстановки на их водосборах. Исходя из этого допущения были построены схемы пространственной дифференциации ИЗВ и основных загрязняющих веществ [Нагорнова, 2012; Джамалов и др., 2019; Зотов, Спирин, 2022; Lättchen et al., 2021]. Структура работы строится по принципу представления полученных осенью 2023 г. данных, через призму сравнения их с прошлым осенним сезоном 2022 г., информация по которому представлена здесь [Спирин и др., 2023].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты полевых и лабораторных химических анализов за осень 2023 г. занесены в табл. 4, пункты маркированы в соответствии с картосхемой на рис. 2. Полу жирным выделены используемые при расчете ИЗВ показатели, исходя из описанной ранее методики.

¹ «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 года)». Электронный ресурс: <http://docs.cntd.ru/document/420389120>. (дата обращения 19.03.23). 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 19.03.23)

² 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.

Табл. 2 Гидрохимические показатели водотоков водосборного бассейна реки Анграпы (осень 2023 г.)
 Table 2. Hydrochemical indicators of watercourses in the catchment area of the river Angrapa (autumn 2023)

Водотоки	Река Анграпа				Река Писса				Река Русская				Река Красная			
	А1	А2	А3	А4	П1	П2	П3	П4	Р1	Р2	Р3	Р4	К1	К2	К3	К4
Пункты отбора																
Цветность, градусы	10	10	15	10	5	5	10	25	15	25	25	25	5	5	5	5
Запах, баллы	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2	0	1	0	0	0
Мутность, мг/л	5	5	10	15	5	5	5	15	30	5	15	20	5	5	10	20
t воды, °С	9,6	3,9	4,4	4,3	12,1	11,7	8,2	4,5	10,8	10,4	10,0	11,6	10,9	11,5	11,3	12,2
pH, ед	7,5	7,8	7,9	7,4	7,8	7,4	8,0	7,6	7,1	7,2	7,2	8,0	7,8	7,7	7,7	7,8
Взвеш. вещ., мг/л	0,45	0,12	0,10	0,12	1,76	0,33	0,17	0,13	5,75	0,71	0,84	0,80	0,24	0,01	0,31	0,32
Раств. О ₂ , мг/л	10,23	8,91	9,16	8,72	5,71	3,11	2,42	2,38	0,51	2,52	1,10	10,83	11,87	6,41	4,85	3,12
ХПК, мг/л	12,4	15,5	5,0	20,7	5,0	8,0	12,5	35,6	78,1	102,3	70,0	17,8	5,0	5,0	5,0	12,9
БПК ₅ , мг/л	1,1	3,0	5,1	2,0	2,2	0,3	5,0	4,2	2,5	2,0	10,9	1,4	3,4	3,6	4,0	3,4
Нитраты, мг/л	2,54	3,29	1,97	4,26	0,80	9,92	0,84	6,54	7,85	4,66	18,80	3,06	1,35	1,81	1,85	1,62
Нитриты, мг/л	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,265	0,001	0,001	0,001	0,001	0,156
Аммоний, мг/л	0,097	0,099	0,088	0,089	0,222	0,056	0,097	0,906	1,161	0,324	5,090	0,126	0,057	0,075	0,084	0,065
Фосфаты, мг/л	0,099	0,075	0,058	0,063	0,031	0,002	0,018	0,691	0,413	0,190	0,005	0,021	0,001	0,002	0,002	0,012
Сухой остаток, мг/л	0,42	0,24	0,32	0,38	0,18	0,43	0,22	0,78	1,26	0,15	0,09	1,48	0,03	0,11	0,19	0,14
Хлориды, мг/л	31,8	241,1	234,9	242,3	62,9	683,0	90,9	362,6	2444	157,9	730,0	3702	121,5	118,5	67,6	99,1
Сульфаты, мг/л	193,6	196,4	201,5	200,7	114,5	114,1	130,6	147,4	132,2	124,9	22,6	148,0	164,5	93,3	104,0	96,9
Натрий, мг/л	32,97	17,05	17,22	20,01	12,96	5,58	9,35	34,01	53,12	19,35	30,36	141,4	3,63	7,31	23,37	6,97
Магний, мг/л	11,80	13,59	13,73	13,64	9,98	8,89	9,38	25,88	22,34	14,03	16,94	23,09	7,53	12,25	13,84	12,51
Железо, мг/л	0,256	0,112	0,164	0,213	0,350	0,245	0,108	0,111	0,847	0,916	0,541	0,442	0,645	0,506	0,487	0,335
Нефтепродукты, мг/л	0,09	0,15	0,33	0,19	0,13	0,18	0,41	1,08	1,14	0,53	0,46	0,31	0,04	0,09	0,07	0,07
Соленость, мг/л	0,42	0,31	0,28	0,34	0,26	0,31	0,21	0,77	1,57	0,58	0,52	1,81	0,31	0,49	0,26	0,25
Калий, мг/л	3,90	3,96	4,43	4,70	3,67	2,84	4,09	7,56	9,34	8,48	16,01	9,39	2,07	2,23	2,75	2,26
Кальций, мг/л	56,45	60,90	60,08	59,84	52,31	39,75	41,97	157,8	139,9	69,55	98,19	103,7	35,24	64,60	67,82	65,23

На основе химических показателей из табл. 4 рассчитаем ИЗВ за осень 2023 г. для каждого пункта мониторинга и сравним полученный результат со значениями для осени 2022 г. (рис. 3).

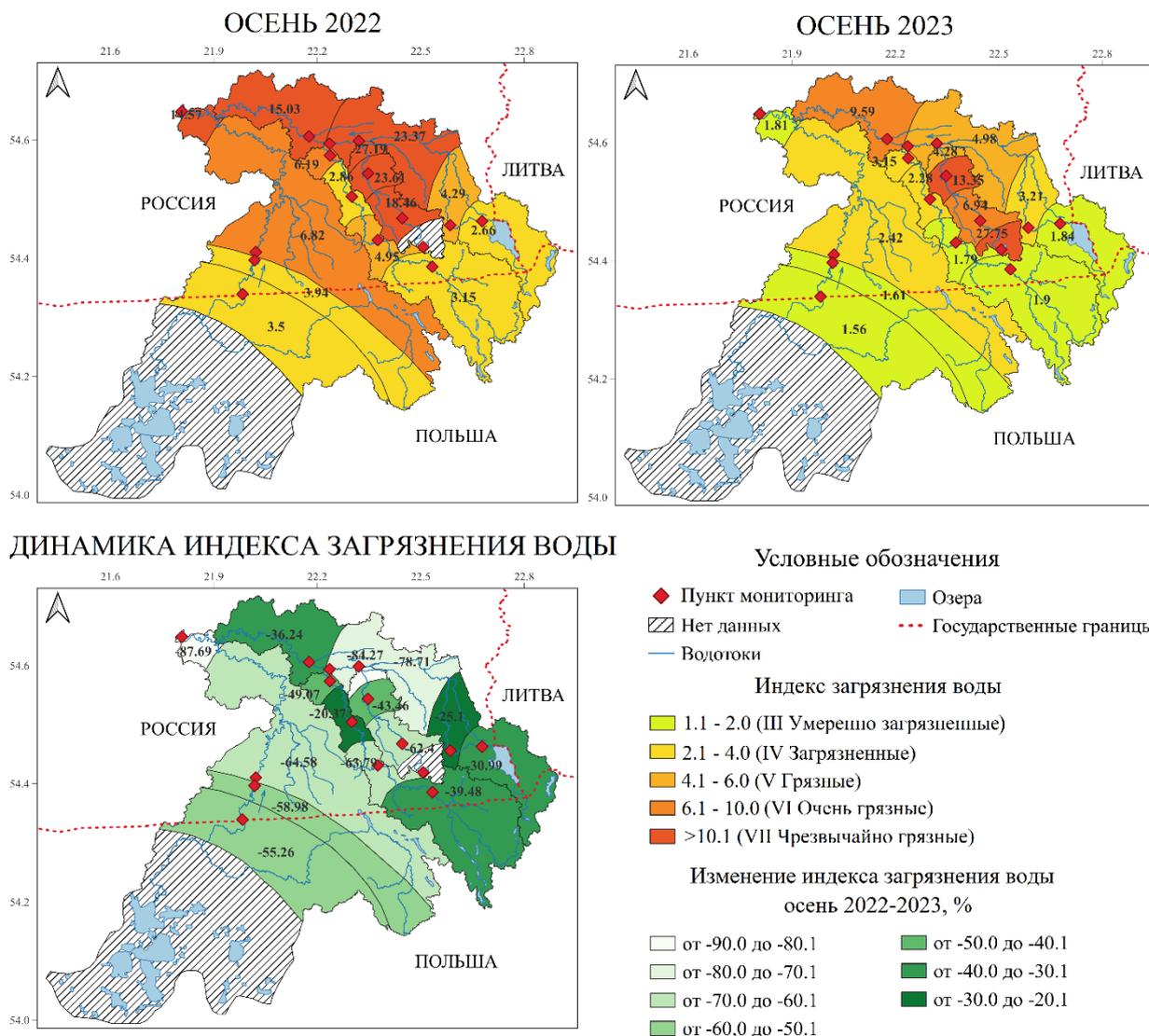


Рис. 3. Пространственно-временная дифференциация ИЗВ в бассейне р. Анграпы за осень 2022–2023 г.

Fig. 3 Spatiotemporal differentiation of WPI in the Angrapa River basin for autumn 2022–2023

Исходя из представленной информации на рис. 3, ситуация с загрязнением бассейна осенью 2023 г. улучшилась по отношению к осени 2022 г., но все еще местами достаточно напряженная. Значение ИЗВ по каждому суббассейну в среднем снизилось следующим образом: в суббассейне р. Анграпы на 5,38 единиц (66,63 %), что привело к изменению класса качества воды с VI (очень грязные) до III (умеренно загрязненные); в суббассейне р. Писсы на 6,44 единицы (42,76 %), что привело к изменению класса качества воды с VII (чрезвычайно грязные) до V (грязные); в суббассейне р. Русской на 14,90 единицы (63,38 %), что не привело к изменению класса качества воды, он остался на уровне VII (чрезвычайно грязные); в суббассейне р. Красной на 2,00 (43,17 %), что привело к изменению класса

качества воды с V (грязные) до IV (загрязненные). Одной из основных причин подобной динамики на наш взгляд является различие в водности.

В это время могут регистрироваться как меженные, так и паводковые периоды, из-за климатических особенностей и преобладания малых водотоков в регионе [Наумов, Ахмедова, 2017; Спирин, 2020; Наумов, 2022]. Осенью 2023 г. зафиксирован нетипично сильный паводок, что связано с выпадением обильных осадков. По данным метеостанции г. Черняховска из архива погоды rp5¹, в период с 01.08.2023 по 15.10.2023 выпало 323 мм осадков (из них 100 мм с 01.10.2023 по 15.10.2023). Если сравнивать эти показатели с прошлой осенью, когда в период с 01.08.2022 по 15.10.2022 выпало 117 мм осадков (из них 27 мм с 01.10.2024 по 15.10.2024), то наблюдается увеличение осадков почти в 3 раза, а по осадкам, выпавшим в первой половине октября, почти в 4 раза. Для сравнения, приблизительная климатическая норма осадков за оперативный период (1991–2020) на рассматриваемой территории составляет 190 мм. Достоверность полученных данных с rp5 была проверена путем сопоставления их с данными ВНИИГМИ-МЦД² по ближайшим к объекту исследования метеостанциям г. Советска и г. Калининграда (г. Черняховск в их системе отсутствует), что показало идентичную ситуацию с количеством выпавших осадков в аналогичный период, предшествующий осенним выездам 2022 и 2023 гг.

Но тем не менее, когда речь заходит про описание фаз водного режима рек Калининградской области, особенно относительно малых водотоков, то порой сложно выделить конкретные периоды межени, паводка и половодья. По участкам реки, на которых не проводят систематических гидрологических наблюдений, стоит проводить дальнейший анализ в рамках водности того или иного момента времени. Осенью 2023 г. водность выше, чем была прошлой осенью 2022 г., и, как следствие, уровень загрязнения снизился (рис. 4).

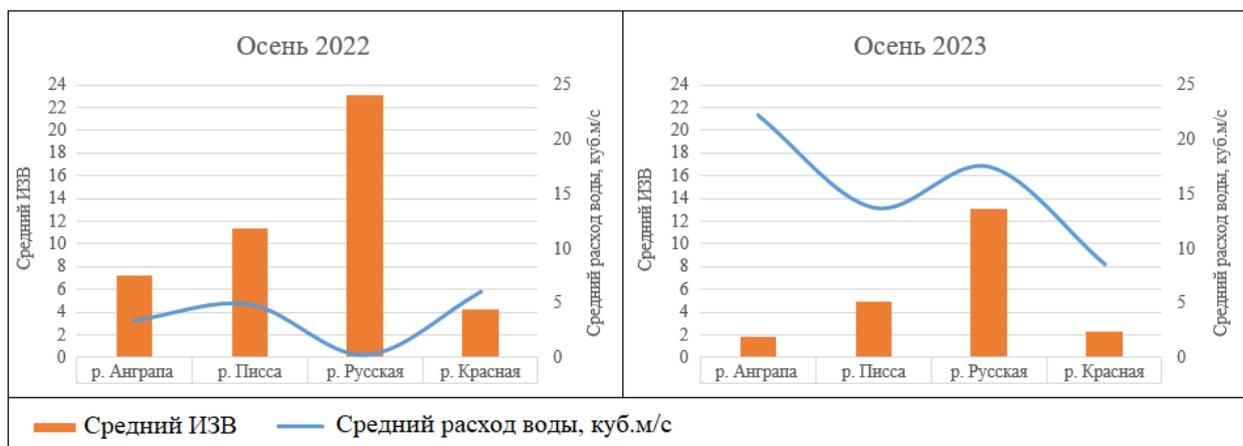


Рис. 4. Средние ИЗВ по каждой реке и средние расходы воды в реке во время пробоотбора за осень 2022–2023 г.

Fig. 4. Average WPI for each river and average water flow in the river during sampling for the fall of 2022–2023

¹ rp5.ru расписание погоды. Электронный ресурс: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Черняховске. (дата обращения 19.03.23)

² Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных. Электронный ресурс: <http://meteo.ru/data>. (дата обращения 19.03.23)

Из рис. 4 видно, как возрастающая водность приводит к уменьшению показателей ИЗВ. С ростом расхода по отдельным рекам падает ИЗВ, и наоборот, в некоторых случаях даже наблюдается зависимость между этими характеристиками, но в целом здесь пока не выстраивается устойчивая связь. Осредненные разовые расходы воды по всем пунктам увеличились с 3,68 м³/с осенью 2022 г. до 15,52 м³/с осенью 2023 г., а средний сезонный ИЗВ соответственно уменьшился с 11,49 до 5,53, что привело к улучшению класса качества воды в бассейне с VII (чрезвычайно грязные) до V (грязные). Поэтому в целом состояние бассейна р. Анграпы улучшилось, но произошло это по большей части из-за разбавления концентраций химических веществ возросшим речным стоком.

Как и в прошлом году, фиксируется классическая ситуация ухудшения качества воды от истока к устью, но со своими особенностями. Проанализируем ситуацию в каждом из суббассейнов за осень 2023 г.

В суббассейне р. Анграпы сохранилась схожая с прошлым годом пространственная динамика ИЗВ, когда между пунктами А1 и А2 разницы в показателях почти нет, а в пункте А3 по отношению к пункту А2 происходит рост ИЗВ на 50–70 %. Как и ранее, этот закономерный рост объясняется прохождением водотока через г. Озерск. Динамика индекса в реке не вызывала бы вопросов и хорошо ложилась на классическую закономерность загрязнения, если не его величина в пункте А4, которая равна 1,81. Это ниже в 8 раз, чем годом ранее, и соответствует III классу качества воды. При этом впадающая неподалеку от места отбора проб р. Писса в пункте П4 имела ИЗВ, равный 9,59. В другие сезоны мы также отмечали, что пункт А4 почти всегда чище предшествующего ему пункта А3, как в принципе наблюдается и сейчас, но это фиксировалось с тем условием, что в пункте П4 показатели также находятся в схожих значениях, а это в данном случае не так. Рассматриваемая локация является устьевой частью всего бассейна, здесь располагается г. Черняховск, поэтому такие результаты не совсем укладываются в стандартную картину загрязнения. Расходы здесь не сильно отличаются от А1–А3 и П1–П4. Есть вероятность того, что в данном предустьевом участке происходит активный водообмен между р. Анграпой и более крупной р. Преголей, которая потенциально может иметь более высокое качество воды. Для более детального анализа ситуации требуются дальнейшие наблюдения.

Суббассейн р. Русской по аналогии с прошлым годом, да и с другими сезонами, остался самым загрязненным. Но и здесь фиксируется не совсем однозначная динамика загрязнения воды. В верховье р. Русской, где расположен пункт Р1, в этот раз отмечен самый высокий за все 5 выездов ИЗВ, равный 27,75, и это несмотря на высокую водность данного сезона. Далее, в пункте Р2, индекс уменьшается до 6,94, что отчасти объясняется возросшим в 4 раза расходом воды. Потом, когда водоток достигнет пункта Р3, показатель загрязнения возрастает до 13,35, а в устьевой части, где расположился пункт Р4, он опускается до 4,28. Как и в случае с р. Анграпой, есть вероятность того, что вода из более чистой в данном секторе р. Писсы (об этом можно судить по данным П3–П4) смешалась с водой из Р4. Летом 2023 г. была отмечена схожая пространственная тенденция, но выделить закономерность, опираясь лишь на 2 случая, не представляется возможным.

В суббассейнах р. Красной и р. Писсы в этом сезоне наблюдается постепенное ухудшение качества воды от истока к устью без дополнительных особенностей, которые присутствовали прошлой осенью. В границах парка Виштынецкого качество воды высокое, и оно начинает ухудшаться по мере того, как реки проходят через урбанизированные и сельскохозяйственные территории. Если выражать пространственную изменчивость в числах, то от пункта К1 до пункта К4 ИЗВ увеличился в 1,67 раз, а от пункта П1 до пункта П4 — в 5,21 раза. Это привело к падению класса качества воды вдоль р. Красной с III

(умеренно загрязненные) до IV (загрязненные), а для р. Писсы — с III (умеренно загрязненные) до VI (очень грязные).

С целью детализации ситуации с загрязнениями была построена пространственная дифференциация основных показателей, которые легли в основу почти каждого расчета индекса загрязнения воды. Для этого построены картосхемы пространственного распределения кратности превышения ПДК по ним (рис. 5). Помимо этого, для понимания динамики изменения концентраций тех или иных веществ рассчитаны отклонения результатов измерения гидрохимических показателей осени 2023 г. относительно осени 2022 г. (табл. 5).

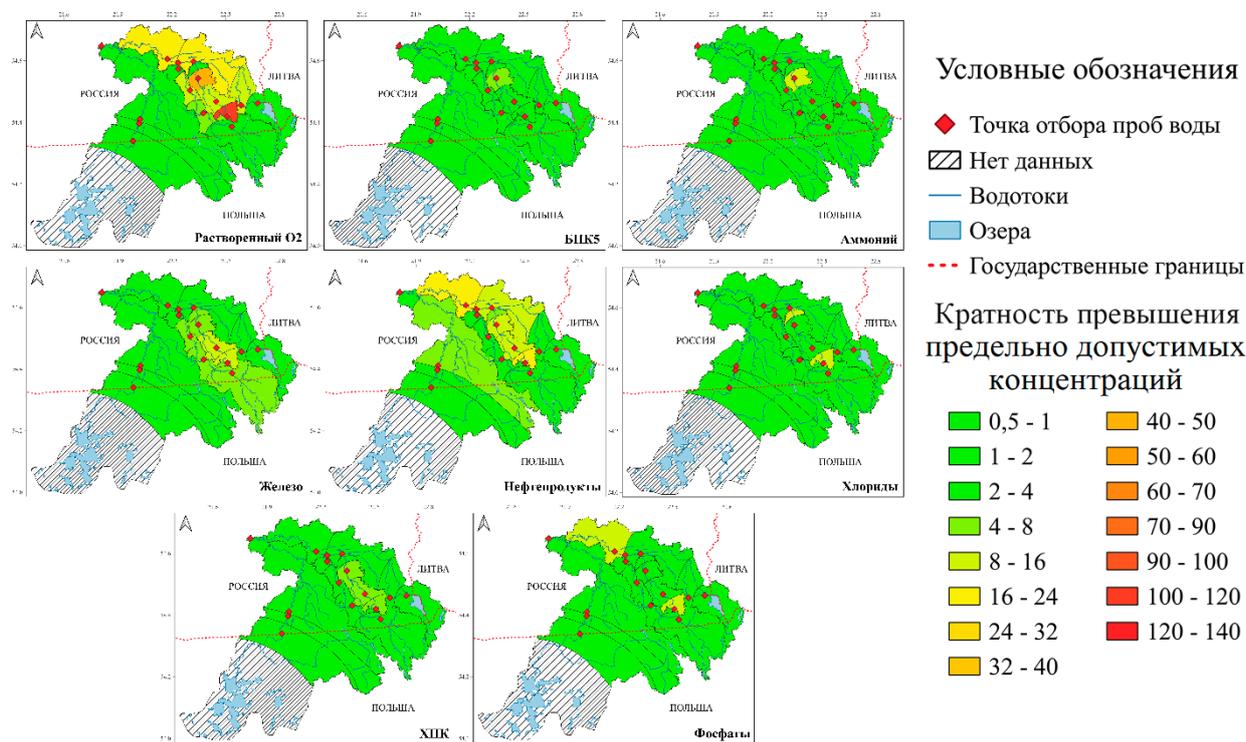


Рис. 5. Картосхемы пространственного распределения кратности превышения ПДК в бассейне р. Ангары по отдельным веществам за осень 2023 г.

Fig. 5. Maps of the spatial distribution of the multiplicity of exceeding the MPC in the Angara River basin for individual substances for autumn 2023

При сравнении загрязненности осени 2023 г. с осенью 2022 г., можно видеть ее снижение и небольшие изменения в перечне показателей, превышающих ПДК. Некоторые отмеченные загрязнители сильно выбиваются из общей гидрохимической характеристики всего бассейна и присущи лишь отдельным суббассейнам или их частям.

Например, превышения ПДК по хлоридам обнаружены по пунктам P1 (8,15 р.), P2 (2,43 р.) и P4 (12,34 р.), но при этом в пункте P3 (0,53 р.) превышений нет. По отношению к 2022 г. в пунктах P2 и P4 прирост по этому показателю составил 3233 % и 4857 %, соответственно. Причиной загрязнения в этих локациях мог послужить хлористый калий из удобрений, на это также указывает и небольшая синхронность колебаний между значениями хлоридов и калия. В суббассейне р. Русской по пяти сезонам коэффициент

парной корреляции Пирсона между ними составил 0,51, что косвенно может указывать на подобный вид загрязнения, но в то же время быть следствием и других процессов. К сожалению, сказанное не объясняет в полной мере причины сложившегося пространственного распределения вещества по мере течения реки, а источник их возникновения не более, чем гипотеза. Следует упомянуть, что в рассматриваемом сезоне рост хлоридов прослеживается почти по всем пунктам, но остается в пределах нормы.

Примерно то же самое можно сказать и про фосфаты, где превышения зафиксированы в пункте П4 (13,83 р.), Р1 (8,26 р.) и Р2 (3,80 р.). Но здесь несколько больше понимания пространственной изменчивости, т. к. в П4 это конечная точка водотока, и здесь мог быть разовый выброс, также как и в Р1, и он вниз по течению водотока разбавился. По остальным пунктам распределение концентраций идет более равномерно, как и в прошлом году. В целом они существенно уменьшились, за исключением ранее описанных пунктов и суббассейна р. Анграпы, где либо не было изменений, либо присутствует рост по пунктам А1 и А4, который привел к незначительному превышению 1,98 и 1,26.

Уровень нитритов и аммония также заметно снизился на всей территории бассейна р. Анграпы, и они теперь в норме или имеют незначительные превышения, кроме пункта Р3, где превышения по этим показателям составили 3,31 раз и 10,18 раз, а рост по отношению к прошлому сезону — 2551 % и 51 %. Нитраты хоть и возросли по всему бассейну в диапазоне 161–3187 %, но не превысили отметку ПДК.

Высокие концентрации ХПК выделяются в точках П4 (2,37), Р1 (5,21), Р2 (6,82), Р3 (4,67). Прирост по имеющимся данным следующий: П4 (282 %), Р2 (675 %) и Р3 (79 %). Во время отбора проб были отмечены неоднократные случаи мойки автотранспорта у реки. Моющие средства и содержащиеся в них жиры могут провоцировать рост ХПК. Помимо этого, моющие средства могут попадать и из источников городской и сельскохозяйственной среды, но проследить здесь системность все еще нельзя.

Остальные загрязнители, отнесенные к основным, совпадают с осенью 2022 г., с тем отличием, что они уменьшились на большей части бассейна в своем численном выражении (табл. 4). Данные загрязнители перманентные, прослеживаются в течение всех сезонов в большей или меньшей степени. Также они имеют отчетливое пространственное распределение, где наибольшему воздействию подвержены устьевые части водотоков, а наименьшим — их верховья и лесные территории. Показателями, которые в своей массе и задают тренд на класс качества воды, выступили нефтепродукты, железо, БПК₅, несоответствие норм ПДК по растворенному кислороду.

Главные загрязнители, вносящие наибольший негативный вклад в качество воды — это нефтепродукты и железо. Резкие изменения концентраций нефтепродуктов обусловлены антропогенным фактором и происходят после прохождения водотоками крупных по меркам района исследования населенных пунктов: гг. Черняховска, Озерска, Гусева. В меньшей степени водотоки загрязнены железом, что обусловлено высокими концентрациями этого вещества в подземных водах, питающих реки [Глуценко, 2008; Валл, Ахмедова, 2021]. Это может считаться в какой-то мере естественным фоном, но его численное выражение требует отдельной проработки. Как следствие, общего гидрохимического состояния бассейна и местами достаточно развитой флоре, которая в это время гибнет и окисляется, присутствует несоответствие норм ПДК по растворенному кислороду и БПК₅.

Table 5. Deviations in the results of measuring hydrochemical indicators in autumn 2023 relative to autumn 2022, %

Водотоки	Река Анграпа				Река Писса				Река Русская				Река Красная			
	A1	A2	A3	A4	П1	П2	П3	П4	P1	P2	P3	P4	K1	K2	K3	K4
Пункты отбора	A1	A2	A3	A4	П1	П2	П3	П4	P1	P2	P3	P4	K1	K2	K3	K4
рН	-5	11	10	4	-1	1	5	4	-	-11	-8	11	-3	-4	-5	0
Раств. O ₂	35	29	40	24	-22	-59	-65	-68	-	3	-69	259	58	-8	-29	-61
ХПК	46	13	-62	84	-13	-40	12	282	-	675	79	-5	-21	-40	-3	-31
БПК ₅	-84	-57	-24	-65	-78	-98	-12	-13	-	-70	-43	-85	-11	-17	43	-64
Нитраты	674	1175	161	195	-2	894	9	758	-	537	3187	526	225	333	18	259
Нитриты	-100	-99	-99	-97	-90	-100	-99	-99	-	-90	2550	-90	-99	-90	-90	-51
Аммоний	-83	-94	-92	-92	-81	-95	-93	-35	-	-94	51	-96	-95	-69	-89	-95
Фосфаты	482	12	-25	425	15	-94	-80	753	-	228	-94	-73	-92	-99	-97	-89
Хлориды	-67	275	228	14	-6	950	57	547	-	-30	3233	4857	75	124	-25	65
Сульфаты	60	97	93	8	-10	-19	63	94	-	80	38	26	95	-26	-20	-14
Натрий	418	201	88	166	387	81	81	436	-	15	212	266	-18	34	466	25
Магний	44	79	45	112	84	55	39	208	-	20	14	34	-10	36	75	21
Железо	20	-42	-79	-71	12	-72	-85	-87	-	-74	-89	-85	-35	-32	-43	-59
Нефт. п.	-71	-77	-74	-95	-28	29	-93	-71	-	-75	-86	-94	-71	-86	-61	-92
Калий	36	55	43	60	86	109	79	77	-	43	738	8	88	10	-47	14
Кальций	23	48	19	79	88	31	17	221	-	14	-13	20	-32	44	40	6

ВЫВОДЫ

Осенью 2023 г. по пунктам мониторинга класс качества воды характеризуется следующим образом: умеренно загрязненные (А1-А2-А4-П1-К1-К2), загрязненные (А3-П2-К3-К4), грязные (П3-Р4), очень грязные (П4-Р2), чрезвычайно грязные (Р1-Р3). Общая картина загрязнения (за исключением некоторых нюансов) складывается традиционным образом — качество воды от истока к устью ухудшается. Самый загрязненный водоток — р. Русская со средним ИЗВ = 13,08, самый чистый — р. Красная со средним ИЗВ = 2,28. Хотя по величине данного параметра р. Красная и уступает р. Анграпе со средним ИЗВ = 1,85, но в ней загрязнения коррелируют с периодом отмирания растительности, в результате которого высвобождаются аккумулярованные ей вещества, что приводит к загрязнению [Tang et al., 2013; Xiong, 2019]. Стоит отметить, что осень как раз и относится к таким периодам, поэтому речь может идти об естественном фоне.

Улучшение ситуации с загрязнениями осени 2023 г. по отношению к осени 2022 г. связаны с увеличением водности рассматриваемого года. Средний сезонный моментальный расход по всем пунктам увеличился с 3,68 м³/с до 15,52 м³/с (321 %), а средний сезонный ИЗВ соответственно уменьшился с 11,49 до 5,53 (108 %), что привело к улучшению класса качества воды в бассейне с VII (чрезвычайно грязные) до V (грязные).

Резкому росту концентраций загрязняющих веществ теоретически способствуют расположенные вдоль русел рек города. На объекте исследования таких городов три: Черняховск, Озерск, Гусев. Также одним из потенциальных загрязнителей можно считать сельскохозяйственный сектор, но даже спустя 5 сезонов сложно увязать этот вид деятельности с загрязнениями. Этого нельзя сказать про природные циклы водной и береговой растительности, которая приводит к повышению концентрации биогенов, БПК₅ и несоответствию нормам ПДК по растворенному кислороду, в частности на участках суббассейнов, находящихся на территории парка Виштынецкий.

В качестве основных загрязнителей осенью 2023 г. выделены: нефтепродукты, кратность превышения ПДК которых колеблется в диапазоне от 1,40 до 22,80 (по 15 из 16 проб); железо, кратность превышения ПДК которых колеблется в диапазоне от 1,08 до 9,16 (по всем пробам); БПК₅, кратность превышения ПДК которых колеблется в диапазоне от 1,05 до 5,19 (по 11 из 16 проб); растворенный кислород, кратность превышения ПДК которых колеблется в диапазоне от 2,10 до 117,65 (по 9 из 16 проб). Другие загрязнители оказывают влияние на конкретные суббассейны или их участки и не так широко распространены этой осенью по всему бассейну. К ним относятся: аммоний, хлориды, фосфаты и ХПК. Влиянию этих элементов по большей части подвергся суббассейн реки Русской и пункт мониторинга П4 в р. Писсе. Значительно снизились загрязнения нитритами и аммонием, которые фиксировались в предыдущем году. Если отбросить сильный рост в пункте Р3, то среднее по бассейну снижение будет 89,1 % для нитритов и 85,9 % для аммония.

БЛАГОДАРНОСТИ

Картографирование и работа с ГИС выполнены в Институте географии РАН в рамках государственного задания № FMWS-2024-0007.

ACKNOWLEDGMENTS

Mapping and work with GIS were carried out at the Institute of Geography, Russian Academy of Sciences within the framework of state assignment No. FMWS-2024-0007.

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. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-4-1-83-89.
- 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.
- Глушченко А. И.* Экологическое состояние и качество подземных вод Калининградского скважинного водозабора. Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки, 2008. № 1. С. 28.
- Джамалов Р. Г., Мироненко А. А., Мягкова К. Г., Решетняк О. С., Сафронова Т. И.* Пространственно-временной анализ гидрохимического состава и загрязнения вод в бассейне Северной Двины. Водные ресурсы, 2019. Т. 46. № 2. С. 149–160. DOI: 10.31857/S0321-0596462149-160.
- Ермолаев О. П., Мальцев К. А., Мухарамова С. С., Хомяков П. В.* 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., 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. DOI: 10.17072/2079-7877-2021-3-92-106.
- Зотов С. И., Спирин Ю. А.* Оценка геоэкологического состояния малых водотоков польдерных земель: методический подход и картографическое обеспечение. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф., 2022. Т. 28. Ч. 2. С. 597–613. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-597-613.
- Нагорнова Н. Н.* Геоэкологическая оценка состояния малых водотоков Калининградской области: дис. ... 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. Сер.: 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 году. 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. 183 с.
- Спирин Ю. А., Зотов С. И., Таран В. С., Королева Ю. В.* Оценка пространственных особенностей загрязнения рек Юго-Восточной части Калининградской области. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф., 2023. Т. 29. Ч. 1. С. 186–200. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-186-200.

Спирин Ю. А. Анализ внутригодового распределения стока рек Славского района Калининградской области. Региональные геосистемы, 2020. Т. 44, № 2. С. 231–242. DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-2-231-242.

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. DOI: 10.18500/1819-7663-2018-18-2-104-109.

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. DOI: 10.1007/s40710-021-00530-2.

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.

Tang J. Y., Cao P. P., Xu C., Liu M. S. Effects of aquatic plants during their decay and decomposition on water quality. Ying Yong Sheng Tai Xue Bao. 2013. V. 24 (1). P. 83–90.

Xiong H. Study on the release of carbon, nitrogen and phosphorus from the decomposition of aquatic plants. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. V. 384. P. 1–4. DOI: 10.1088/1755-1315/384/1/012093.

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 catchment solution for solving the problem of flow fraud modeling. Interexpo GEO-Siberia, 2019. V. 4. No. 1. P. 83–89 (in Russian). DOI: 10.33764/2618-981X-2019-4-1-83-89.

Chumachenko A. N., Khvorostukhin D. P., Morozova V. A. Building a hydrologically correct digital terrain model (on the territory of the Saratov region). Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences, 2018. V. 18. No. 2. P. 104–109 (in Russian). DOI: 10.18500/1819-7663-2018-18-2-104-109.

Dzhamalov R. G., Mironenko A. A., Myagkova K. G., Reshetnyak O. S., Safronova T. I. Spatio-temporal analysis of the hydrochemical composition and pollution of water in the Northern Dvina basin. Water Resources, 2019. V. 46. No. 2. P. 149–160 (in Russian). DOI: 10.31857/S0321-0596462149-160.

Ermolaev O. P., Maltsev K. A., Mukharamova S. S., Khomyakov P. V. Cartographic model of basin geosystems of small rivers in the catchment area of the Lena River. Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki (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. Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University Series: Natural and medical sciences, 2008. No. 1. P. 28 (in Russian).

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. DOI: 10.1007/s40710-021-00530-2.

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.

- Nagornova N. N.* Geoecological assessment of the state of shallow watercourses in the Kaliningrad region: dis. ... PhD in Geography. Kaliningrad, 2012. P. 8–19 (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 Prokhladnaya River. RUDN Journal of Ecology and Life Safety, 2014. No. 4. P. 70–77 (in Russian).
- Nagornova N. N., Bernikova T. A., Tsupikova N. A.* Hydrogeochemical characteristics of macro-rivers of the Kaliningrad region. Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and medical sciences, 2011. No. 7. P. 160–166 (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).
- Spirin Yu. A., Zotov S. I., Taran V. S., Koroleva Yu. V.* Assessment of spatial features of river pollution in the South-Eastern part of the Kaliningrad region. InterCarto. InterGIS, 2023. V. 29. Part 1. P. 186–200. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-186-200 (in Russian).
- Spirin Yu. A.* Analysis of the intra-annual distribution of river flow in the Slavsky district of the Kaliningrad region. Regional Geosystems, 2020. V. 44. No. 2. P. 231–242 (in Russian). DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-2-231-242.
- Tang J. Y., Cao P. P., Xu C., Liu M. S.* Effects of aquatic plants during their decay and decomposition on water quality. Ying Yong Sheng Tai Xue Bao, 2013. V. 24 (1). P. 83–90.
- Xiong H.* Study on the release of carbon, nitrogen and phosphorus from the decomposition of aquatic plants. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. V. 384. P. 1–4. DOI: 10.1088/1755-1315/384/1/012093.
- 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. 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). DOI: 10.17072/2079-7877-2021-3-92-106.
- 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. Part 2. P. 597–613 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-597-613.
-

УДК: 911.3:30

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-128-144

А. Н. Огурцов¹, В. В. Дмитриев², Н. В. Каледин³

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ РОЛИ СОЦИАЛЬНЫХ ДЕТЕРМИНАНТ ОБЩЕСТВЕННОГО ЗДОРОВЬЯ В РАСПРОСТРАНЕНИИ COVID-19 В СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ

АННОТАЦИЯ

В настоящее время по инфекционным заболеваниям в России сохраняется стабильная эпидемиологическая обстановка, но проблемы, связанные с распространением новой коронавирусной инфекции COVID-19, по-прежнему остаются актуальными. Особое внимание уделяется анализу пространственных аспектов социального неравенства и его влиянию на общественное здоровье, а также изучению изменчивости заболеваемости COVID-19. Цель исследования состояла в проведении интегральной оценки социальных детерминант общественного здоровья населения на региональном уровне и выявлении их роли в пространственно-временной изменчивости заболеваемости коронавирусной инфекцией. Исследование основано на опыте предыдущих работ и охватывает территорию 11 субъектов Российской Федерации, входящих в состав Северо-Западного федерального округа. Временные рамки исследования ограничены тремя годами распространения инфекции с 2020 по 2022 гг. Авторами была собрана и систематизирована информация по каждому региону о заболеваемости COVID-19 и по четырем группам социальных факторов. В качестве интегрального критерия оценки предложен композитный показатель (КП). Композитный показатель характеризует состояние общественного здоровья с точки зрения социальных детерминантов и их роли в пространственной изменчивости заболеваемости. В качестве основного метода используется моделирование аддитивной свертки критериев на принципах АСПИД-методологии. В работе предложена двухуровневая иерархическая модель оценки регионов. Статья содержит результаты трех сценариев интегральной оценки состояния социальных детерминант здоровья для регионов СЗФО РФ. В исследовании были выявлены пространственные тенденции развития COVID-19 в округе, а также повышение уровня заболеваемости населения за последние три года. Анализ и оценка влияния различных социальных факторов на пространственную изменчивость заболевания коронавирусной инфекцией подтвердили ранее сделанные авторами выводы о том, что весомость социальных детерминант, влияющих на COVID-19, изменяется с течением времени и в пространстве. Результаты корреляционного анализа подтверждают наличие отрицательной корреляционной связи между композитными показателями на каждом из иерархических уровней и уровнем заболеваемости COVID-19. Отмечается, что характер корреляционных связей композитного показателя с уровнем заболеваемости сильно варьируется не только от одной оценочной группы критериев к другой, но и на временном интервале.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: социальные детерминанты, интегральная оценка, COVID-19, регионы, АСПИД, ГИС

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, 10-я линия Васильевского острова, д. 33-35, Санкт-Петербург, Россия, 199178, e-mail: aogurcov@yandex.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: v.dmitriev@spbu.ru

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, 10-я линия Васильевского острова, д. 33-35, Санкт-Петербург, Россия, 199178, e-mail: n.kaledin@spbu.ru

Aleksandr N. Ogurtsov¹, Vasiliy V. Dmitriev², Nikolay V. Kaledin³

SPATIO-TEMPORAL ANALYSIS OF THE ROLE OF SOCIAL DETERMINANTS OF PUBLIC HEALTH IN THE SPREAD OF COVID-19 IN THE NORTHWESTERN FEDERAL DISTRICT

ABSTRACT

Currently, the epidemiological situation for infectious diseases in Russia remains stable, but the problems associated with the spread of the new coronavirus infection COVID-19 remain relevant. Special attention is paid to the analysis of spatial aspects of social inequality and its impact on public health, as well as to the study of the variability of the incidence of COVID-19. The aim of the study was to conduct an integrated assessment of the social determinants of public health at the regional level and identify their role in the spatial and temporal variability of the incidence of coronavirus infection. The study is based on the experience of previous work and covers the territory of 11 constituent entities of the Russian Federation that are part of the Northwestern Federal District. The time frame of the study is limited to three years of infection spread from 2020 to 2022. The authors collected and systematized information on the incidence of COVID-19 in each region and on four groups of social factors. A composite indicator (KP) is proposed as an integral evaluation criterion. The composite indicator characterizes the state of public health in terms of social determinants and their role in the spatial variability of morbidity. Modeling of additive convolution of criteria based on the principles of the ASPID methodology is used as the main method. The paper proposes a two-level hierarchical model for assessing regions. The article contains the results of three scenarios of an integrated assessment of the state of social determinants of health for the regions of the Northwestern Federal District of the Russian Federation. The study revealed spatial trends in the development of COVID-19 in the district, as well as an increase in the incidence of the population over the past three years. The analysis and assessment of the influence of various social factors on the spatial variability of coronavirus infection confirmed the conclusions previously made by the authors that the weight of the social determinants affecting COVID-19 changes over time and in space. The results of the correlation analysis confirm the presence of a negative correlation between composite indicators at each of the hierarchical levels and the incidence of COVID-19. It is noted that the nature of correlations between the composite indicator and the incidence rate varies greatly not only from one evaluation group of criteria to another, but also over a time interval.

KEYWORDS: social determinants, integral assessment, COVID-19, regions, ASPID, GIS

ВВЕДЕНИЕ

Пандемия COVID-19 затронула население стран по всему миру. Масштабы и непредсказуемый рост пандемии вынудили правительства большинства стран ввести различные ограничительные меры для предотвращения быстрого распространения инфекции. Это вызвало повышенный интерес к оценке и анализу социальных детерминантов, связанных с проблемой социального неравенства в отношении здоровья. Мониторинг публикаций

¹ Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 33-35, 10th line of Vasil'evsky island, St. Petersburg, 199178, Russia, *e-mail:* aogurcov@yandex.ru

² Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 33-35, 10th line of Vasil'evsky island, St. Petersburg, 199178, Russia, *e-mail:* v.dmitriev@spbu.ru

³ Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 33-35, 10th line of Vasil'evsky island, St. Petersburg, 199178, Russia, *e-mail:* n.kaledin@spbu.ru

в базе данных ScienceDirect показал, что количество статей с терминами «conditioning factors» и «spreading of COVID-19» постоянно растет. В настоящее время количество статей превышает 22 700 ед. и продолжает увеличиваться. Результаты мониторинга представлены на рис. 1.

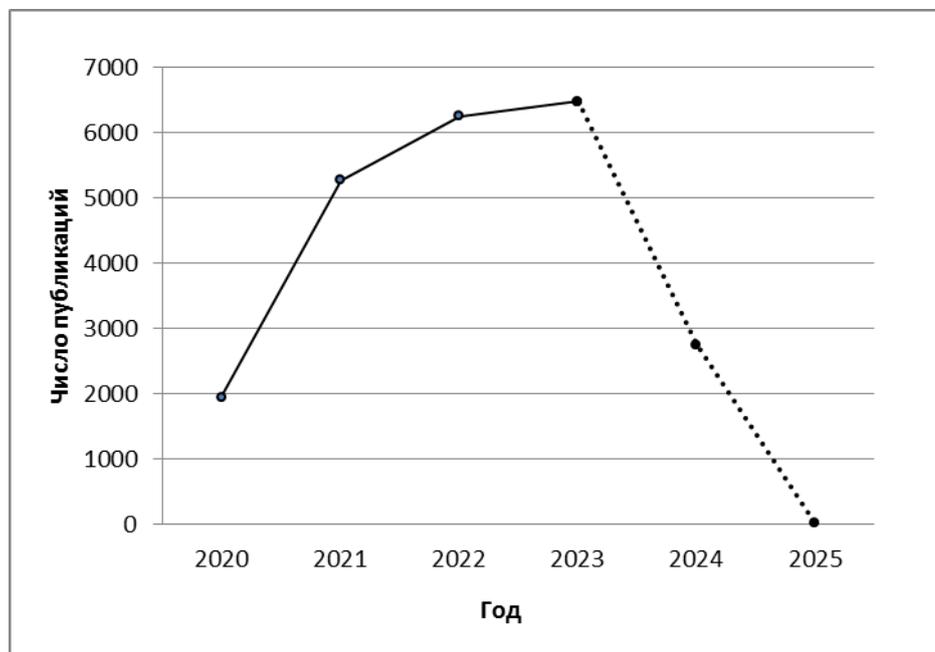


Рис. 1. Распределение публикаций по тематике распространения коронавирусной инфекции

Fig. 1. Distribution of publications on the topic of the spread of coronavirus infection

В настоящее время бесспорным фактом является то, что наряду со сложным и многофакторным характером инфекции, территориальные особенности играют важную роль в неравномерной дифференциации заболеваемости COVID-19 [Vandelli et al., 2024]. В рамках одного из последних исследований [Coker et al., 2023] была дана оценка многомерной взаимосвязи между факторами окружающей среды, социальными детерминантами здоровья и уровнем заболеваемости с тяжелым исходом. Авторы объяснили наблюдаемую значительную пространственную неоднородность исходов COVID-19 высоким уровнем множественных загрязнителей воздуха в сочетании с демографическими показателями и более низкими доходами. По общему мнению других авторов [Gizamba et al., 2023] в обширном перечне опубликованных к настоящему времени работ наибольшее внимание уделяется изучению факторов социальной направленности, что может говорить об их актуальности. Аналогичного мнения придерживается А. В. Лядова [2021], которая связывает различия в уровнях заболеваемости и смертности с проблемой социального неравенства. Кроме того, авторы отмечают как недостаток малое число проведенных многоуровневых исследований с использованием многомерных геопространственных подходов в исследовании распространения коронавирусной инфекции.

В целом в контексте понимания пространственно-временной динамики эпидемии в публикациях нашли отражение вопросы отношения между работой и жильем [Chen et al., 2023]. Другие авторы [Cabrera-Barona et al., 2023] нашли объяснения причин пространственных различий заболеваемости COVID-19 наряду с гендерными и демографическими различиями в важности общественного пространства, поддержке соседей и безопасности, а

исследовательская группа из Индии [Jana et al., 2023] получила данные, подтверждающие роль экологических детерминант окружающей среды в распространении COVID-19. В исследовании был отмечен пространственный сдвиг кластеров заболеваемости, связанный с загрязнением воздуха. Однако одним из недостатков работы было отсутствие данных социально-экономического и демографического характера. В другом исследовании [Zhuo, Harrigan, 2023] отмечается важность роли уровня образования в вопросе изменчивости распространения заболеваемости и летальности COVID-19. Авторы приводят доказательства прямой корреляции уровня образования с летальными исходами от COVID-19. Для наглядности они представляют данные по летальности COVID-19 в федеральных округах США с высоким и низким уровнем образования. По их мнению, полученные результаты не только согласуются с выводами других исследований, но и расширяют их.

Исследование [Панин и др., 2021] пространственных закономерностей распространения COVID-19 в России позволило увязать географию эпидемии с логистическими, социально-экономическими и центрo-периферийными факторами.

Несмотря на большой поток информации, некоторые авторы [Фомин и др., 2023] считают уровень изученности детерминант здоровья в условиях пандемии недостаточным для выявления роли различных факторов в изменчивости уровня заболеваемости COVID-19¹. Авторы постарались исправить этот, по их мнению, недостаток, предложив многокомпонентную информационную модель, включив в нее 37 детерминант здоровья, структурированных в 5 смысловых групп. В ходе исследования ими выявлены разнонаправленные изменения в состоянии здоровья населения в условиях пандемии COVID-19 и дана оценка влияния детерминант здоровья на эти изменения.

Другая научная группа [Васильева и др., 2023] в рамках исследования результативности государственной региональной политики в Российской Федерации в пандемический кризис провела анализ и оценку состояния общественного здоровья с использованием индекса общественного здоровья (ИОЗ). Проведенный анализ позволил по величине ИОЗ ранжировать субъекты РФ по состоянию общественного здоровья. По выводам авторов, в большинстве регионов (за небольшим исключением) показатели общественного здоровья ухудшились. Ряд авторов [Lee, Ramirez, 2022] в рамках синдемической парадигмы выявили связь между географическими особенностями распространения COVID-19 и социальными детерминантами. Они использовали геоинформационные технологии для оценки показателей заболеваемости COVID-19 в разных районах штата Колорадо (США) и сравнили их с составными индексами, отражающими социальную уязвимость и проблемы в здравоохранении.

Несмотря на то, что период высокой заболеваемости COVID-19 завершился, вопросы, связанные с этой инфекцией, остаются актуальными. В 2022 г. в Северо-Западном федеральном округе наблюдался максимальный рост заболеваемости COVID-19 в четырех субъектах Российской Федерации: Санкт-Петербурге, Архангельской области, Республике Коми и Республике Карелии.

Цель исследования — интегральная оценка социальных детерминант общественного здоровья населения на региональном уровне и определение их роли в пространственно-временной изменчивости заболеваемости коронавирусной инфекцией.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование основано на опыте предыдущих работ по интегральной оценке социальных детерминант здоровья населения регионов Крайнего Севера европейской части Российской Федерации [Огурцов, Дмитриев, 2019] и исследований по интегральной оценке

¹ Трудно согласиться с таким выводом, поскольку авторы опирались в основном на русскоязычный сегмент научных публикаций

социальных детерминант общественного здоровья населения муниципальных образований [Огурцов, Дмитриев, 2020] и пространственных особенностей неравенства социальных условий в контексте пандемии коронавирусной инфекции [Огурцов, Дмитриев, 2023]. Исследование проводилось на территории 11 субъектов Российской Федерации, входящих в состав Северо-Западного федерального округа. Временные рамки исследования охватывают период с 2020 по 2022 гг., что связано с наличием сопоставимых данных. В работе использовались данные Роспотребнадзора о количестве случаев заболевания COVID-19 за каждый год. Чтобы сравнить уровень заболеваемости коронавирусом в разных регионах, мы перевели исходные данные в коэффициенты заболеваемости. Для этого было выполнено деление количества заболевших за год на численность населения региона и перевод результатов заболеваемости в расчете на 1 000 чел.

Для интегральной оценки социальных детерминант общественного здоровья мы использовали данные на уровне субъектов РФ из различных источников, включая Росстат и Минприроды России. В итоге для интегральной оценки были отобраны 23 характеристики, которые вошли в четыре оценочные группы. Перечень групп и характеристик, влияющих на уровень неравенства социальных условий и заболеваемости COVID-19, представлен в табл. 1.

ГИС-технология была использована для пространственного анализа и картирования уровня заболеваемости и неравенства социальных условий в отношении общественного здоровья.

В условиях многофакторного влияния окружающей среды на заболеваемость COVID-19 исследователи вынуждены прибегать к использованию методов интегральной оценки на основе агрегирования данных и построению модельных индексов, таких как:

- индекс общественного здоровья [Васильева и др., 2023];
- композитный индекс социальной уязвимости [Lee, Ramírez, 2022];
- комплексный показатель оценки воздействия пандемии (PACI) [Figueira et al., 2023] и многих других.

В нашем случае мы используем для построения композитного показателя метод рандомизированных сводных показателей (АСПИД-метод), описанный в работе Н. В. Хованова [1996]. В качестве синтезирующей функции используется линейная аддитивная модель вида (1):

$$Q^{(j)}(q, w) = \sum_{i=1}^m q_i^{(j)} w_i \quad (1),$$

где $Q^{(j)}$ — композитный показатель социальных условий j -го региона,
 $q_i^{(j)}$ — отдельный (нормированный) показатель, характеризующий благоприятность социальных условий для здоровья населения j -го региона с точки зрения величины i -го критерия.

Показатель $q_i^{(j)}$ является функцией социальных детерминант здоровья, а его важность характеризуется весовым коэффициентом (w_i) i -го отдельного показателя. При расчете отдельных показателей используются нормирующие функции, что позволяет привести их к единой оценочной шкале от 0 до 1.

Табл. 1. Перечень исходных характеристик и весовых коэффициентов
 Table 1. List of initial characteristics and weight coefficients

Оценочная группа	Характеристика оценки	Год		
		2020	2021	2022
		Весовые коэффициенты		
Группа 1	Коэффициент напряженности на рынке труда	0,394	0,719	0,906
	Совокупный показатель уровня безработицы и потенциальной рабочей силы населения в возрасте 15+ лет	0,101	0,018	0,056
	Доля численности населения с денежными доходами ниже границы бедности	0,368	0,042	0,006
	Дефицит денежного дохода	0,053	0,050	0,013
	Децильный коэффициент	0,021	0,061	0,013
	Удельный вес расходов домашних хозяйств на оплату жилищно-коммунальных услуг	0,020	0,080	0,000
	Доля расходов на покупку продуктов питания в потребительских расходах	0,044	0,029	0,006
Группа 2	Доля граждан, ежегодно проходящих профилактический медицинский осмотр и (или) диспансеризацию, в общей численности населения	0,790	0,225	0,025
	Количество (доля) граждан, ведущих здоровый образ жизни (процент)	0,050	0,000	0,550
	Укомплектованность медицинских организаций, оказывающих медицинскую помощь в амбулаторных условиях, врачами	0,061	0,075	0,350
	Обеспеченность больничными койками на 10 тыс. населения	0,006	0,025	0,000
	Мощность амбулаторно-поликлинических учреждений, посещений в смену на 10 тыс. населения	0,032	0,075	0,000
	Доля детей первой и второй групп здоровья в общей численности обучающихся в общеобразовательных учреждениях	0,060	0,600	0,075
Группа 3	Валовой коэффициент охвата дошкольным образованием, в процентах от численности детей в возрасте 1–6 лет	0,049	0,000	0,000
	Обеспеченность детей дошкольного возраста местами из расчета — число мест на 1 000 детей	0,099	0,000	0,000
	Доступность дошкольного образования	0,159	0,025	0,500
	Доля учителей с минимальной требуемой квалификацией в начальных классах	0,694	0,975	0,500
Группа 4	Количество преступлений, зарегистрированных в отчетном периоде (единица на 1 000 чел.)	0,209	0,104	0,044
	Доля несовершеннолетних участников преступлений от численности детского населения в возрасте от 14 до 17 лет	0,031	0,333	0,185
	Доля домохозяйств испытывающих стесненность	0,109	0,189	0,060
	Выбросы от стационарных источников тонн на кв. км в год	0,209	0,265	0,440
	Водопотребление м ³ /год на чел	0,035	0,033	0,007
	Качество окружающей среды	0,407	0,076	0,265

Наиболее сложным этапом при расчете композитных показателей является определение весовых коэффициентов. Это связано с их субъективностью, неточностью и противоречивостью мнений об их значимости. Из-за неопределенности в задании весовых коэффициентов решение этой проблемы в рамках АСПИД-метода осуществляется с использованием процедуры байесовской рандомизации неопределенности, которая допускает использование нечисловой, неточной и неполной информации. Расчеты композитных критериев осуществлялись на базе Microsoft Excel авторской версией АСПИД-метода, что позволяло проводить импорт-экспорт данных через обменный формат с ГИС MapInfo.

Интегральная оценка состояния здоровья в контексте пандемии COVID-19 проводилась в два этапа. На первом этапе рассчитывались интегральные показатели по оценочным группам (1 группа — 7 характеристик, 2 группа — 6 характеристик, 3 группа — 4 характеристики, 4 группа — 6 характеристик) и весовые коэффициенты социальных детерминант внутри групп. На втором этапе использовались четыре субиндекса, отражающих оценку по отдельным группам.

Взаимосвязь между распространением COVID-19 и композитными показателями социальных детерминант оценивалась с использованием коэффициента корреляции Пирсона. Корреляционный анализ проводился на всех уровнях агрегации информации.

При выборе 23 оценочных характеристик мы ориентировались на информацию из научной периодики о пространственных автокорреляциях параметров оценки и инфекции COVID-19. Были проведены расчеты индексов Морана, оценивающих пространственные корреляции композитного показателя. Индексы Морана рассчитывались для каждого года. Для анализа использовалось программное обеспечение GeoDa версии 1.22.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на то, что доля COVID-19 в структуре общей заболеваемости населения составляет менее 5 %, эта проблема остается актуальной для регионов России. С марта 2020 г. число заболевших неуклонно росло, и к январю 2023 г. превысило 3 800 000 чел. (рис. 2). Наибольшее число заболевших за три года эпидемии (2020–2022 гг.) отмечено в Санкт-Петербурге — 2 034 230 чел. В Архангельской области зарегистрировано наибольшее количество заболевших среди областей и республик СЗФО РФ — 294 066 чел. Меньше всего заболевших выявлено в Ненецком автономном округе — 9 108 чел. Средний уровень заболеваемости продолжал расти в СЗФО РФ на протяжении трех лет, увеличившись с 32 случаев на 1 000 человек в 2020 г. до 114 случаев в 2022 г.

В течение трехлетнего периода также наблюдалась тенденция увеличения как минимальных, так и максимальных уровней заболеваемости, которые варьировались от 13 до 69 и от 49 до 174 случаев заболевания на 1 000 человек населения соответственно. Эта тенденция была замечена и на муниципальном уровне [Огурцов, Дмитриев, 2023]. Особенностью распространения COVID-19 в регионе на данном временном отрезке являются низкие уровни заболеваемости в Ленинградской области.

Ранжирование территории округа по уровню заболеваемости COVID-19 показало, что в 2020 г. ситуация по коронавирусной инфекции находилась на относительно низком эпидемическом уровне. Уровни заболеваемости в целом по округу не превышали 49 случаев на 1 000 чел., а в большинстве регионов (54 %) уровень заболеваемости не превышал 38 случаев на 1 000 чел. Лидирующее положение по уровню заболеваемости в 2020 г. заняла Мурманская область, где показатель составил 49 случаев на 1 000 чел. Ряд авторов [Панин и др., 2021] объясняют это «совокупным действием контактов с соседними Финляндией и Норвегией и вахтовой трудовой миграцией». В последующие два года лидирующее положение по уровню заболеваемости коронавирусом занял Санкт-Петербург.

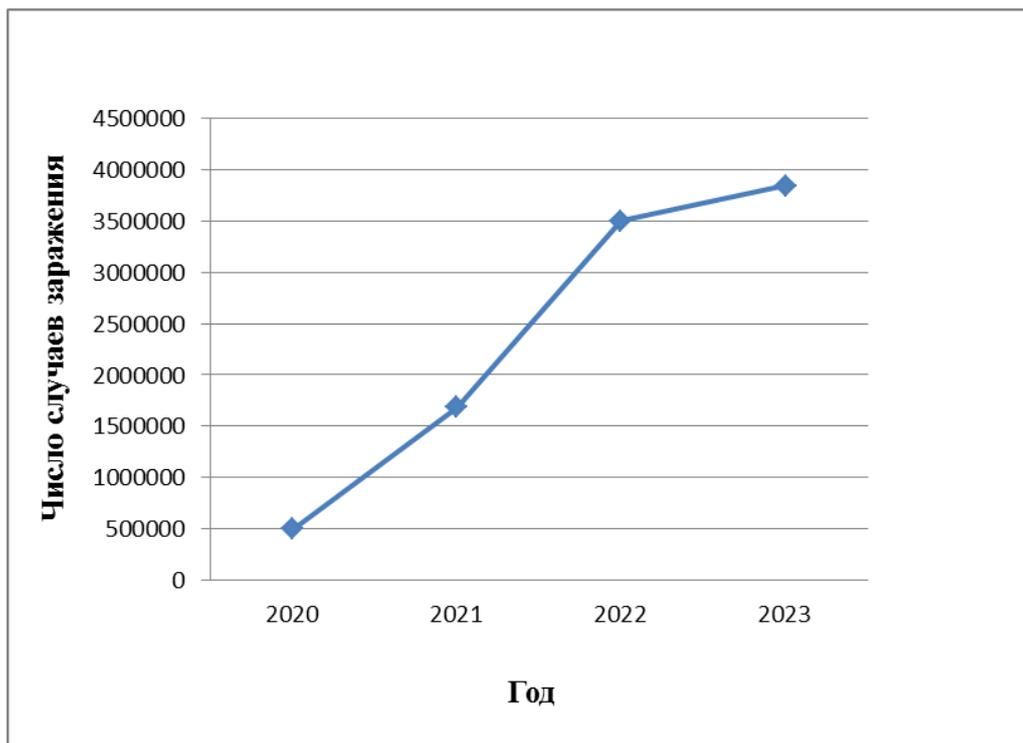
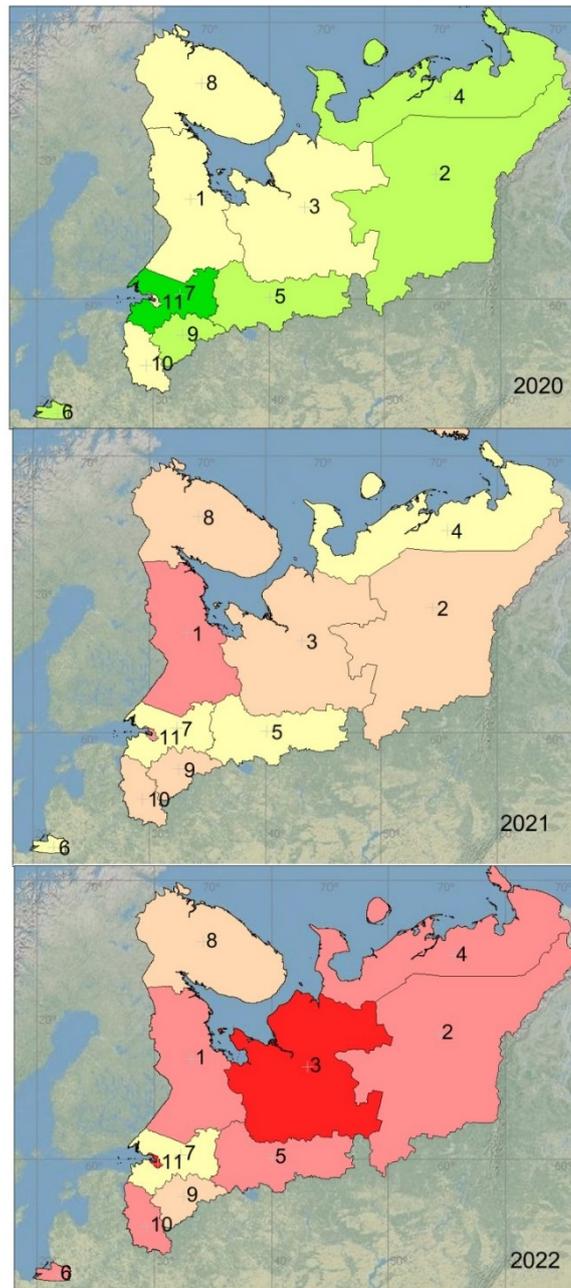


Рис. 2. Общее число случаев заражения COVID-19 в СЗФО РФ в 2020–2023 гг.
Fig. 2. The total number of COVID-19 infections in the Northwestern Federal District of the Russian Federation in 2020–2023

Анализ проявлений эпидемического процесса COVID-19 в 2021 г. (рис. 3) показывает, что на фоне повышения уровня заболеваемости по округу до 137 случаев на 1 000 чел., динамика заболеваемости в пространственном отношении принимает все более выраженный «пятнистый» характер. Пятна регионов с относительно низкими (от 38 до 70 случаев на 1 000 чел.) на этот год уровнями заболеваемости перемежаются с пятнами заболеваемости более высокого уровня. На долю регионов с относительно низкими значениями уровня заболеваемости приходится 36 %. В структуре округа на долю регионов с уровнем заболеваемости от 90 до 137 случаев на 1 000 чел. приходилось 18 %. В целом в 2021 г. преобладали регионы (56 %) с уровнем заболеваемости от 70 до 90 случаев на 1 000 чел.

В 2022 г. эпидемическая ситуация не претерпела каких либо серьезных изменений. Все также продолжался рост уровня заболеваемости, на фоне которого сохранялся и ее пятнистый характер (рис. 3), а заболевание приобретает все более легкие формы. На долю легочных форм заболевания приходится менее 5 % от всех случаев, в то время как в 2021 г. этот показатель составлял 22 %. В пространственном отношении преобладали регионы с уровнем заболеваемости свыше 90 случаев на 1 000 чел. Их доля в заболеваемости в округе составляла более 70 %. Что касается регионов с максимальным уровнем заболеваемости (свыше 137 случаев на 1 000 чел.), то на их долю приходится 18 %. Здесь ведущее место по уровню заболеваемости принадлежит Санкт-Петербургу и Архангельской области.

Необходимо отметить, что на фоне высоких значений уровня заболеваемости ранее выявленный факт «выравнивания эпидемиологической обстановки» по мере развития эпидемии, на который ссылаются в научных публикациях [Панин и др., 2021; Огурцов, Дмитриев, 2023], не нашел своего подтверждения в данной работе.



Уровень заболеваемости COVID-19

(число случаев на 1000 человек)



Номер региона на карте

- + 1 - Республика Карелия
- + 2 - Республика Коми
- + 3 - Архангельская область
- + 4 - Ненецкий автономный округ
- + 5 - Вологодская область
- + 6 - Калининградская область
- + 7 - Ленинградская область
- + 8 - Мурманская область
- + 9 - Новгородская область
- + 10 - Псковская область
- + 11 - Санкт-Петербург

Рис. 3. Ранжирование территории Северо-Западного федерального округа РФ по уровню заболеваемости COVID-19 в 2020–2022 гг.

Fig. 3. Ranking of the territory of the Northwestern Federal District of the Russian Federation by the incidence of COVID-19 in 2020–2022

Для определения роли различных факторов в изменении уровня заболеваемости COVID-19 были проведены расчеты интегральных показателей (субиндексов) первого иерархического уровня с неравновесомым заданием весовых коэффициентов социальных детерминант с использованием нечисловой информации о заболеваемости при задании приоритетов. В качестве дополнительной информации при расчетах использовались ранжированные по уровню заболеваемости ряды субъектов СЗФО РФ за 2020–2022 гг. (рис. 3). Расчеты проводились с учетом региона с наименьшим уровнем заболеваемости, после чего формировалась система неравенств, отражающая последовательность увеличения заболеваемости от наименьшего до более высокого уровня. Например, для первой группы социальных характеристик в 2020 г., основываясь на исходной информации о ранжировании уровня заболеваемости, была составлена следующая система неравенств: Ленинградская область > Ненецкий автономный округ > Вологодская область > Новгородская область > Архангельская область > Республика Карелия. Аналогично формировалась ординарная информация по другим группам в разные периоды времени. Полный список весовых коэффициентов на основе ординарной информации об уровнях заболеваемости COVID-19 представлен в табл. 1.

Анализ весовых коэффициентов показал, что в первой группе социальных детерминант ведущее положение занимает коэффициент напряженности на рынке труда. Его весовость возрастает по мере развития эпидемии и становится доминирующей в 2023 г. Также важными детерминантами в 2020 г. были совокупный показатель уровня безработицы и потенциальной рабочей силы населения вместе с показателем численности населения с денежными доходами ниже границы бедности. Впоследствии их весовость и роль других детерминантов здоровья этой группы становятся менее значимыми.

Среди детерминант второй группы, отражающих состояние системы здравоохранения и здорового образа жизни, в первый год пандемии (2020) важной характеристикой в решении вопросов здоровья является «доля граждан, ежегодно проходящих профилактический медицинский осмотр и (или) диспансеризацию». Во второй год (2021) не менее важную роль наряду с первым фактором играет критерий «численности детей первой и второй групп здоровья». В 2022 г. ведущая роль в отношении влияния на здоровье населения по весовости отводится «количеству граждан, ведущих здоровый образ жизни» и «укомплектованность медицинских организаций, врачами». Роль других детерминант здоровья, входящих в данную группу, на данном этапе становится незначительной.

В третьей (образовательной) группе ведущую роль в оценке социальных условий в отношении здоровья играют «доступность дошкольного образования» и «доля учителей с минимальной требуемой квалификацией в начальных классах от численности учителей». Причем последний критерий является приоритетным на всем временном интервале.

В четвертой группе ведущая роль, безусловно, принадлежит таким критериям, как «выбросы от стационарных источников» и «качество окружающей среды». Определенную, но менее значимую роль в пространственной неоднородности состояния здоровья населения в этой группе играют критерии состояния общественного правопорядка.

В целом данные табл. 1 подтверждают выводы, сделанные ранее в работах [Kianfar et al., 2022; Огурцов, Дмитриев, 2023] о том, что весовость социальных детерминант, влияющих на состояние здоровья населения в период COVID-19, изменяется с течением времени.

В результате проведенного корреляционного анализа была обнаружена отрицательная корреляционная связь между композитными показателями состояния первого иерархического уровня и уровнем заболеваемости COVID-19. Результаты анализа представлены в табл. 2.

Табл. 2. Коэффициенты корреляции между группами социальных детерминант и уровнем заболеваемости COVID-19

Table 2. Correlation coefficients between groups of social determinants and the incidence of COVID-19

№ группы	Год		
	2020	2021	2022
	Коэффициент корреляции		
1	-0,13	-0,34	-0,64
2	0,17	0,16	-0,45
3	-0,23	-0,52	-0,32
4	-0,79	-0,87	-0,68

Анализ данных табл. 2 показывает, что характер корреляционных связей субиндексов с уровнем заболеваемости значительно варьируется как между группами, так и в разные временные периоды. В частности, для первой группы социальных параметров сила корреляционных связей изменяется от очень слабой в 2020 г. до средней в 2022 г.

Для второй группы характерно изменение силы корреляционной связи от «очень слабой» в начале эпидемии до «слабой» в 2022 г., а также изменение направления связи — от положительных значений коэффициента корреляции в 2020 и 2021 гг. до отрицательных значений в 2022 г.

Ассоциация третьей группы социальных детерминант с уровнем загрязнения характеризуется «слабой» и «средней» по силе корреляционной связью.

Наиболее сильные корреляционные связи наблюдаются в четвертой группе. Показатели этой группы имеют среднюю и высокую отрицательную корреляцию с уровнем заболеваемости.

При расчете композитных показателей (КП) последнего уровня были рассмотрены три информационных сценария, определяющих значимость (весомость) отдельных критериев (показателей первого уровня) в зависимости от года распространения инфекции и силы корреляционных связей.

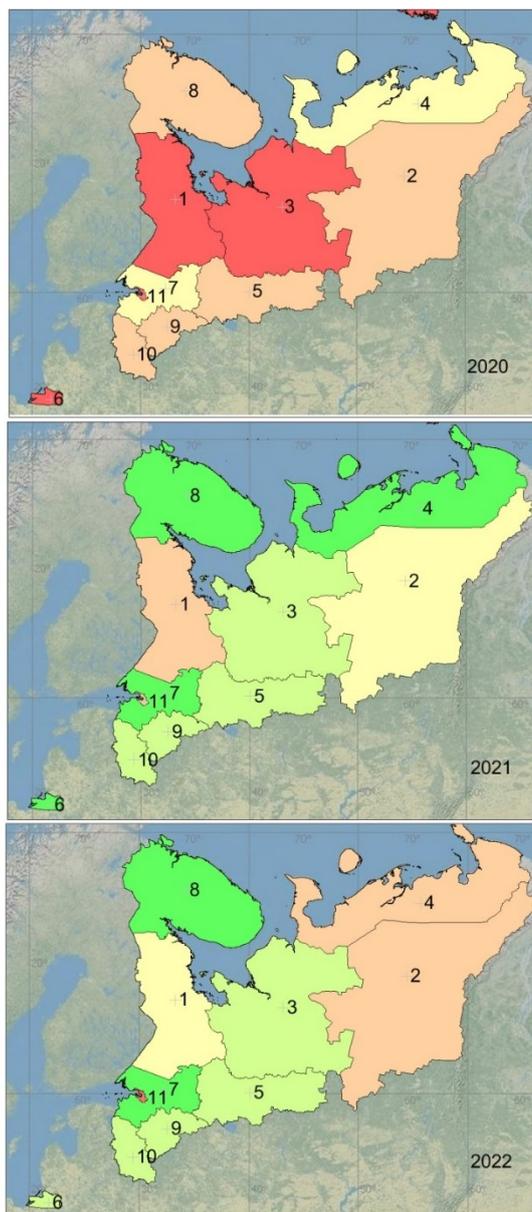
Эту вербальную информацию о сравнительной весомости композитных показателей первого уровня можно представить в виде следующих систем неравенств:

- группа 4 > группа 3 > группа 2 > группа 1;
- группа 4 > группа 3 > группа 1 > группа 2;
- группа 4 > группа 1 > группа 2 > группа 3.

Результаты расчетов визуализированы на тематической карте и ранжированы по величине КП (рис. 4). Пространственный анализ картограмм (рис. 4) свидетельствует о пространственной вариабельности оценок благоприятности социальных детерминант здоровья.

Общественное здоровье населения в регионах СЗФО РФ в 2020 г. характеризовалось подъемом напряженности эпидемиологической ситуации, связанной с новой коронавирусной инфекцией.

Согласно первому сценарию, в 2020 г. наиболее неблагоприятные условия складываются в этот период на территории округа в трех регионах: Калининградской и Архангельской областях и Республике Карелия. Величина КП не превышает 0,59. В целом преобладают регионы с неблагоприятной социальной средой. Лишь в двух регионах округа социальная обстановка относительно благоприятна для здоровья.



Номер региона на карте

- | | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| + 1 - Республика Карелия | + 7 - Ленинградская область |
| + 2 - Республика Коми | + 8 - Мурманская область |
| + 3 - Архангельская область | + 9 - Новгородская область |
| + 4 - Ненецкий автономный округ | + 10 - Псковская область |
| + 5 - Вологодская область | + 11 - Санкт-Петербург |
| + 6 - Калининградская область | |

Шкала интегральной оценки социальных условий

- | | |
|---|--|
| < 0,59 "наиболее неблагоприятные" | 0,69 -- 0,75 "благоприятные" |
| 0,59 -- 0,65 "неблагоприятные" | >0,75 "наиболее благоприятные" |
| 0,65 -- 0,69 "относительно благоприятные" | |

Рис. 4. Ранжирование территории Северо-Западного федерального округа РФ по величине интегрального показателя социальных детерминант здоровья (по данным за 2020–2022 гг.)

Fig. 4. Ranking of the territory of the North-western Federal District of the Russian Federation by the value of the integral indicator of social determinants of health (according to data for 2020–2022)

После 2020 г. в социальных условиях произошли некоторые положительные изменения в сторону улучшения. В большинстве субъектов федерации социальная среда оценивается как относительно благоприятная или благоприятная. Лучшие условия для здоровья наблюдаются на территории четырех субъектов федерации. Однако в двух субъектах федерации (Республике Карелия, Санкт-Петербург) после улучшения социальных условий ситуация остается неблагоприятной для здоровья. Факт улучшения социальных условий на муниципальном уровне был отмечен ранее в исследовании [Огурцов, Дмитриев, 2023].

В 2022 г. значительных изменений в социальной среде региона не произошло, несмотря на ухудшение ситуации в двух регионах. Важно отметить стабильное состояние социальной среды в шести субъектах федерации, т. к. сценарные расчеты 2023 г. не повлияли на оценку благоприятности социальных условий для здоровья.

Проведенный корреляционный анализ подтвердил наличие отрицательной связи между величиной комплексного показателя на втором уровне и уровнем заболеваемости населения, а также выявил высокую силу корреляционной связи ($-0,7 < r < -0,9$).

В течение 2020–2022 гг. наблюдаемое значение индекса Морана, рассчитанное для композитного показателя, первоначально возросло к 2021 г. с $-0,152$ до $-0,146$ и оставалось неизменным в последующем 2022 г. Отрицательные наблюдаемые значения индекса Морана несколько меньше, чем ожидаемое значение ($-0,1$), что может указывать на отрицательную пространственную автокорреляцию. Но, поскольку Р-значение в нашем случае велико ($P > 0,05$), то полученные результаты не являются статистически значимыми и указывают на неочевидную отрицательную пространственную автокорреляцию композитного показателя.

ВЫВОДЫ

Хотя доля COVID-19 в общей заболеваемости составляет менее 5 %, новая коронавирусная инфекция остается актуальной проблемой для регионов России. Это стимулировало дальнейшее изучение роли социальных факторов в проблеме пространственного неравенства общественного здоровья во время пандемии. Полученные результаты основаны на региональных исследованиях.

Исходя из результатов исследований, можно сформулировать следующие выводы:

1. Для характеристики социальных детерминант мы предложили набор критериев, наиболее релевантных в условиях пандемии, основываясь на опыте исследований и научных публикаций.
2. Проведенные исследования выявили количественные и пространственно-временные особенности распространения коронавирусной инфекции и изменения социальных условий на уровне субъектов федерации СЗФО РФ.
3. На фоне роста заболеваемости особенностью пространственного распределения стало пятнистое распространение заболеваемости в пределах округа на протяжении всего временного интервала.
4. Также следует отметить, что несмотря на высокие показатели заболеваемости факт «выравнивания эпидемиологической обстановки» в процессе развития эпидемии, упомянутый в научных публикациях (Панин и др., 2021; Огурцов, Дмитриев, 2023), не подтвердился.
5. Получено подтверждение вывода, сделанного в работах [Огурцов, Дмитриев, 2023; Kianfar et al., 2022] — весомость социальных детерминант, влияющих на COVID-19, изменяется с течением времени.

6. Результаты корреляционного анализа подтверждают не только наличие отрицательной корреляционной связи между композитным показателем (КП) на всех уровнях свертки и уровнем заболеваемости COVID-19, но и ее временных изменениях.
7. Разработанные картографические модели на основе географических информационных систем (ГИС) могут быть полезны для выявления влияния социальной среды на распространение COVID-19 на региональном уровне.
8. С инновационной точки зрения приведенную модель нужно рассматривать не только как аддитивную модель свертки с использованием нечисловой, неточной и неполной информации, но и как открытую модель в том плане, что она может легко учитывать большее число критериев и может быть применена к другим заболеваниям и другим исследованиям. Она может быть применена ко всем административно-территориальным единицам РФ с обоснованием (корректировкой) перечня исходных критериев.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность Институту наук о Земле СПбГУ за помощь в организации работ.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their gratitude to the Institute of Earth Sciences of St. Petersburg State University for their assistance in organizing the work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Васильева Т. П., Ларионов А. В., Русских С. В., Зудин А. Б., Васюнина А. Е., Васильев М. Д., Каунина Д. В. Состояние общественного здоровья в субъектах Российской Федерации в период масштабного эпидемиологического вызова на примере пандемии COVID-19. Здоровье населения и среда обитания, 2023. Т. 31. № 3. С. 7–17. DOI: 10.35627/2219-5238/2023-31-3-7-17.

Лядова А. В. Социальные факторы здоровья в условиях пандемии новой коронавирусной инфекции. Вестник Московского университета. Серия 18. Социология и политология, 2021. № 4. С. 134–156. DOI: 10.24290/1029-3736-2021-27-4-134-156.

Огурцов А. Н., Дмитриев В. В. Интегральная оценка и геоинформационный анализ социальных детерминант здоровья населения Крайнего Севера Европейской части Российской Федерации. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции. М.: Издательство Московского университета, 2019. Т. 25. Ч. 1. С. 23–34. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-23-34.

Огурцов А. Н., Дмитриев В. В. Интегральная оценка социальных детерминант общественного здоровья населения Калининградской области (муниципальный уровень) ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции. М.: Издательство Московского университета, 2020. Т. 26. Ч. 3. С. 78–90. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-3-26-78-90.

Огурцов А. Н., Дмитриев В. В. Интегральная оценка социальных детерминант общественного здоровья населения Калининградской области в контексте пандемии COVID-19 (муниципальный уровень). ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции. М.: Геогра-

фический факультет МГУ, 2023. Т. 29. Ч. 2. С. 162–179. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-2-29-162-179.

Панин А. Н., Рылский И. А., Тикунов В. С. Пространственные закономерности распространения пандемии COVID-19 в России и мире: картографический анализ. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2021. № 1. С. 62–77.

Фомин В. В., Коршевер Н. Г., Сидельников С. А., Роюк В. В., Решетников В. А. Удельный вес влияния факторов, определяющих состояние здоровья населения в условиях пандемии COVID-19. Казанский медицинский журнал, 2023. № 1. С. 120–128. DOI: 10.17816/KMJ111907.

Хованов Н. В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. СПб.: Издательство СПбГУ, 1996. 204 с.

Cabrera-Barona P., Gaona G., Carrión A. Importance of public space, neighbors' support, and safety in the context of the COVID-19 pandemic lockdown. Journal of Urban Management, 2023. V. 12. Iss. 3. P. 284–294. DOI: 10.1016/j.jum.2023.06.001.

Chen R., Zhang M., Zhou J. Jobs-housing relationships before and amid COVID-19: An excess-commuting approach, Journal of Transport Geography, 2023. V. 106. P. 103507. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2022.103507.

Coker E. S., Molitor J., Liverani S., Martin J., Maranzano P., Pontarollo N., Vergalli S. Bayesian profile regression to study the ecologic associations of correlated environmental exposures with excess mortality risk during the first year of the COVID-19 epidemic in Lombardy, Italy. Environmental Research, 2023. V. 216. Part 1. P. 114484. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114484.

Figueira J. R., Oliveira H. M., Serro A. P., Colaço R., Froes F., Cordeiro C. R., Diniz A., Guimarães M. A multiple criteria approach for building a pandemic impact assessment composite indicator: The case of COVID-19 in Portugal. European Journal of Operational Research, 2023. V. 309. Iss. 2. P. 795–818. DOI: 10.1016/j.ejor.2023.01.025.

Gizamba J. M., Wilson J. P., Mendenhall E., Ferguson L. A review of place-related contextual factors in syndemics research. Health & Place, 2023. V. 83. P. 103084. DOI: 10.1016/j.healthplace.2023.103084.

Jana A., Kundu S., Shaw S., Chakraborty S., Chattopadhyay A. Spatial shifting of COVID-19 clusters and disease association with environmental parameters in India: A time series analysis. Environmental Research, 2023. V. 222. 115288. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115288.

Kianfar N., Mesgari M-S., Mollalo A., Kaveh M. Spatio-temporal modeling of COVID-19 prevalence and mortality using artificial neural network algorithms. Spatial and Spatio-temporal Epidemiology, 2022. V. 40. 100471. DOI: 10.1016/j.sste.2021.100471.

Lee J., Ramírez I. J. Geography of Disparity: Connecting COVID-19 Vulnerability and Social Determinants of Health in Colorado. Behavioral Medicine, 2022. V. 48. No. 2. P. 72–84. DOI: 10.1080/08964289.2021.2021382.

Vandelli V., Palandri L., Poratza P., Rizzi C., Ghinoi V. A., Righi E., Soldati M. Conditioning factors in the spreading of COVID-19 — Does geography matter? Heliyon, 2024. V. 10. Iss. 3. 25810. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25810.

Zhuo J., Harrigan N. Low education predicts large increase in COVID-19 mortality: the role of collective culture and individual literacy. Public Health, 2023. V. 221. P. 201–207. DOI: 10.1016/j.puhe.2023.06.016.

REFERENCES

- Cabrera-Barona P., Gaona G., Carrión A.* Importance of public space, neighbors' support, and safety in the context of the COVID-19 pandemic lockdown. *Journal of Urban Management*, 2023. V. 12. Iss. 3. P. 284–294. DOI: 10.1016/j.jum.2023.06.001.
- Chen R., Zhang M., Zhou J.* Jobs-housing relationships before and amid COVID-19: An excess-commuting approach, *Journal of Transport Geography*, 2023. V. 106. 103507. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2022.103507.
- Coker E. S., Molitor J., Liverani S., Martin J., Maranzano P., Pontarollo N., Vergalli S.* Bayesian profile regression to study the ecologic associations of correlated environmental exposures with excess mortality risk during the first year of the COVID-19 epidemic in Lombardy, Italy. *Environmental Research*, 2023. V. 216. Part 1. 114484. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114484.
- Figueira J. R., Oliveira H. M., Serro A. P., Colaço R., Froes F., Cordeiro C. R., Diniz A., Guimarães M.* A multiple criteria approach for building a pandemic impact assessment composite indicator: The case of COVID-19 in Portugal. *European Journal of Operational Research*, 2023. V. 309. Iss. 2. P. 795–818. DOI: 10.1016/j.ejor.2023.01.025.
- Fomin V. V., Korshever N. G., Sidelnikov S. A., Royuk V. V., Reshetnikov V. A.* The share of influence of factors determining the state of public health in the context of the COVID-19 pandemic. *Kazan Medical Journal*, 2023. No. 1. P. 120–128 (in Russian). DOI: 10.17816/KMJ111907.
- Gizamba J. M., Wilson J. P., Mendenhall E., Ferguson L.* A review of place-related contextual factors in syndemics research. *Health & Place*, 2023. V. 83. P. 103084. DOI: 10.1016/j.healthplace.2023.103084.
- Hovanov N. V.* Analysis and synthesis of indicators at information deficiency. St. Petersburg: St. Petersburg State University Press, 1996. 196 p. (in Russian).
- Jana A., Kundu S., Shaw S., Chakraborty S., Chattopadhyay A.* Spatial shifting of COVID-19 clusters and disease association with environmental parameters in India: A time series analysis. *Environmental Research*, 2023. V. 222. 115288. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115288.
- Kianfar N., Mesgari M-S., Mollalo A., Kaveh M.* Spatio-temporal modeling of COVID-19 prevalence and mortality using artificial neural network algorithms. *Spatial and Spatio-temporal Epidemiology*, 2022. V. 40. 100471. DOI: 10.1016/j.sste.2021.100471.
- Lee J., Ramírez I. J.* Geography of Disparity: Connecting COVID-19 Vulnerability and Social Determinants of Health in Colorado. *Behavioral Medicine*, 2022. V. 48. No. 2. P. 72–84. DOI: 10.1080/08964289.2021.2021382.
- Liadova A. V.* Social inequality and health: the historical and sociological study. *Moscow State University Bulletin. Series 18. Sociology and Political Science*, 2021. No. 4. P. 134–156 (in Russian). DOI: 10.24290/1029-3736-2021-27-4-134-156.
- Ogurtsov A. N., Dmitriev V. V.* Integral assessment and geoinformational analysis of social determinants of population health of the Extreme North of the European part of the Russian Federation. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International Conference*. Moscow: Moscow University Press, 2019. V. 25. Part 1. P. 23–34 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-23-34.
- Ogurtsov A. N., Dmitriev V. V.* Integrated assessment of social determinants of public health of the population of the Kaliningrad Region (municipal level) *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference*. Moscow: Moscow University Press, 2020. V. 26. Part 3. P. 78–90 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2020-3-26-78-90.

Ogurtsov A. N., Dmitriev V. V. Integral assessment of social determinants of public health of the Kaliningrad Region population in the context of the COVID-19 pandemic (municipal level). *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference.* Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2023. V. 29. Part 2. P. 162–179 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2023-2-29-162-179.

Panin A. N., Rylskiy I. A., Tikunov V. S. Spatial patterns of COVID-19 distribution in Russia and the world: cartographic analysis. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5. Geografia (Lomonosov Geography Journal. Series 5. Geography)*, 2021. No. 1. P. 62–77 (in Russian).

Vandelli V., Palandri L., Poratza P., Rizzi C., Ghinoi V. A., Righi E., Soldati M. Conditioning factors in the spreading of COVID-19 — Does geography matter? *Heliyon*, 2024. V. 10. Iss. 3. 25810. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25810.

Vasilieva T. P., Larionov A. V., Russkikh S. V., Zudin A. B., Vasyunina A. E., Vasiliev M. D., Kaunina D. V. The state of public health in constituent entities of the Russian Federation in times of a large-scale epidemiological challenge: The example of the COVID-19 pandemic. *Public Health and Life Environment*, 2023. V. 31. No. 3. P. 7–17 (in Russian). DOI: 10.35627/2219-5238/2023-31-3-7-17.

Zhuo J., Harrigan N. Low education predicts large increase in COVID-19 mortality: the role of collective culture and individual literacy. *Public Health*, 2023. V. 221. P. 201–207. DOI: 10.1016/j.puhe.2023.06.016.

УДК: 912.43:502.72

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-145-160

Д. И. Тебиева¹, В. В. Доброносков²

ПРИРОДНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КАРКАС РЕСПУБЛИКИ СЕВЕРНАЯ ОСЕТИЯ — АЛАНИЯ

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается существующая структура особо охраняемых природных территорий Республики Северная Осетия — Алания. Предлагается вариант усовершенствования природно-экологического каркаса путем создания на востоке горной части республики особо охраняемой природной территории в форме геопарка и включения в структуру каркаса ценных в природоохранном и научном отношении водно-болотных угодий — водохранилища Бекан и Тарского торфяного болота. В условиях интенсивно развивающейся в РСО — Алания туристской отрасли, наиболее подходящей формой ООПТ является геопарк. В отличие от уже функционирующих на территории РСО — Алания ООПТ, геопарк имеет менее строгие ограничения в отношении природопользования. Охранный режим геопарка формируется благодаря наличию уникальных геолого-геоморфологических объектов и процессов и распространяется на объекты культурно-исторического наследия, расположенные на той же территории. В данной работе использованы материалы, полученные за длительный период комплексных географических исследований региона. Современное состояние туристского природопользования изучалось непосредственно в районах наибольшего туристского интереса. Экологическое состояние отдельных природных и культурных объектов было выявлено в полевых условиях. Картографические работы по планируемому геопарку выполнялись по единой технологии в программах CorelDRAW, Photoshop и Surfer. Компаративный подход применялся для обоснования оптимизации структуры ООПТ и совершенствования природно-экологического каркаса территории РСО — Алания. Предлагаемая структура природно-экологического каркаса увеличивает площадь особо охраняемых территорий почти на 10 %, одновременно с этим повышая уровень защиты природных и культурно-исторических памятников и объектов, и в целом усиливая аттрактивность РСО — Алания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Республика Северная Осетия — Алания, природно-экологический каркас, геопарк, уникальные объекты и процессы, картирование геопарка

¹ Северо-Осетинский государственный университет имени Коста Левановича Хетагурова, ул. Ватутина, д. 44-46, г. Владикавказ, Республика Северная Осетия — Алания, Россия, 362025, e-mail: d_tebieva@mail.ru

² ФГБУ «Заповедная Осетия — Алания», ул. Чабахан Басиевой, д. 1, г. Алагир, Республика Северная Осетия — Алания, Россия, 363245, e-mail: dobronosov@mail.ru

Delyara I. Tebieva¹, Vitaliy V. Dobronosov²

NATURALLY-ECOLOGICAL FRAMEWORK OF THE REPUBLIC OF NORTH OSSETIA — ALANIA

ABSTRACT

The existing structure of specially protected natural territories of the Republic of North Ossetia — Alania is considered. An option is proposed to improve the natural and ecological frame by creating a specially protected natural area in the form of a geopark in the east of the mountainous part of the republic and including wetlands valuable in environmental and scientific terms — the “Bekan” Reservoir and the Tarskoe peat bog in the frame structure. In the conditions of the tourism industry intensively developing in the Republic of North Ossetia — Alania, the geopark is the most suitable form of protected area. Unlike protected areas already operating on the territory of the Republic of North Ossetia — Alania, the geopark has less stringent restrictions on nature management. The security regime of the geopark is formed due to the presence of unique geological and geomorphological objects and processes and extends to objects of cultural and historical heritage located on the same territory. The paper uses materials obtained over a long period of complex geographical studies of the region. The current state of tourist nature management was studied directly in areas of greatest tourist interest. The ecological state of individual natural and cultural objects was revealed in the field. Cartographic work on the planned geopark was carried out using a single technology in the CorelDRAW, Photoshop and Surfer programs. The comparative approach was used to justify the optimization of the structure of protected areas and the improvement of the natural and ecological framework of the territory of the Republic of North Ossetia — Alania. The proposed structure of the natural-ecological framework increases the area of specially protected areas by almost ten percent, while simultaneously increasing the level of protection of natural and cultural-historical monuments and objects, and generally increasing the attractiveness of the Republic of North Ossetia — Alania.

KEYWORDS: Republic of North Ossetia — Alania, natural and ecological framework, geopark, unique objects and processes, geopark mapping

ВВЕДЕНИЕ

В последние четыре года в России отмечался бурный рост внутреннего туризма. Особенно заметным было увеличение турпотоков на Северный Кавказ. Среди лидеров были отмечены: Карачаево-Черкесская Республика, Кабардино-Балкарская Республика, Республика Дагестан, район Кавказских Минеральных Вод³. Причем если в 2022 г. предпочтение отдавалось «большому» путешествию по Северному Кавказу, то в 2023 г. повысился спрос на посещение конкретной республики. Однако аналитики считают, что интенсивность туризма может уменьшиться, т. к. уже в 2023 г. наблюдалось несоответствие туристического спроса и предложения по некоторым аспектам. Возможно, именно поэтому Северная Осетия (рис. 1) была названа в числе регионов, посещаемых больше в форме экскурсий, т. к. туристы столкнулись с нехваткой мест проживания, невысоким уровнем качества предоставляемых услуг и недостаточно развитой туристской инфраструктурой в горах.

¹ North Ossetian State University named after Kosta Levanovich Khetagurov, 44-46, Vatutina str., Vladikavkaz, Republic of North Ossetia — Alania, 362025, Russia, *e-mail*: d_tebieva@mail.ru

² FSBI “Zapovednaya Ossetia — Alania”, 1, Chabakhan Basievoy str., Alagir, Republic of North Ossetia — Alania, 363245, Russia, *e-mail*: dobronosov@mail.ru

³ Электронный ресурс: <https://tourism.interfax.ru/ru/news/articles/104334/> (дата обращения 17.03.2024)

Неготовность республики к приему большого потока туристов отмечалась также и самой принимающей стороной: неконтролируемый рост самодельных туроператоров и турагентов, часто без специальной подготовки, отсутствие систем управления, регулирования и контроля, отсутствие информации о нормах поведения на туристических маршрутах и экскурсиях. Последняя проблема вызвала бурную дискуссию в средствах массовой информации (СМИ). С глубокой древности в Осетии обозначались особые природные объекты и участки (отдельные вершины, леса, рощи, сакральные и культовые места), в которых запрещалась любая хозяйственная деятельность: выпас скота и сенокосение, вырубка лесов, распашка склонов. Посетителей обязывали строго соблюдать морально-этические нормы: не сквернословить, не совершать антиобщественные и аморальные поступки, соблюдать гендерные требования (не все святые места могли и могут посещать женщины). Такие требования изначально возникли в результате стихийно формирующегося экологического мышления осетин, дающего возможность выживания в горных ущельях, в условиях изоляции с ограниченными пищевыми и хозяйственно-бытовыми ресурсами [Тебиева и др., 2020].

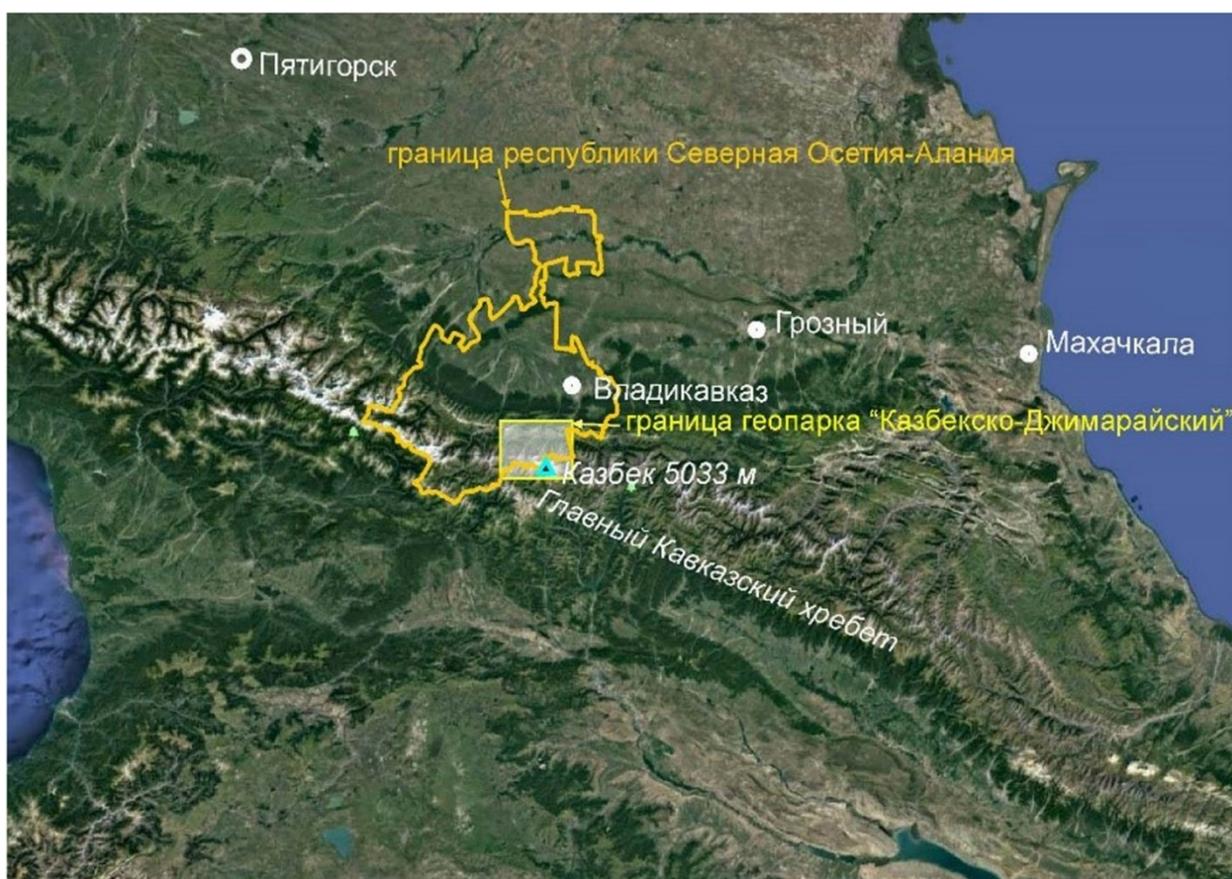


Рис. 1. Географическое положение РСО — Алания (м-б 1: 10 000 000)

Fig. 1. The geographical position of Republic of North Ossetia — Alania (scale 1: 10 000 000)

Совокупность проблем, проявившихся в процессе туристской деятельности, заставила участников развивающейся туристической отрасли пересмотреть некоторые организационные аспекты, касающиеся, в первую очередь, усиления охраны памятников природы и культуры с одной стороны, и обеспечения безопасности туристов — с другой.

Наше видение решения проблемы охраны природного и культурно-исторического

наследия состояло в том, чтобы максимально расширить в восточном направлении особый режим пользования горной территорией Северной Осетии, и таким образом получить сплошную полосу различных форм особо охраняемых природных территорий (ООПТ). Восточные ущелья и долины являются наиболее посещаемыми в силу транспортной доступности и высокой концентрации объектов туристического интереса, а также благодаря многочисленным паспортизированным туристским маршрутам.

Было предложено расширение площади ООПТ путем создания на востоке горной части республики новой формы — геопарка и получения целостного массива особо охраняемых территорий, соединенных «зелеными коридорами» с расположенными в предгорной и равнинной частях республики объектами и центрами, представляющими туристский интерес. Природно-экологический каркас, как условно названный «туристский маршрут», позволит сохранить экзотику горных ландшафтов, «дикость» (первозданность) природы, уберечь естественные биогеоценозы и антропогенные объекты от чрезмерной туристской нагрузки. Особо охраняемые природные территории заняли в РСО — Алания 1 627 км², или 20,3 % от площади республики. Это с учетом ее мизерных размеров (8 000 км²) значительно больше среднероссийского показателя (12 %). Основные особо охраняемые природные территории расположены в центральной и западной горных частях республики — это объединенные в единую дирекцию (названную «Заповедная Осетия — Алания») Северо-Осетинский государственный природный заповедник, Комплексный федеральный заказник «Цейский» и Национальный парк «Алания». Еще несколько площадных особо охраняемых объектов расположено в предгорной части. Это государственные природные заказники регионального значения: «Турмонский», «Змейско-Николаевский» и «Заманкульский». Кроме того, в предгорной части расположено водохранилище Бекан, отнесенное к водно-болотным угодьям¹ и внесенное в список объектов, отвечающих требованиям Рамсарской конвенции². В низкогорной части расположено Тарское торфяное болото, признанное редким палеоботаническим памятником и ценным объектом научной информации, спорово-пыльцевой материал которого позволил уточнить историю флоры Кавказа в голоцене.

В интересующей нас восточной части горной полосы имеется большое количество памятников природы и культуры федерального, регионального и локального значения, в т. ч. геологические объекты всероссийского значения³ и процессы глобального уровня. Все природные и культурно-исторические объекты нуждаются в защите от антропогенного воздействия, и лучшее решение данной проблемы — создание геопарка. В отличие от других форм, геопарк открывает гораздо больше возможностей для местного населения, уровень жизни которого будет направленно повышаться по мере развития геопарка, т. к. появятся рабочие места, молодежь вернется в горные села [Dobronosov et al., 2020]. Не меняя традиционного уклада жизни, население может участвовать не только в функционировании, но и в развитии территории: обслуживании туристской инфраструктуры, воссоздании народных промыслов, разработке и обновлении символики геопарка, организации познавательного, событийного, сельского, гастрономического, спортивного и многих других видов туризма. Геопарк будет способствовать повышению уровня и качества жизни населения, содействовать устойчивому развитию территории.

¹ Водно-болотные угодья России. Электронный ресурс: <https://www.fesk.ru/pages/112.html> (дата обращения 17.03.2024)

² Конвенция о водно-болотных угодьях, имеющих международное значение, главным образом, в качестве местобитаний водоплавающих птиц. Электронный ресурс: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/waterfowl.shtml (дата обращения 17.03.2024)

³ Геологические парки в России: мифы и реальность. Электронный ресурс: <https://www.rosnedra.gov.ru/article/841.html> (дата обращения 17.03.2024)

Целью настоящего исследования явилось научное обоснование создания природно-экологического каркаса Республики Северная Осетия — Алания (РСО — А), представляющего собой объединение геопарка, существующих особо охраняемых природных территорий федерального и регионального подчинения, сохранившихся разрозненных лесных массивов равнинной части, всех среднегорных и низкогорных лесов, прикраевых полос полей и лесопосадок вдоль транспортных магистралей.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) полевое изучение рекреационно-туристской составляющей в системе природопользования в республике;
- 2) изучение опыта планирования и создания геопарков;
- 3) картографирование территории проведения исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В статье использованы материалы, полученные в процессе полевого изучения современного состояния рекреационно-туристского природопользования на территории РСО — Алания и планируемого геопарка после снятия пандемических ограничений в 2021–2023 гг. Исследовались туристские потоки в Даргавскую котловину, проводился сравнительный анализ количества проданных билетов на посещение Даргавского некрополя, велся подсчет автомобилей, прибывающих в долину Мидаграбинских водопадов и к месту гибели съемочной группы Сергея Бодрова.

Для обоснования необходимости создания особой охраняемой территории в восточной части республики использованы материалы, полученные в ходе исполнения гранта «Разработка концепции геопарка „Казбекско-Джигарайский“» (Договор № 34/2020-Р между Русским географическим обществом и Северо-Осетинским государственным университетом). Результаты гранта не были реализованы по объективным причинам: пандемия COVID-19, смена руководства РСО — Алания, отсутствие в российском законодательстве нормативно-правовой базы, касающейся геопарков и самого понятия «геопарк», на что неоднократно указывалось различными авторами [Лулева, 2014, 2021; Злотникова, 2021].

В основу разработки концепции геопарка положены требования, предъявляемые к глобальным геопаркам ЮНЕСКО, материалы сравнительного анализа существующей сети глобальных геопарков мира, выявление особенностей различных трактовок понятия «природно-экологический каркас» [Панченко и др., 2010], изучение опыта создания и планирования геопарков на территории России [Корф, 2014, 2015; Редькин и др., 2015; Джамирзоев и др., 2017; Акбашев и др., 2018; Ардисламов и др., 2019а, 2019б; Васьков и др., 2021; Богдан и др., 2022; Кислов и др., 2023], собственные многолетние полевые и дистанционные исследования физико-географических особенностей РСО — Алания, ее тектоники и геологического строения, гляциологии [Тебиева и др., 2017], ландшафтной структуры, почвенно-растительного покрова, биоразнообразия [Красная книга, 2022], природно-ресурсного потенциала [Туаев и др., 2013]. Картографирование территории проводилось по единой технологии в программах CorelDRAW, Photoshop и Surfer.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основные положения и принципы создания и функционирования геопарков сформулированы в Уставе международной программы по геонаукам и геопаркам¹, принятом на 38-й сессии Генеральной конференции ЮНЕСКО в ноябре 2015 г. в Париже. С этого момента Глобальная сеть геопарков мира, к тому времени уже сложившаяся, стала неотъемлемой частью программы ЮНЕСКО по охране объектов геологической истории

¹ Устав Международной программы по геонаукам и геопаркам. Электронный ресурс: https://geomem.ru/geoparks/GEOPARKS-PROGRAMME_rus.htm (дата обращения 17.03.2024)

Земли. По состоянию на 24 мая 2023 г. Глобальная сеть геопарков насчитывала 195 объектов из 48 стран. К сожалению, на всей территории Российской Федерации имеется всего один геопарк, вошедший в Глобальную сеть геопарков ЮНЕСКО — «Янган-тау» в Башкортостане — и несколько региональных геопарков: «Алтай», «Балтийско-Ладожский глинт», «Торатау» (Башкортостан), «Ундория» (Ульяновская область). Попытки создания геопарков предпринимаются в различных субъектах России, но сталкиваются с одними и теми же проблемами: непониманием органов власти значения геопарка для субъекта, неразвитой нормативно-правовой базой, недостаточно развитой туристической инфраструктурой, слабой информированностью населения и потенциально заинтересованных лиц в создании геопарка. Понятие «геопарк» более четверти века используется в научной литературе и имеет четкое и однозначное определение в Уставе МПГГ ЮНЕСКО, поэтому большинство авторов в целом придерживаются одинакового понимания и толкования данного понятия.

Проект геопарка «Казбекско-Джигарайский» разрабатывался с амбициозной конечной целью — вхождением в глобальную сеть геопарков ЮНЕСКО. Но предварительно необходимо было получить статус «региональный геопарк», решение о котором принимает Правительство РСО — Алания.

Территория планируемого геопарка на юге ограничена государственной границей России, которая проходит по гребням Казбекско-Джигарайского высокогорного ледникового массива с прилегающими к нему ущельями — долины рек Терек, Геналдон, Гизельдон и часть долины р. Фиадон.

Площадь предполагаемой территории геопарка — более 800 км². Координаты: с-з точка — г. Кариухох (42°45' с. ш., 44°15' в. д.); с-в точка — г. Хиах (42°45' с. ш., 44°40' в. д.); ю-з точка — г. Сивераут (42°15' с. ш., 44°15' в. д.); ю-в точка — граница с Грузией по Военно-Грузинской дороге (42°30' с. ш., 44°30' в. д.).

Рельеф будущего геопарка характеризуется большей расчлененностью по сравнению с западным отрезком РСО — Алания. Моноклиналиное строение Скалистого хребта к западу от долины р. Ардон на востоке переходит в моноклиналино-складчатое, что подтверждает четкое обособление к северу от Скалистого хребта Пастбищной и Лесистой куэст, разделенных узкими продольными депрессиями.

Создание геопарка изначально предполагает наличие ценных геологических объектов и процессов, поэтому в основу карт геопарка положена геологическая карта м-ба 1: 50 000 для территории Горной Осетии [Ольховский и др., 1998].

Конструкция планшетов для территории геопарка создавалась по единой технологии в программах CorelDRAW, Photoshop и Surfer: из открытого источника была взята топооснова-макет в растровом формате, на которой отображается цифровая модель рельефа (м-б 1: 100 000) соответствующей территории. Цифровая модель выполнена в WGS 84.

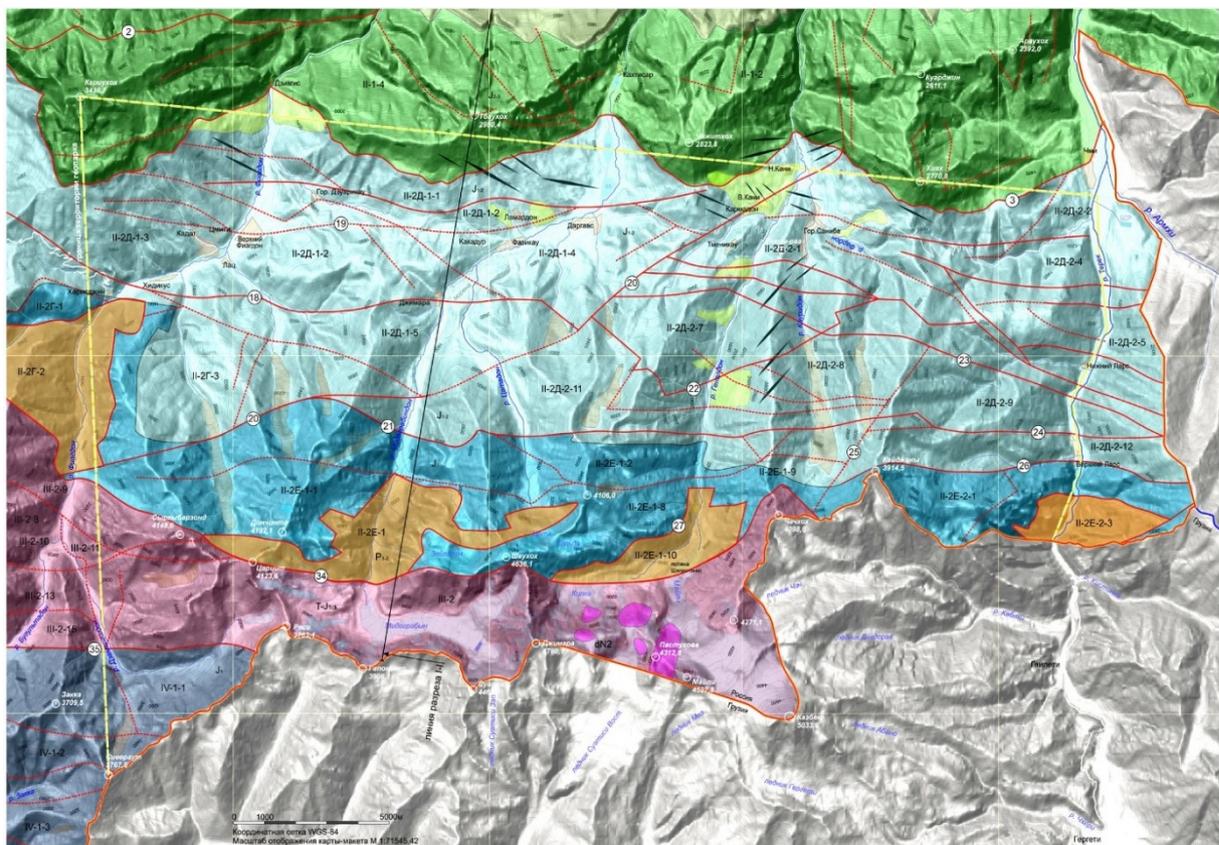
Затем для этой же территории был взят космический снимок GOOGLE (WGS 84) и наложен на топооснову-макет отдельным слоем. Для корректного совмещения к космическому снимку была применена опция регулируемой прозрачности.

Следующим действием было масштабирование растров, совмещение их по координатам горных вершин и закрепление в границах планшета. Все тематические карты геопарка были выполнены на единой основе в соответствии с описанной методикой (в частности, структурно-геологическая карта геопарка, рис. 2).

Векторизация линий дорожной сети, русел рек, контуров лесных массивов и ледово-фирновых образований, границ поселков и береговой линии водоемов выполнялась по космическому снимку GOOGLE 2019 г.

Трассировка туристических маршрутов привязывалась к дорожной сети в случае экскурсионных вариантов. Маршруты спортивного горного туризма наносились по описа-

ниям и абрисам из первоисточников. Все эти действия были выполнены по космическому снимку в одном файле. Каждый комплект однородных векторных объектов собран в отдельном слое. Слой с космическим снимком гасился, и снятая с него ситуация оказывалась на фоне карты-макета рельефа. В соответствии с тематикой планшета показываются нужные слои, и файл экспортируется в растровом формате под собственным именем. Достаточное разрешение космического снимка позволяет дешифровать исторические архитектурные объекты и корректно обозначать их местоположение. Перенос на карту-макет специальной информации (геологической, опасных процессов, геоморфологической) осуществлялся аналогичным приемом с соответствующих картографических документов. Опция полупрозрачности заливки площадных объектов позволяет видеть их гипсометрические уровни, что значительно обогащает полноту восприятия.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- | | | | | | |
|---|--|---|---|---|---------------------|
|  | - нижняя глинистая-песчановая формация, карбонатный флиш (II-1-1) |  | - микситы сложного строения по терригенным и магматическим формациям (III-1-2; III-1-3) |  | - оползневые склоны |
|  | - известняковая (II-1-2) |  | - карбонатный флиш южного склона (IV-2) |  | - сейсмодислокации |
|  | - формация глинистых сланцев северной депрессии (II-2А;Б;Г;Д;Е) |  | - гранито-гнейсовая (II-2Е-2) | | |
|  | - формация глинистых сланцев северной депрессии (II-2Е-1; II-2Е-2) |  | - диоритовая (dN2) | | |
|  | - туффито-песчаная, сероцветная моласса (II-2Г-2; II-2Е-1) |  | - ледники | | |

Рис. 2. Структурно-тектоническая карта геопарка «Казбекско-Джimarайский» (м-б 1: 100 000)
Fig. 2. Structural-tectonic map of the “Kazbek-Dzhimaraysky” geopark (scale 1: 100 000)

Любая территория, претендующая на статус «геопарк», обладает собственными уникальными особенностями. Геопарк «Казбекско-Джигарайский» — единый геолого-культурный комплекс, раскрывающий все этапы происхождения и формирования восточной части Центрального Кавказа, начиная с палеозоя и заканчивая последним историческим этапом антропогена.

На территории геопарка отмечается достаточно высокая концентрация геолого-геоморфологических и гидрологических объектов, часть которых указана на карте геологических памятников и уникальных геологических объектов Всероссийского геологического института¹. Среди них: Ермоловский камень — второй по величине валун в Европе, останец подводного вулканизма, Кармадонская известняковая стена, Нунатак-Хицан, сталактитовые пещеры Пастбищного и Скалистого хребтов, Кармадонские горячие источники. Еще целый ряд объектов включен в Перечень памятников природы РСО — Алания².

По данным комитета по охране и использованию объектов культурного наследия РСО — Алания³, на территории геопарка расположено 152 объекта федерального значения и огромный перечень объектов истории культуры и архитектуры регионального значения, а также множество археологических объектов.

Территория Казбекско-Джигарайского массива, как «лаборатория под открытым небом», с высокой степенью динамичности, интенсивности и разнообразием естественных процессов интересна и для природоведов, и обществоведов.

Исследования Казбекского вулканического очага и систематический контроль за сейсмическими явлениями района осуществляют сотрудники Геофизического института Владикавказского научного центра Российской академии наук. После обвала ледника Колка ученые географического факультета Московского государственного университета осуществляют мониторинг состояния ложа ледника и прилегающих ледовых полей. Представители Института физики Земли ведут наблюдения за движением литосферных плит.

Археологи исследуют культурные слои в пещерах. Институт горного и предгорного сельского хозяйства имеет опытные поля на территории геопарка. Студенты из различных регионов России приезжают на практику в горы Осетии. Студенты Северо-Осетинского государственного университета проходят практику на стационаре, расположенном в Даргавской котловине; там же планируется создать образовательный центр для школьников.

Сами геологические объекты и создаваемые ими природно-культурные комплексы и ансамбли привлекают массы самостоятельных и организованных туристов. Наиболее посещаемые объекты (Даргавский некрополь, подножье Мидаграбинских водопадов, Верхние и Нижние Кармадонские горячие источники и многие другие природные и историко-архитектурные объекты) часто подвергаются негативному воздействию неорганизованных туристов и могут представлять опасность для здоровья посетителей. Например, в процессе принятия горячих ванн Кармадонских источников. Одной из причин данной проблемы является почти полное отсутствие информации о свойствах и возможных рисках, о культурно-историческом значении и правилах поведения на объектах и маршрутах.

Функциональное зонирование территории планируемого геопарка с учетом геологических, экологических, этнокультурных и туристско-рекреационных факторов должно

¹ Карта геологических памятников и уникальных геологических объектов ВСЕГЕИ. Электронный ресурс: https://rasterdb.vsegei.ru/raster_info.php?id=9103 (дата обращения 17.03.2024)

² Постановление Правительства Республики Северная Осетия — Алания от 22 февраля 2008 г. № 31. Электронный ресурс: <https://docs.cntd.ru/document/819041206> (дата обращения 18.03.2024)

³ Сайт Комитета по охране и использованию объектов культурного наследия Республики Северная Осетия — Алания. Электронный ресурс: <https://okn.alania.gov.ru/pages/161> (дата обращения 18.03.2024)

сыграть положительную роль в организации безопасного туризма, управлении туристскими потоками и упорядочении использования памятных объектов (рис. 3).

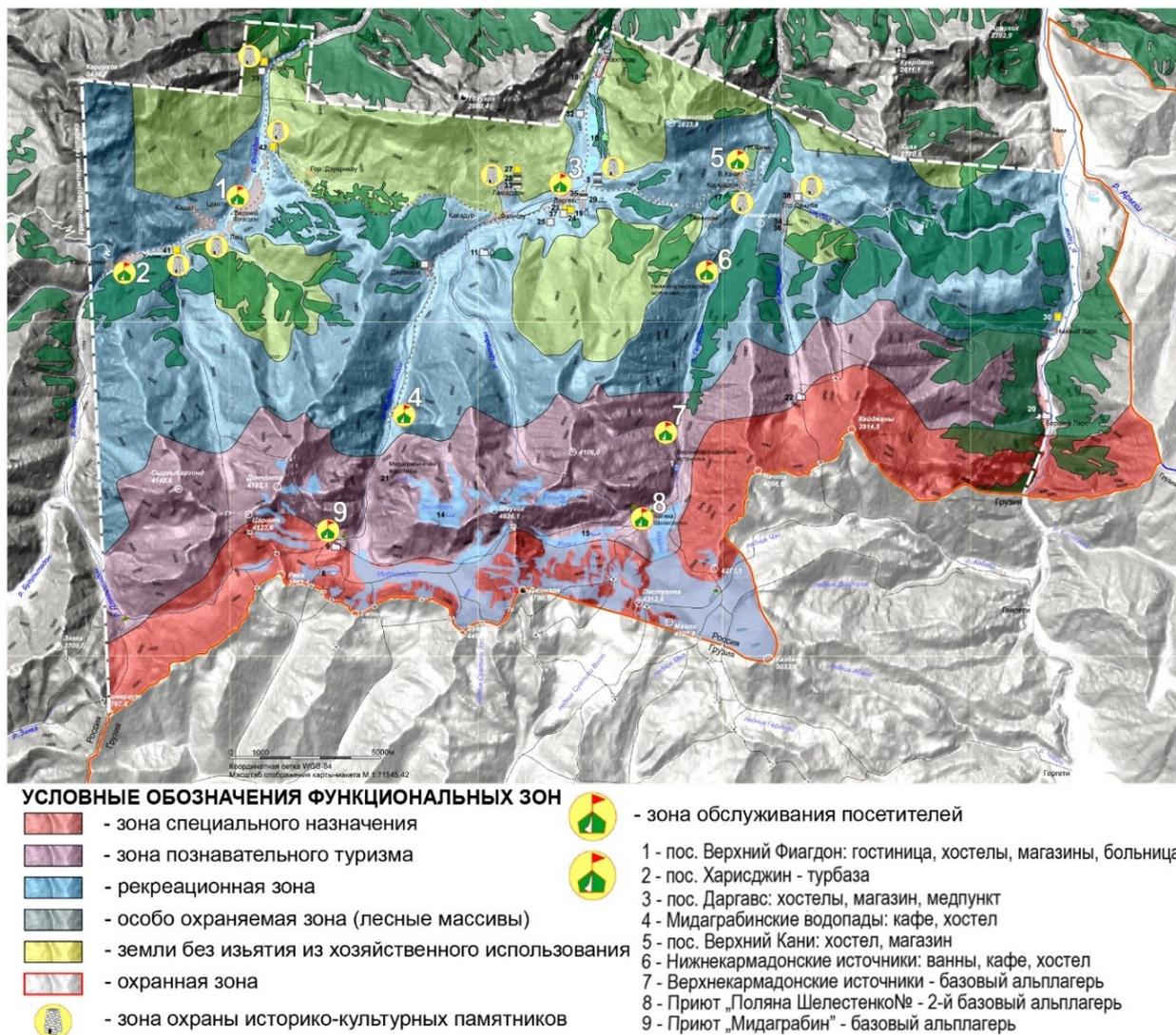


Рис. 3. Скриншот 3D-карты функционального зонирования территории планируемого геопарка «Казбекско-Джimarайский» (м-б 1: 100 000)

Fig. 3. Screenshot of 3D map of functional zoning of the territory of the planned geopark “Kazbek-Dzhimaraysky” (scale 1: 100 000)

- 1. Зона специального режима** — зона, прилегающая к государственной границе России. Посещение зоны возможно по специальному разрешению от Пограничной службы ФСБ России для проведения:

 - мероприятий по горным видам спорта (альпинизму, горному туризму, скалолазанию, ледолазанию);
 - научно-исследовательских работ (по темам из списка наук о Земле);
 - природоохранной деятельности соответствующих государственных служб.

Любая иная деятельность, в т. ч. и рекреационная, запрещается.
- 2. Особо охраняемая зона** — зона обеспечения условий для сохранения отдельных природных комплексов, таких как лесные массивы, заросли кустарников эндемичных

растений и объекты статуса «природный памятник». Возможно посещение при условии строгого регулирования по специально оборудованным маршрутам без ночлега.

3. **Зона познавательного туризма** — зона организации экологического просвещения и знакомство с достопримечательными объектами. Запрещено какое бы то ни было нарушение эстетического восприятия ландшафтов, нарушение местообитаний и путей миграций животных. В границах этой зоны разрешается:
 - оборудование маршрутов разного типа, включая их маркировку и создание малых архитектурных форм;
 - устройство стоянок для отдыха и ночлега;
 - оборудование естественных или искусственных смотровых площадок и экспозиционных участков для наблюдения за животными;
 - оборудование мест для купания и отдыха на воде, строительство причалов;
 - прокладка и оборудование экологических троп, в т. ч. учебно-воспитательных;
 - создание информационных центров и пунктов.
4. **Рекреационная зона** — зона создания условий для отдыха в природной обстановке. В рекреационной зоне развивается дорожно-тропиночная сеть, строятся автостоянки, обустраиваются площадки и места отдыха. Ночлег и длительные остановки разрешаются в специально отведенных и оборудованных местах.
5. **Зона охраны историко-культурных объектов** — зона обеспечения условий для сохранения историко-культурных объектов, рекреационная деятельность согласовывается с государственными органами охраны. Размещение и архитектурное оформление объектов не должно нарушать исторический облик ландшафта.
6. **Зона обслуживания посетителей** — зона размещения мест ночлега, палаточных лагерей и иных объектов туристского сервиса, культурного, бытового и информационного обслуживания посетителей. Создается в планировочных узлах, чаще всего приуроченных к населенным пунктам или учреждениям отдыха. Здесь могут быть построены стационарные объекты туристского сервиса круглогодичного и сезонного действия (гостиницы, мотели, кемпинги и приюты), эколого-информационные центры (визит-центры), музеи природы. Здесь строятся объекты культурно-бытового назначения и административно-хозяйственной инфраструктуры, оборудуются подъездные пути и автостоянки, обустраиваются пляжные территории.
7. **Зона хозяйственного назначения** — зона осуществления хозяйственной деятельности, необходимой для обеспечения функционирования национального парка. В национальных парках, создаваемых в районах проживания коренного населения, выделяется территория традиционного природопользования. Режим данной зоны направлен на поддержание устойчивого природопользования, в т. ч. развитие кустарного производства и народных промыслов, своевременное восстановление изымаемых природных ресурсов, применение экологически чистых методов в сельском хозяйстве и сохранение облика сложившихся культурных ландшафтов. Здесь запрещается строительство новых хозяйственных сооружений и объектов.

Создание геопарка «Казбекско-Джимарайский» привело бы к полному покрытию горной части РСО — Алания особо охраняемыми территориями.

Таким образом, площадные элементы природно-экологического каркаса РСО — Алания формируются системой разных форм ООПТ и лесопокрытыми территориями.

Основные особо охраняемые природные территории расположены в центральной и западной горной частях республики — это объединенные в единую форму, названную

«Заповедная Осетия — Алания», Северо-Осетинский государственный природный заповедник, комплексный федеральный заказник «Цейский» и национальный парк «Алания».

Западная часть «Заповедной Осетии — Алании» (бывший Национальный парк «Алания») развивается как туристская дестинация, находящаяся на стадии формирования рынка туристских услуг [Шепакин и др., 2012]. Благодаря устойчивому росту числа туристов, привлекаемых красотой природы и историко-культурными памятниками, предприниматели обязаны развивать конкурентоспособную инфраструктуру.

Центральная часть горной области — бывший Северо-Осетинский государственный природный заповедник функционирует в привычном заповедном режиме, проводя научные исследования и обеспечивая соблюдение природоохранных требований в процессе экологических туров по своей территории.

Восточная часть — планируемый геопарк будет сочетать и природоохранный режим, и научную деятельность, и поддерживать традиционное природопользование, и вовлекать местное население в развитие разнообразных видов туризма.

ООПТ в предгорной и равнинной частях республики представлены зоологическими заказниками регионального значения: «Турмонский», «Змейско-Николаевский» и «Заманкульский», приуроченными к низкогорным широколиственно-лесным поясам.

Помимо ООПТ, охране подлежат все среднегорные и низкогорные леса на склонах северной и северо-западной экспозиции, окаймляющие с юга, юго-востока и северо-запада Северо-Осетинскую наклонную равнину. Этот «зеленый» каркас следует дополнить переувлажненными ландшафтами с пойменными мелколиственными лесами в северо-западной части наклонной равнины и пойменными лесами долины р. Терек в степной зоне на севере республики (рис. 4).

Сюда же необходимо включить два небольших по площади объекта, имеющих большое научное и природоохранное значение:

1. Тарское торфяное болото (площадью 20 га), образовавшееся на месте грабена — опустившегося блока Пастбищного хребта, на правом берегу р. Терек. Признано редким палеоботаническим памятником и ценным объектом научной информации, спорово-пыльцевой материал которого позволил уточнить историю флоры Кавказа в голоцене¹.
2. Озеро-водохранилище Бекан (площадью 65 га), расположенное в северо-западной части предгорной равнины на левобережье Терека. Водоем образовался в месте разгрузки подземных вод четвертичных отложений — озеро питают более 170 источников чистой пресной воды. С 1951 г. озеро превращено в водохранилище суточного регулирования малой Беканской ГЭС. Не замерзающее зимой водохранилище привлекает на зимовку водоплавающих птиц, численность которых в отдельные годы достигала 8,5 тыс. особей². Благодаря этому водохранилище Бекан отнесено к водно-болотным угодьям и внесено в перечень объектов, соответствующих требованиям Рамсарской конвенции.

Линейные элементы природно-экологического каркаса образует дорожно-транспортная сеть РСО — Алания. Большая часть автодорог федерального, регионального и местного значения имеет полезащитные лесные полосы. Сравнительно недавно проложенные федеральные трассы имеют бетонные отбойники, и их озеленение затруднено. В горные ущелья ведут асфальтированные, хорошего качества автодороги. По долинам

¹ Палиопамятники природы. Памятники природы Северной Осетии. Электронный ресурс: <http://kmvline.ru/lib/14/31.php> (дата обращения 19.03.2024)

² Водно-болотные угодья России. Водохранилище Бекан. Электронный ресурс: <https://www.fesk.ru/wetlands/334.html> (дата обращения 19.03.2024)

Терека и Ардона проходят федеральные магистрали — Военно-Грузинская и Транскам, соответственно. На север, к пойменным лесам Терека и культурно-историческому центру, г. Моздок ведет прямая асфальтированная дорога, озеленение которой еще предстоит, т. к. она пересекает Сунженский и Терский хребты, на которых сохранились участки нетронутой разнотравно-злаковой степи с краснокнижными видами растений и животных.

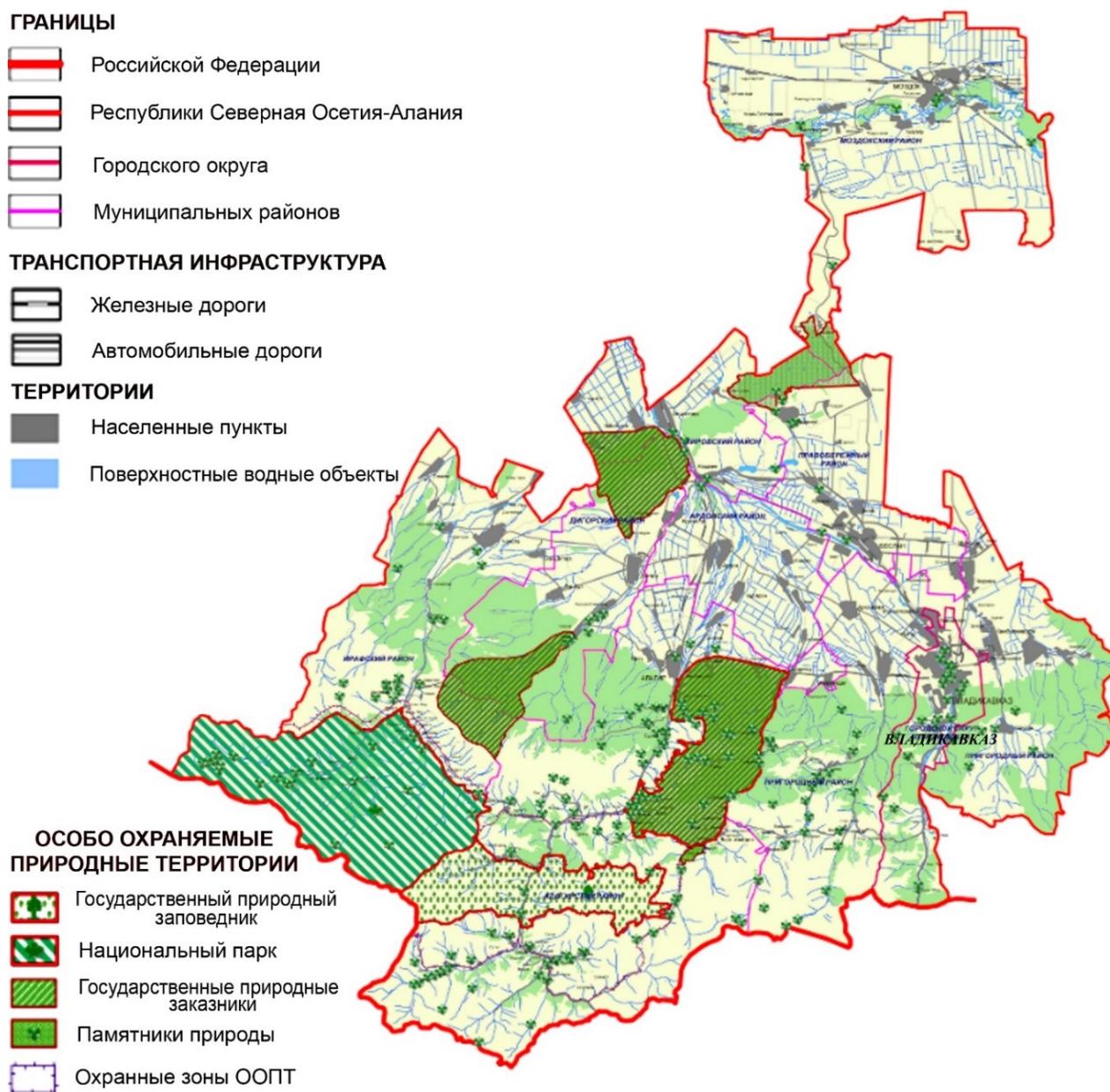


Рис. 4. Карта-схема природно-экологического каркаса РСО — Алания (м-б 1: 750 000)
Fig. 4. Map of the natural and ecological framework of Republic of North Ossetia — Alania (scale 1: 750 000)

ВЫВОДЫ

Предложенная структура природно-экологического каркаса направлена на создание благоприятной среды жизнедеятельности местного населения и гостей республики, на сохранение уникальных природных территорий и объектов культурно-исторического наследия и на развитие безопасного туризма.

Расширение площади территорий с особым режимом охраны за счет создания геопарка в восточной части горной области, включения в состав ООПТ водохранилища Бекан и Тарского болота с приданием ему статуса «памятник природы» увеличит общую площадь особо охраняемых природных территорий более чем на 10 %, что составит более 30 % от площади республики. ООПТ позволяют поддерживать высокий уровень биоразнообразия, которым обладает территория республики, контролировать и регулировать численность дикой фауны, осуществлять мониторинг изменения видового состава флоры и фауны, расширения границ лесного пояса и деградации оледенения на фоне глобальных климатических изменений.

Создание геопарка на территории РСО — Аляния необходимо для привлечения внимания местного населения и бизнес-сообщества к уникальным природным и этнокультурным объектам для их охраны и организации шадящей туристической инфраструктуры, учебно-просветительских центров, службы охраны и ухода за памятниками, расширения туристических услуг в «опорных» точках. Важнейшей организационной задачей функционирования геопарка является управление и регулирование потоков посетителей и разумная ценовая политика. Действующий геопарк, с включением в него существующей этнокультуры (местные обычаи и обряды, празднества, ритуалы, верования, кухня и т. п.), может стать фактором, способствующим созданию новых рабочих мест и повышению уровня жизни населения, сдерживающим отток населения из горной сельской местности.

Единый природно-экологический каркас будет способствовать поддержанию чистой и здоровой среды обитания, которая вместе с туристскими аттракторами будет содействовать развитию разнообразных видов туристической деятельности и в целом положительно скажется на социально-экономическом развитии региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акбашев А. Р., Абдрашитов Р. Х., Ардисламов Ф. Р., Белан Л. Н., Богдан Е. А. Полежанкина П. Г., Фархутдинов И. М., Фархутдинов В. М. Геопарк Янган-тау. Геологический вестник, 2018. № 1. С. 3–12.

Ардисламов Ф. Р., Лукашина Н. А., Третьякова Е. А. Геопарк «Торатау» — объект эффективного взаимодействия с обществом и рационального использования памятников природы. Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий, 2019. № 7. С. 206–208.

Ардисламов Ф. Р., Лукашина Н. А., Третьякова Е. А. Геопарк «Торатау»: геологическое наследие как объект экологического туризма. Труды Кольского научного центра РАН, 2019. Т. 10. № 6(1). С. 25–32.

Богдан Е. А., Белан Л. Н., Фролова И. В., Галиев А. Ф. Методика инвентаризации объектов геологического наследия как инструмент управления геопарками. Устойчивое развитие горных территорий, 2022. Т. 14. № 2(52). С. 209–217.

Васьков И. М., Караев Ю. И., Кусова Ж. Г. Состояние и возможности современной геологической отрасли и глобальные геопарки ЮНЕСКО. Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки, 2021. Т. 15. № 4. С. 19–26. DOI: 10.31161/1995-0675-2021-15-4-19-26.

Джамирзоев Г. С., Идрисов И. А., Атаев З. В. Научные предпосылки создания геопарка ЮНЕСКО «Сарыкум и Нарат-Тюбе». Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки, 2017. Т. 11. № 4. С. 26–34.

Злотникова Т. В. Международный и региональный опыт развития геопарков как правовая основа изменения экологического законодательства. Правовое государство: теория и практика, 2021. № 4(66). С. 28–46.

Кислов Е. В., Кислов А. Е., Базарова Л. Д. Памятники природы проектируемого геопарка «Долина Селенги». Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов, 2023. № 4. С. 24–51. DOI: 10.24412/2949-4052-2023-4-24-51.

Корф Е. Д. Геопарки и геотуризм как инструмент для достижения устойчивого развития сельской местности. Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий: Материалы Международной научно-практической конференции, 2014. № 1. С. 601–603.

Корф Е. Д. Геопарк как платформа эффективного взаимодействия общества и природы. Наука и туризм: стратегии взаимодействия, 2015. № 4(2). С. 5–9.

Красная книга Республики Северная Осетия — Алания. Владикавказ: Перо и Кисть, 2022. 356 с.

Лунева Е. В. Государственно-частное партнерство в сфере развития рекреации, туризма и спорта на земельных участках в особо охраняемых природных территориях. Юрист, 2014. № 2. С. 27.

Лунева Е. В. Организация геопарков в России и особенности их правового режима. Lex russica, 2021. Т. 74. № 9. С. 32–43. DOI: 10.17803/1729-5920.2021.178.9.032-043.

Ольховский Г. П., Тиболов С. М., Троцак С. А. и др. Составление специализированной геологической основы м-б 1: 50 000 для прогнозно-металлогенической карты Горной Осетии. Владикавказ: Отчет ГПП «Севосгеологоразведка», 1998.

Панченко Е. М., Дюкарев А. Г. Экологический каркас как природоохранная система региона. Вестник Томского государственного университета, 2010. № 340. С. 216–221.

Редькин А. Г., Отто О. В. Геопарк как новое направление развития туризма в горных районах Алтайского края. Наука и туризм: стратегии взаимодействия, 2015. № 4(2). С. 9–15.

Тебиева Д. И., Тавасиев Р. А. Пояс каменных глетчеров в структуре высотной поясности высокогорий восточной части Центрального Кавказа. Устойчивое развитие горных территорий, 2014. Т. 6. № 2. С. 76–84.

Тебиева Д. И., Чииев В. Т., Туаев Г. А. Экологическое мышление древних осетин как стратегия выживания. Материалы VI Международной научно-практической конференции «Историческая география России: концептуальные основы комплексных полимасштабных исследований регионов». СПб., 2020. С. 308–313.

Туаев Г. А., Дряев М. Р., Тебиева Д. И. Оценка рекреационного потенциала территории РСО — Алания. Устойчивое развитие горных территорий, 2013. Т. 5. № 4. С. 76–82.

Щепакин М. Б., Басюк А. С. Туристская дестинация: характерные черты и этапы развития. Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2014. № 97. С. 1023–1036.

Dobronosov V., Tebieva D., Kebalova L. Living standards in North Ossetia — Alania through the prism of economic processes. Bulletin of Geography. Socio-Economic Series, 2020. V. 50. No. 50. P. 73–82. DOI: 10.2478/bog-2020-0033.

REFERENCES

- Akbashev A. R., Abdrashitov R. H., Ardislamov F. R., Belan L. N., Bogdan E. A., Polezhankina P. G., Farkhutdinov I. M., Farkhutdinov V. M.* Geopark Yangan-tau. *Geologicheskii Vestnik (Geological Bulletin)*, 2018. No. 1. P. 3–12 (in Russian).
- Ardislamov F. R., Lukashina N. A., Tretyakova E. A.* Geopark “Toratau” is an object of effective interaction with society and the rational use of natural monuments. *Geology, geoecology and resource potential of the Urals and adjacent territories*, 2019. No. 7. P. 206–208 (in Russian).
- Ardislamov F. R., Lukashina N. A., Tretyakova E. A.* Geopark “Toratau”: geological heritage as an object of ecological tourism. *Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2019. V. 10. No. 6(1). P. 25–32 (in Russian).
- Bogdan E. A., Belan L. N., Frolova I. V., Galiev A. F.* Methods of inventory of geological heritage sites as a tool for managing geoparks. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2022. V. 14. No. 2(52). P. 209–217 (in Russian).
- Dobronosov V., Tebieva D., Kebalova L.* Living standards in North Ossetia — Alania through the prism of economic processes. *Bulletin of Geography. Socio-Economic Series*, 2020. V. 50. No. 50. P. 73–82. DOI: 10.2478/bog-2020-0033.
- Dzhamirzoev G. S., Idrisov I. A., Ataev Z. V.* Scientific prerequisites for the creation of the UNESCO geopark “Sarykum and Narat-Tyube”. *Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact Sciences*, 2017. V. 11. No. 4. P. 26–34 (in Russian).
- Kislov E. V., Kislov A. E., Bazarova L. D.* Natural monuments of the planning geopark “Selenga Valley”. *Geology. Proceedings of the Department of Earth Sciences and Natural Resources*. 2023. No. 4. P. 24–51 (in Russian). DOI: 10.24412/2949-4052-2023-4-24-51.
- Korf E. D.* Geoparks and geotourism as a tool to achieve sustainable rural development. *Innovations Based on Information and Communication Technologies: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, 2014. No. 1. P. 601–603 (in Russian).
- Korf E. D.* Geopark as a platform for effective interaction between society and nature. *Science and Tourism: Interaction Strategies*, 2015. No. 4(2). P. 5–9 (in Russian).
- Luneva E. V.* Public-private partnership in the development of recreation, tourism and sports on land in specially protected natural areas. *Jurist*, 2014. No. 2. P. 27 (in Russian).
- Luneva E. V.* Organization of geoparks in Russia and the peculiarities of their legal regime. *Lex Russica*, 2021. V. 74. No. 9. P. 32–43 (in Russian). DOI: 10.17803/1729-5920.2021.178.9.032-043.
- Olkhovskiy G. P., Tibilov S. M., Troshchak S. A.* et al. Drawing up a specialized geological basis of scale 1: 50 000 for the forecast metallogenic map of Mountain Ossetia. *Vladikavkaz: Report of the State Geologic Enterprise “Sevosgeologorazvedka”*, 1998 (in Russian).
- Panchenko E. M., Dyukarev A. G.* Ecological framework as the environmental system of the region. *Tomsk State University Journal*, 2010. No. 340. P. 216–221 (in Russian).
- Red Book of the Republic of North Ossetia — Alania. Vladikavkaz: Pero i Kist’ (Pen and Brush)*, 2022. 356 p. (in Russian).
- Redkin A. G., Otto O. V.* Geopark as a new direction in the development of tourism in the mountainous regions of the Altai Territory. *Science and Tourism: Interaction Strategies*, 2015. No. 4(2). P. 9–15 (in Russian).
- Shchepakina M. B., Basyuk A. S.* Tourist destination: characteristic features and stages of development. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, 2014. No. 97. P. 1023–1036 (in Russian).

Tebieva D. I., Chshiev V. T., Tuaeov G. A. Ecological thinking of ancient Ossetians as a survival strategy. Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference “Historical geography of Russia: the conceptual foundations of comprehensive multi-scale studies of regions”. St. Petersburg, 2020. P. 308–313 (in Russian).

Tebieva D. I., Tavasiev R. A. Belt of stone gletchers in the structure of the high-altitude belt of the highlands of the eastern part of the Central Caucasus. Sustainable Development of Mountain Territories, 2014. V. 6. No. 2. P. 76–84 (in Russian).

Tuaeov G. A., Dryaev M. R., Tebieva D. I. Assessment of the recreational potential of the territory of North Ossetia — Alania. Sustainable Development of Mountain Territories, 2013. V. 5. No. 4. P. 76–82 (in Russian).

Vaskov I. M., Karaev Yu. I., Kusova Zh. G. The state and possibilities of the modern geological industry and UNESCO global geoparks. Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact Sciences, 2021. V. 15. No. 4. P. 19–26. DOI: 10.31161/1995-0675-2021-15-4-19-26 (in Russian).

Zlotnikova T. V. International and regional experience in the development of geoparks as a legal basis for changing environmental legislation. The Rule of Law State: Theory and Practice, 2021. No. 4(66). P. 28–46 (in Russian).

УДК: 528.9+004.75

А. А. Ямашкин¹, С. А. Ямашкин²

ГЕОПОРТАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

АННОТАЦИЯ

В статье представлены ключевые аспекты решения задачи управления территориально-распределенными организационными системами на основе геопорталов и технологий Интернета вещей. Показано, что использование технологий Интернета вещей позволяет сформировать на основе геопорталов системы диспетчеризации, существенно расширяя реестр вариантов использования геопорталов в решении задач управления территориально-распределенными организационными системами. Геопортальная программная платформа для управления пространственно-распределенными ресурсами состоит из серверной части, формируемой на основе арендуемой инфраструктуры, на которой размещены программные модули, разработанные в ходе работы над проектом. Геопортальная платформа как комплекс программно-аппаратных средств включает в себя геопортальную систему и сеть управления пространственно-распределенными ресурсами. Сеть управления пространственно-распределенными ресурсами — вычислительная сеть, функционирующая на основе набора устройств Интернета вещей разного типа и решающая задачи сбора данных о природно-социально-производственных системах и воздействия на внешнюю среду за счет дистанционного запуска исполнительных устройств. Геопортальная платформа для управления пространственно-распределенными ресурсами, решающая задачу сбора данных на основе интеграции с компонентами Интернета вещей, включает в себя геопортальную систему и сеть управления пространственно-распределенными ресурсами для решения задачи управления природно-социально-производственными системами. Управление природно-социально-производственными системами происходит на основе решения задачи мониторинга посредством датчиков и воздействия на основе исполнительных устройств. Использование геопортальных систем и технологий Интернета вещей позволяет решить задачу централизованного автоматизированного оперативного управления процессами, протекающими в системах значительного территориального охвата.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геопорталы, Интернет вещей, управление организационными системами, проектирование геоинформационных систем, мониторинг территориально распределенных систем, удаленное управление устройствами

¹ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, ул. Большевикская, д. 68, Саранск, Россия, 430005, *e-mail: yamashkin56@mail.ru*

² Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, ул. Большевикская, д. 68, Саранск, Россия, 430005, *e-mail: yamashkinsa@mail.ru*

Anatoliy A. Yamashkin¹, Stanislav A. Yamashkin²

GEOPORTALS AND TECHNOLOGIES OF THE INTERNET OF THINGS AS A TOOL FOR MANAGING ORGANIZATIONAL TERRITORIALLY DISTRIBUTED SYSTEMS

ABSTRACT

The article presents key aspects of solving the problem of managing geographically distributed organizational systems based on geoportals and Internet of Things technologies. It is shown that the use of Internet of Things technologies makes it possible to create dispatch systems based on geoportals, significantly expanding the list of options for using geoportals in solving problems of managing geographically distributed organizational systems. A geoportal software platform for managing spatially distributed resources consists of a server part, formed on the basis of a rented infrastructure, which hosts software modules developed during the work on the project. The geoportal platform as a complex of software and hardware includes a geoportal system and a network for managing spatially distributed resources. The management network for spatially distributed resources is a computer network that operates on the basis of a set of Internet of Things devices of various types and solves the problem of collecting data about natural, social and production systems and influencing the external environment through remote launch of actuators. A geoportal platform for managing spatially distributed resources, which solves the problem of data collection based on integration with components of the Internet of Things, includes a geoportal system and a network for managing spatially distributed resources to solve the problem of managing natural-social-production systems. Management of natural-social-production systems occurs on the basis of solving the problem of monitoring through sensors and influence based on actuators. The use of geoportal systems and Internet of Things technologies makes it possible to solve the problem of centralized automated operational management of processes occurring in systems of significant territorial coverage.

KEYWORDS: geoportals, Internet of things, management of organizational systems, design of geographic information systems, monitoring of geographically distributed systems, remote device management

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий интеграции, обработки, анализа и распространения пространственных данных приводит к росту востребованности географической информации при решении задач управления в территориально-распределенных организационных системах. Так, важное значение в решении задачи усиления связанности территории Российской Федерации, определенной как приоритетное направление для реализации Стратегии научно-технологического развития РФ (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642), играют процессы внедрения и эффективного использования инфраструктур пространственных данных (ИПД), решающих задачи прогнозирования пространственных процессов, анализа структуры и состояния природных и социальных систем [Ямашкин и др., 2019]. В Постановлении Правительства Российской Федерации от 1 декабря 2021 г. № 2148 об утверждении государственной программы Российской Федерации «Национальная система пространственных данных» определена

¹ N. P. Ogarev Mordovian State University, 68, Bolshevistskaya str., Saransk, 430005, Russia,
e-mail: yamashkin56@mail.ru

² N. P. Ogarev Mordovian State University, 68, Bolshevistskaya str., Saransk, 430005, Russia,
e-mail: yamashkinsa@mail.ru

важность осуществления мероприятий, направленных на преодоление проблемы «ограниченного использования современных российских геоинформационных технологий, высокопроизводительной обработки пространственных данных».

Решение задач управления организационными территориально распределенными системами различного масштаба в настоящее время представляет основную цель проектирования, разработки и внедрения практико-ориентированных геопорталов [Gkonos et al., 2019]. Под термином «геопортал», согласно Национальному стандарту Российской Федерации ГОСТ Р 58570-2019 «Инфраструктура пространственных данных. Общие требования» понимается «информационная система, выполняющая роль единого пункта доступа к сервисам инфраструктуры пространственных данных, интерфейс которой обеспечивает с использованием сети Интернет доступ пользователей к информации для поиска пространственных данных и геосервисов по их метаданным, а также выполнения других функций в соответствии с его назначением и целевой аудиторией».

В настоящее время технологии Интернета вещей формируют основу для расширения вариантов использования геопортальных систем, открывают новые возможности их практико-ориентированного внедрения в деятельность организационных систем различного масштаба. Интернет вещей (Internet of Things, IoT), согласно Предварительному национальному стандарту Российской Федерации ПНСТ 518-2021 (ИСО/МЭК 20924:2018) «Информационные технологии. Интернет вещей. Термины и определения», определяется как «инфраструктура взаимосвязанных сущностей, систем и информационных ресурсов, а также служб, позволяющих обрабатывать информацию о физическом и виртуальном мире и реагировать на нее». Устройство Интернета вещей при этом определяется как «сущность системы Интернета вещей, которая обеспечивает связь с материальным миром через изменение или приведение в действие». Наборы подходов, заключающихся в развертывании системы устройств, собирающих информацию с датчиков и выполняющих целевые действия, позволяют решить две важные задачи — осуществление мониторинга природных и социальных систем значительного территориального охвата и дистанционное воздействие на эти системы. Совместное использование геопорталов и технологий Интернета вещей имеет перспективы для повышения эффективности решения задач управления организационными территориально распределенными системами [Львович и др., 2019].

Ключевым компонентом геопортальной системы традиционно выступают графические интерфейсы пользователя, основанные на использовании модуля цифровой карты, позволяющего решить задачу интерактивного комбинированного отображения различных тематических слоев, содержащих пространственные данные о природных, социальных и производственных системах. В настоящее время технологии Интернета вещей формируют основу для расширения вариантов использования геопортальных систем [Gopikumar et al., 2021], открывают новые возможности их практико-ориентированного внедрения в деятельность организационных систем различного масштаба [Laghari et al., 2021], позволяя решать следующие задачи:

- 1) мониторинг состояния территориально-распределенных объектов природных, социальных и производственных систем в режиме, близком к реальному времени, на основе сбора телеметрии с датчиков устройств Интернета вещей и визуализации данных посредством цифровой карты геопортала;
- 2) дистанционное централизованное управление территориально-распределенными устройствами Интернета вещей посредством отправки управляющих команд с использованием графических интерфейсов цифровой карты геопортала.

Ядро функционирования геопортальных систем в настоящее время выстраивается на основе использования микросервисов обработки, анализа и управления простран-

ственными данными. Хранилище пространственных данных должно быть основано на использовании мультимодельных систем управления базами данных, реализующих совместное обоснованное использование различных парадигм и подходов: реляционного, резидентного, колоночно-ориентированного.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Геопортальная платформа для управления пространственно-распределенными ресурсами состоит из серверной части, формируемой на основе арендуемой инфраструктуры, на которой размещены программные модули, разработанные в ходе работы над проектом. Для взаимодействия с системой необходим компьютер или смартфон с установленным современным веб-браузером и доступом в Интернет. Геопортальная платформа как комплекс программно-аппаратных средств включает геопортальную систему и сеть управления пространственно-распределенными ресурсами. Управление природно-социально-производственными системами происходит на основе решения задачи мониторинга посредством датчиков и воздействия на основе исполнительных устройств.

Сеть управления пространственно-распределенными ресурсами — это вычислительная сеть, функционирующая на основе набора устройств Интернета вещей разного типа и решающая задачи сбора данных об организационных территориально распределенных системах и воздействия на внешнюю среду за счет дистанционного запуска исполнительных устройств. Подсистема интеграции с внешними системами обеспечивает решение задачи мониторинга и дистанционного управления природно-социально-производственными системами. Подсистема интеграции с внешними системами получает данные от сети управления пространственно-распределенными ресурсами посредством прикладных программных интерфейсов на основе протокола передачи данных TCP/IP.

Геопортальная платформа для управления пространственно-распределенными ресурсами, решающая задачу сбора данных на основе интеграции с компонентами Интернета вещей, включает в себя геопортальную систему и сеть управления пространственно-распределенными ресурсами для решения задачи управления природно-социально-производственными системами. Геопортальная платформа содержит программно-аппаратные подсистемы, реализующие задачу хранения, обработки, анализа, визуализации пространственной информации о территориально-распределенных системах на основе графических интерфейсов пользователя и систем хранения данных, размещенных на серверах и взаимодействующих между собой и компьютерами пользователей посредством каналов связи вычислительной сети. Управление природно-социально-производственными системами происходит на основе решения задачи мониторинга посредством датчиков и воздействия на основе исполнительных устройств (рис. 1а).

Геопортальная система представляет собой программный комплекс, включающий в себя программные подсистемы (сервисы) и мультимодельное хранилище данных (рис. 1б). Взаимодействие геопортальной системы с сетью управления пространственно-распределенными ресурсами осуществляется на основе прикладных программных интерфейсов (API), взаимодействие с которыми происходит на основе протокола TCP/IP. Лицо, принимающее решение, взаимодействует с геопортальной системой на основе графических интерфейсов пользователя подсистем администрирования и визуализации пространственных данных, функционирующих на основе веб-технологий.

Реализация принципа инверсии зависимости для функционирования геопортальной платформы

Базовый алгоритм функционирования геопортальной системы, построенной на основе архитектурного паттерна MVC (Модель-Вид-Контроллер) [Ahmad et al., 2022],

основан на реализации принципа инверсии зависимости (Dependency Inversion Principle) объектно-ориентированного проектирования, который заключается в том, что системные модули верхнего уровня не зависят от модулей нижнего уровня и связаны за счет интерфейсов [O'Connell et al., 2018]. Обозначенный подход приводит к оптимизации метрик программного кода системы, в т. ч. зацепления и связности. Под «зацеплением» (coupling), согласно международному стандарту ISO/IEC/IEEE 24765:2017(E) от 2017 г., понимается степень взаимозависимости между модулями в компьютерной программе, а под «связностью» (cohesion) — мера силы связи элементов внутри модуля, определяющая степень связанности задач, выполняемых одним программным модулем. Важно понимать, что связность в силу своей природы противоположна зацеплению. Для хорошо структурированной и спроектированной системы характерно слабое зацепление, что в комбинации с сильной связностью позволяет получить высокие характеристики сопровождаемости информационной системы.

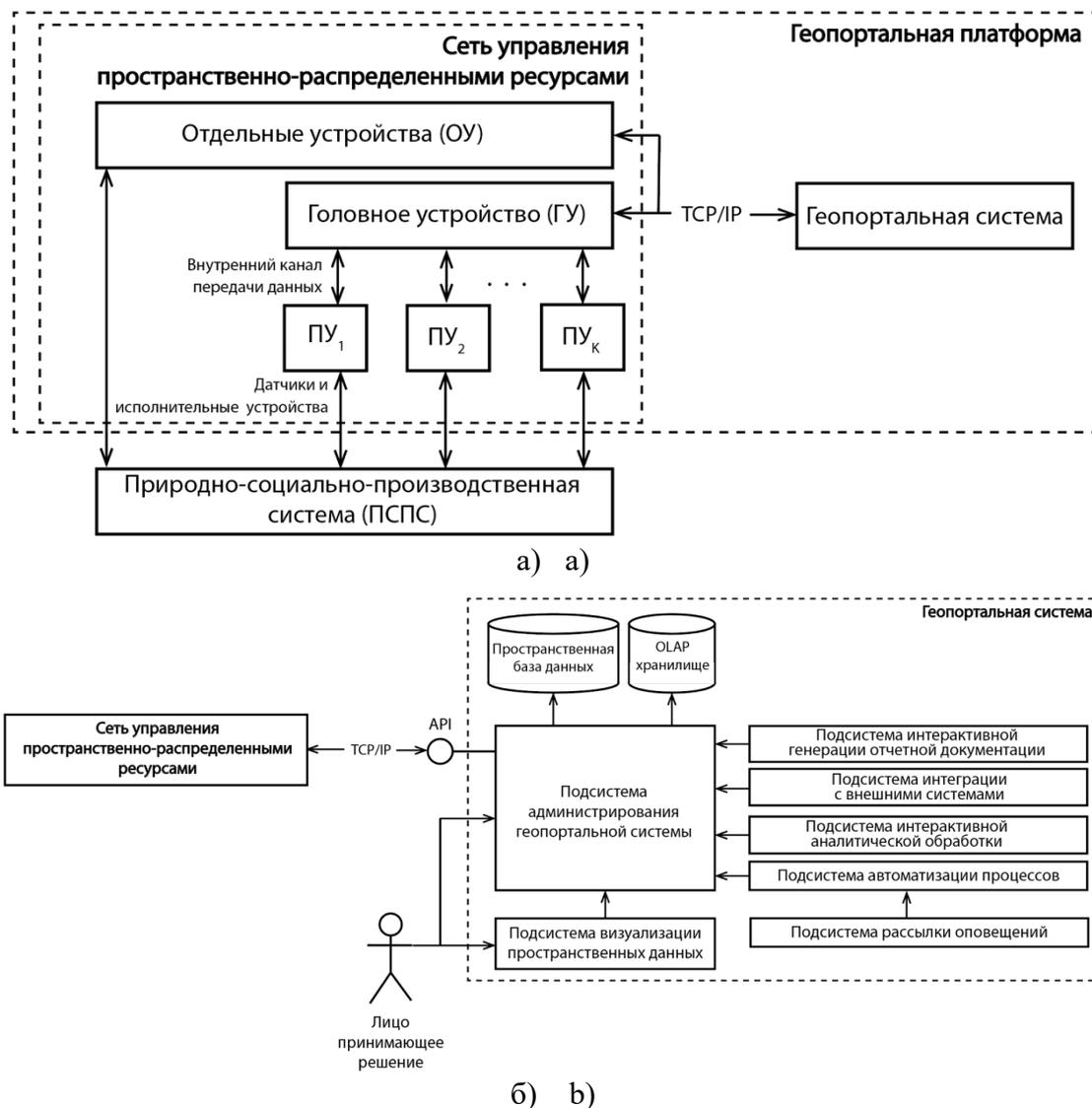


Рис. 1. Архитектурная организация: а) геопортальной платформы управления пространственно распределенными ресурсами и б) геопортальной системы
 Fig. 1. Architectural organization of: a) geoportals platform for managing spatially distributed resources and b) geoportals system

В рамках подсистемы администрирования геопортальной системы реализация принципа инверсии зависимости успешно достигнута следующими способами:

1. Введение интерфейсов для всех сервисов и компонентов: модели, представления и контроллеры, а также вспомогательные библиотеки имеют интерфейсы, определяющие способ взаимодействия с инкапсулированной логикой, при этом взаимодействие с каждым отдельным компонентом зависит от его интерфейсов, а не от конкретной реализации.
2. Использование принципа инверсии управления (Inversion of Control), при котором управление выполнением программы не ложится на конкретные используемые объекты, а, напротив, передается объектам, которые их вызывают. Это позволяет структурировать код системы, разделить логику по компонентам, сократить дублирование кода и повысить возможность его повторного использования, усилить тестируемость.

Подсистема администрирования геопорталов, реализованная на основе архитектурного паттерна MVC с применением принципа инверсии управления, позволяет разделить логику приложения на несколько отдельных изолированных компонентов (модели, контроллеры и представления) и централизованно управлять ими.

Компонентная структура геопортальной платформы организуется на основе архитектурного паттерна Модель-Вид-Контроллер, предполагающего разделение ключевых компонентов системы на сильно связанные внутри и слабо зацепленные модули манипулирования данными, организации графических интерфейсов и формирования программной логики системы. Диаграмма компонентов для подсистем геопортала представлена на рис. 2.

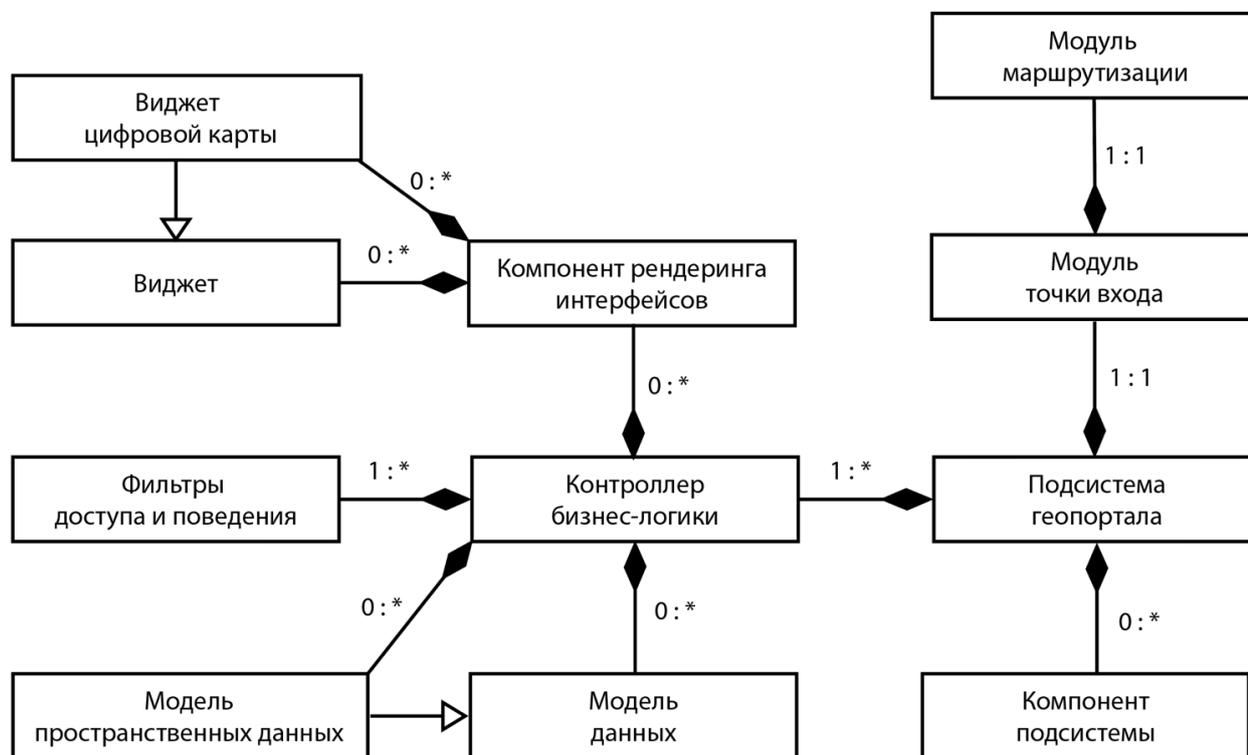


Рис. 2. Диаграмма компонентов для подсистем геопортальной системы
Fig. 2. Component diagram for geportal system subsystems

Контроллер бизнес-логики геопортальной подсистемы представляет собой компонент, определяющий последовательность этапов обработки запроса к системе посредством использования фильтров доступа и поведения, моделей данных и компонентов рендеринга интерфейсов для формирования ответного сообщения в форме инструкций построения графических интерфейсов пользователя или структур данных в форматах, пригодных для межмашинного взаимодействия. К контроллеру также могут быть интегрированы библиотеки с открытым исходным кодом.

Модели данных представляют собой компоненты, ориентированные на решение задачи реализации ключевых методов манипулирования данными геопортальной системы (создание, чтение, обновление, удаление). Оптимизация процесса управления данными осуществлена на основе паттерна объектно-реляционное отображение ORM (Object-Relational Mapping) и позволяет работать с данными как с объектом в соответствии с принципами объектно-ориентированного программирования [Sotiropoulos et al., 2021]. В виде отдельных классов, наследующих поведение моделей данных, реализованы модели пространственных данных, позволяющие манипулировать типами данных с пространственной геометрией, а также осуществлять пространственные запросы к хранилищу пространственных данных [Lee et al., 2017].

Компоненты рендеринга графических интерфейсов пользователя позволяют подготавливать данные геопортальной системы для их последующей визуализации в рамках веб-интерфейсов системы. Данный класс модулей реализуется на основе принципов шаблонизации и позволяет выстраивать объектную модель документа геопортальной системы на основе языка гипертекстовой разметки HTML. Визуальное оформление графических веб-интерфейсов происходит посредством использования каскадных таблиц стилей CSS, а для обеспечения динамического поведения использован язык программирования JavaScript. Отдельным способом реализации компонента рендеринга является компонент «виджет», формирующий графические интерфейсы для отдельного завершённого модуля, который может быть встроен в интерфейсы геопортальной системы. Использование виджетов позволяет достичь многократного использования кода. Отдельным типом виджета является цифровая карта, позволяющая решать задачу рендеринга данных о пространственно-распределённых объектах. Наконец, геопортальная подсистема может быть интегрирована с другими компонентами, которые в т. ч. могут сами по себе быть организованными на основе архитектурного паттерна Модель-Вид-Контроллер. В рамках геопортальной подсистемы могут быть использованы библиотеки с открытым исходным кодом.

Принципы построения сети управления распределёнными ресурсами

Сеть управления пространственно-распределёнными ресурсами представляет собой часть геопортальной платформы, выстраиваемую на основе набора устройств интернета вещей [Safari Bazargani et al., 2021]. Реализован вариант развертывания вычислительной сети управления на основе системы, состоящей из подчинённых и головных устройств. Устройства разработаны на основе модульной компонентной организации, позволяющей достичь качественного свойства расширяемости и создания новых типов устройств. Получение обозначенного преимущества достигается за счёт соблюдения принципов объектно-ориентированного проектирования: единственной ответственности, открытости к расширению, закрытости к внутренней модификации.

Подчинённое устройство (ПУ) включает в свой состав контроллер с программным обеспечением, реализующим возможность подключения датчиков для сбора измерений условий функционирования природно-социально-производственных систем и исполнительных устройств, решающих задачу воздействия на внешнюю среду (рис. 3а). Для

определения позиции подчиненного устройства контроллер использует GPS/GLONASS модуль. Устройство приема и передачи данных обеспечивает передачу данных с подчиненного устройства на головное в рамках сети управления пространственно-распределенными ресурсами по внутреннему каналу передачи данных.

Головное устройство (ГУ) принимает данные с подчиненных устройств и передает их на геопортальную систему посредством модуля передачи данных по TCP/IP (рис. 3б). Передача данных реализована на основе технология беспроводной передачи данных в Интернет на основе стандарта IEEE 802.11. Преимуществом предложенного комбинированного подхода, заключающегося в совместном использовании головного и подчиненного устройств, является получение возможности эффективного масштабирования сети управления пространственно-распределенными ресурсами. Подчиненные устройства не требуют привлечения сторонних провайдеров связи для обмена информацией по внутреннему каналу передачи данных. Это позволяет достичь получения набора преимуществ при эксплуатации сети. Во-первых, исключается эффект роста стоимости услуг сторонних провайдеров связи при подключении наборов новых устройств. Во-вторых, реализуется возможность построения сети в рамках территориальных систем, не имеющих доступа к сетям передачи данных сторонних провайдеров. Для организации внутреннего канала передачи данных используются устройства приема и передачи данных LoRa (Long Range), основанные на технологии модуляции маломощной сети [Gkotsiopoulos et al., 2021]. Преимуществом использования этой технологии является возможность развертывания сети в рамках значительного радиуса, измеряемого километрами в зависимости от территориальных особенностей природно-социально-производственных систем. При этом скорость передачи данных характеризуется невысокими значениями, что удовлетворительно в условиях решения задачи передачи данных с датчиков и управляющих команд.

Отдельное устройство (ОУ), как и подчиненное устройство сети управления пространственно-распределенными ресурсами, функционирует на основе модульной организации и включает контроллер, управляемый программным обеспечением для решения задачи сбора данных с датчиков и запуска исполнительных устройств (рис. 3в). Устройство снабжено модулем передачи данных по TCP/IP, что позволяет при необходимости его использовать вне интеграции с головным устройством.

Устройства сети управления пространственно-распределенными ресурсами взаимодействуют с геопортальной системой по шаблону издатель-подписчик на основе протокола обмена сообщениями MQTT [Mishra et al., 2020], построенного на основе протокола TCP/IP. Эксплуатация протокола обеспечивает устойчивое функционирование процесса обмена данными между устройствами сети управления пространственно-распределенными ресурсами и геопортальной системой как в направлении обмена показаний датчиков, так и при отправке управляющих команд.

Обеспечение обмена данными с устройствами сети управления распределенными ресурсами

Диаграмма последовательности, представленная на рис. 4, визуализирует потоки обмена данными между сервером геопортальной системы и устройствами сети управления пространственно-распределенными ресурсами. Взаимодействие между сервером и головным устройством осуществляется посредством паттерна «издатель»-«подписчик» через брокер сообщений. С точки зрения сетевой организации соединение осуществляется на основе стека протоколов TCP/IP. Клиенты брокера сообщений, сервер и устройство подписываются на сообщения с заголовком, включающим уникальный идентификатор (токен) устройства.

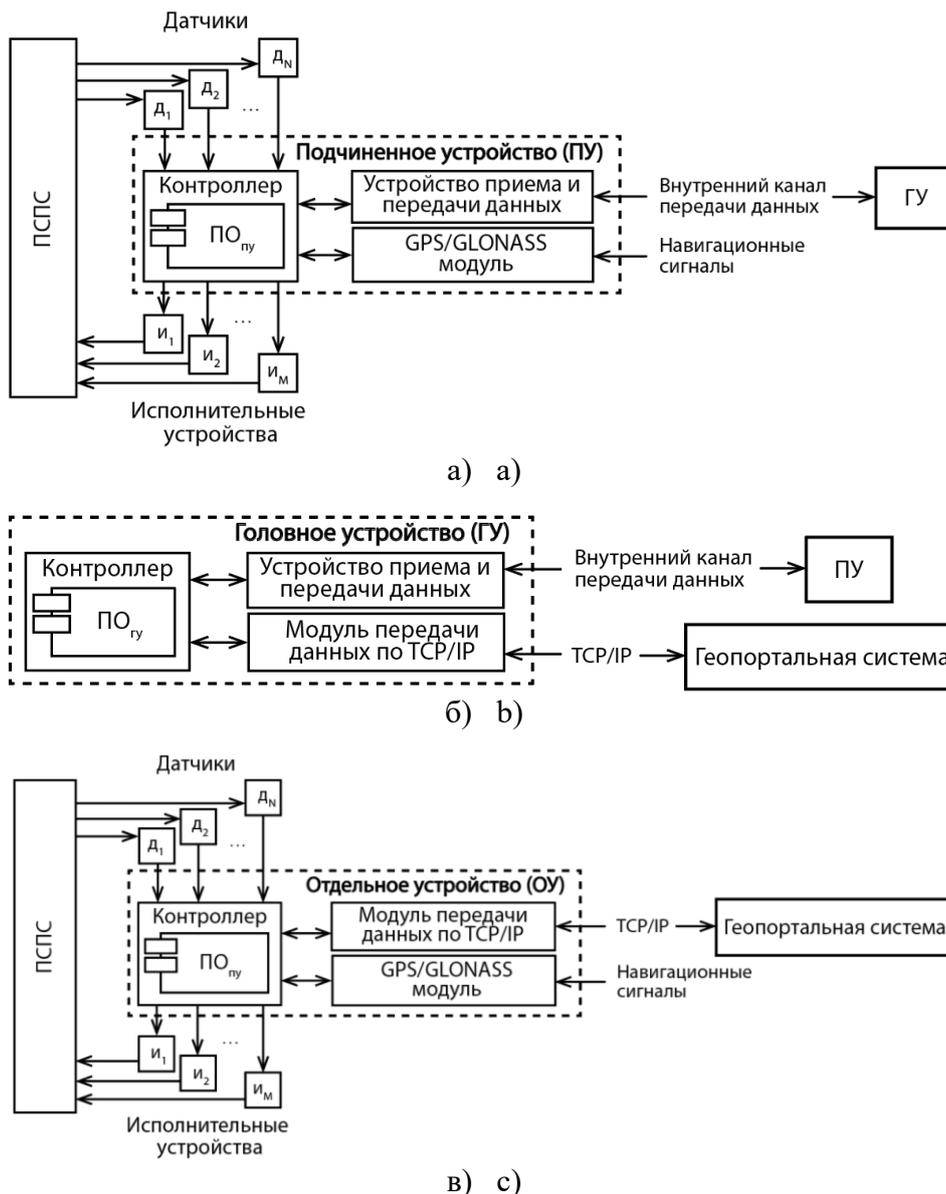


Рис. 3. Устройства сети управления пространственно-распределенными ресурсами:

а) подчиненное, б) головное, в) отдельное

Fig. 3. Network devices for managing spatially distributed resources:

a) slave, b) master, c) separate

Алгоритм функционирования подсистемы сбора данных на основе интеграции с компонентами Интернета вещей по парадигме использования головных и подчиненных устройств включает следующий поток обработки данных:

- T1.** Подчиненное устройство после запуска осуществляет подключение библиотек, инициализацию атрибутов и режимов работы и переходит в циклический режим сбора данных с датчиков. Датчики интегрируются на модульной основе, поэтому их набор может варьироваться от устройства к устройству.
- T2.** Осуществляется периодическая передача телеметрии по каналу LoRa (или на основе иной технологии передачи данных) на головное устройство, представляющее собой хаб, связывающий набор подчиненных устройств, распределенных по территории

управляемой природно-социально-производственной системы и геопортальных, и геопортальный сервер.

- T3.** Головное устройство на основе протокола MQTT отправляет данные MQTT-брокеру с целью их дальнейшей устойчивой передачи на геопортальный сервер. Передаваемые данные включают в себя: токен идентификации подчиненного устройства, набор данных, собираемых на основе датчиков, а также географические координаты подчиненного устройства.
- T4.** Геопортальная система, подписанная на сообщения MQTT-брокера, принимает актуальные телеметрические данные от подчиненного устройства через головное, осуществляет их проверку и первичную обработку.
- T5.** Осуществляется запись телеметрических данных, принятых с подчиненного устройства в OLAP-хранилище.

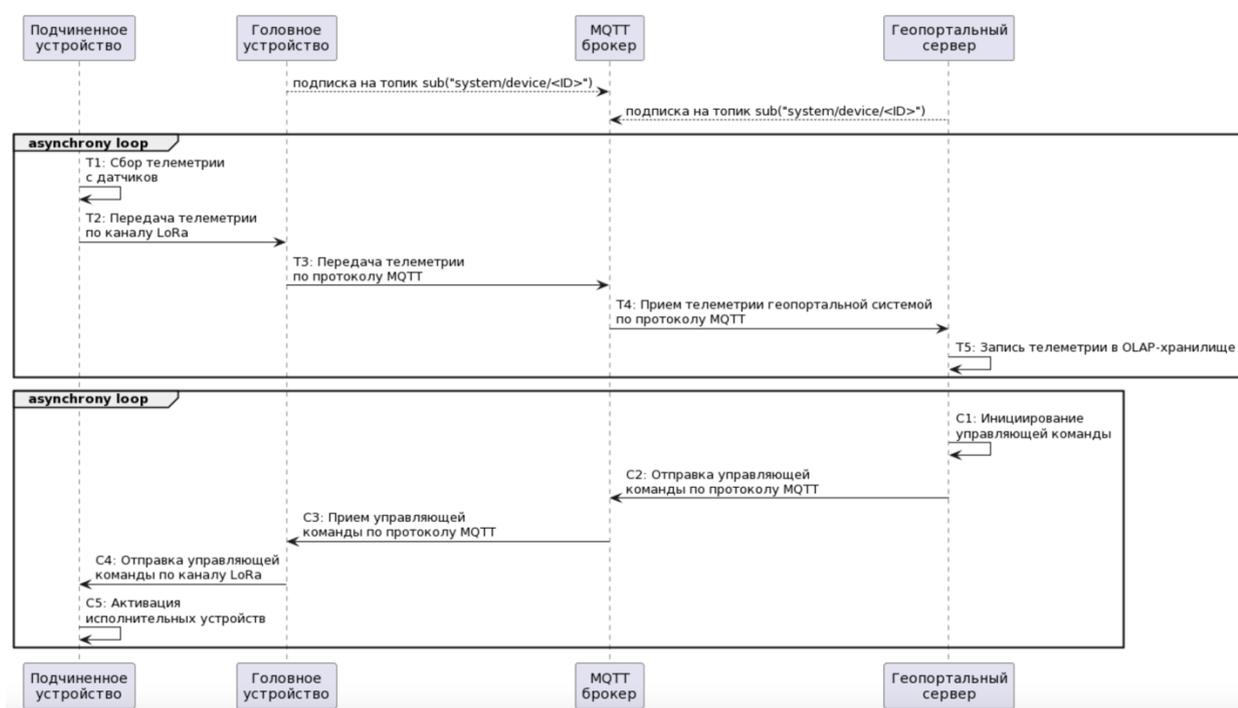


Рис. 4. Диаграмма последовательности, описывающая потоки передачи данных в случаях применения парадигмы использования головных и подчиненных устройств
 Fig. 4. Sequence diagram of use case of master and slave devices

В рамках прототипа геопортальной платформы наравне с решением задачи мониторинга состояния территориально-распределенных систем решается проблема интеграции с внешними системами. Алгоритм функционирования подсистемы удаленного управления внешними системами на основе интеграции с компонентами Интернета вещей по парадигме использования головных и подчиненных устройств включает следующий поток обработки данных:

- C1.** Происходит инициализация управляющей команды. Обозначенный этап осуществляется разными вариантами: возможна ручная инициализация управляющей команды в графических интерфейсах, а также запуск управляющей команды по срабатыванию триггера автоматизации.
- C2.** Геопортальная система на основе протокола MQTT отправляет данные MQTT-брокеру с целью их дальнейшей устойчивой передачи головному устройству.

- Передаваемые данные включают в себя: токен идентификации подчиненного устройства, параметры управляющей команды.
- C3. Головное устройство, подписанное на сообщения MQTT-брокера, принимает параметры управляющей команды от геопортального сервера.
 - C4. Осуществляется передача параметров управляющей команды по каналу LoRa (или на основе иной технологии передачи данных) на подчиненное устройство, расположенное на территории управляемой природно-социально-производственной системы.
 - C5. Подчиненное устройство при условии приема управляющей команды инициирует запуск исполнительных устройств или алгоритмов, подключаемых на модульной основе. Возможна отправка обратного сообщения в случае получения управляющей команды.

Алгоритм функционирования подсистемы сбора данных и управления на основе интеграции с компонентами Интернета вещей по парадигме использования отдельных устройств основан на похожем принципе, с тем исключением, что устройства этого класса инкапсулируют в себя как функции сбора данных и запуска актуаторов, так и инструменты обмена телеметрией с геопортальной системой. Для подключения устройств нового типа требуется реализация компонента на базе архитектурного паттерна «адаптер» для обработки данных, структурированных в соответствии с особенностями интегрируемого устройства и приведения их в унифицированную форму.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Геопортальная платформа реализована как веб-приложение, функционирующее в рамках внутренней сети предприятия или глобальной сети Интернет. Для взаимодействия с системой со стороны клиента необходим компьютер или смартфон, на которые установлена операционная система современной версии, позволяющая взаимодействовать с веб-браузером актуальной версии.

Взаимодействие пользователя геопортальной системы происходит через графический веб-интерфейс консолидации, обработки, анализа и мониторинга пространственных данных. Подсистема визуализации пространственных данных в рамках цифровой карты геопортала обеспечивает интерактивное послойное отображение векторных и растровых данных, визуализации атрибутивной информации о пространственных объектах (рис. 5). Для манипуляции с полотном визуализации тематических слоев можно использовать жесты панорамирования (сдвига) и масштабирования.

Виджет поиска позволяет осуществлять поиск объектов по ключевым словам. Поисковая фраза вводится в соответствующее текстовое поле, после чего нажатием на иконку поиска или клавишу Enter инициируется поиск релевантных объектов по наличию ключевых слов в их описании. При наличии результатов, полотно карты центрируется и масштабируется таким образом, чтобы вместить в рамки экрана все найденные объекты. Сбросить результаты поиска можно нажатием на соответствующую строковую кнопку под текстовым полем ввода ключевых слов.

Интерактивный реестр тематических слоев позволяет включать и отключать отображение для любого набора тематических статичных и динамичных слоев. Возможно включение и отключение целой группы тематических слоев. Реализация данной функции позволяет подобрать оптимальный набор тематических слоев для решения задачи анализа состояния систем землепользования и пространственно-распределенных ресурсов.

Подсистема администрирования предоставляет возможности по редактированию пространственных данных. Левое боковое меню подсистемы администрирования предос-

тавляет возможность выбора конкретного компонента геопортальной системы для управления пространственными данными. В подсистеме администрирования реализовано два ключевых блока: управление массивами визуализируемых пространственных данных и управление интеграцией с устройствами и мониторингом.

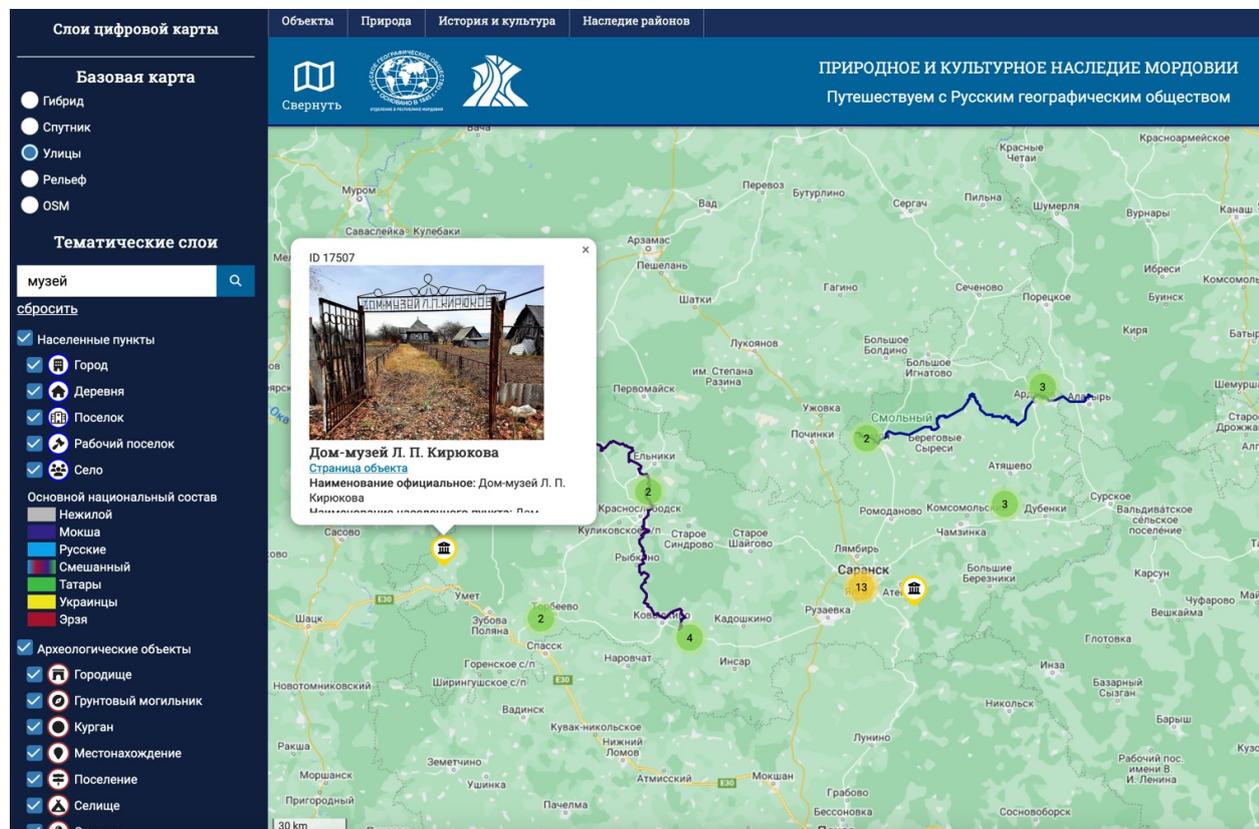


Рис. 5. Визуализация результатов поиска в графических веб-интерфейсах цифровой карты

Fig. 5. Visualization of search results in graphical web interfaces of a digital map

Объекты геопортала могут характеризоваться различным типом геометрии. В системе представлена функциональность интерактивного редактора геометрии объекта, позволяющего определять положение маркера (точечного объекта), выстраивать геометрию полилинии и полигона. Для объектов геопортала может быть отредактирован реестр параметров. В соответствующих графических интерфейсах реализована возможность изменения этой информации. Таким образом, в системе администрирования реализована возможность манипулирования данными об объектах системы, включая интерактивное управление информацией о характеристиках объекта, включая геометрию и стилизацию отображения на цифровой карте, изменение атрибутивных данных.

Геопортальная система может взаимодействовать с внешними устройствами сети управления пространственно-распределенными ресурсами. Для решения этой задачи реализована система интеграций с компонентами Интернета вещей. Архитектура геопортальной системы выстроена таким образом, что добавление новых производителей устройств будет осуществляться на модульной основе за счет добавления новых интеграций. Компонент интеграции с внешними системами для решения задачи удаленного управления объектами посредством отправки управляющих команд через интерфейсы диспетчера позволяет решить задачу обеспечения удаленного взаимодействия с устройст-

вами Интернета вещей. В рамках описываемого в статье проекта реализована интеграция с устройствами серии SMART ООО «Навтелеком», позволяющая осуществлять сбор телеметрии и удаленное управление объектами посредством отправки управляющих команд через интерфейсы диспетчера. Кроме этого, разработаны и подчиненное (рис. 6а) и головное (рис. 6б) устройства, позволяющие решать задачи сбора данных о территориально распределенных системах и удаленного управления.

Головное устройство выполняет функцию хаба и осуществляет сбор данных от подчиненных устройств с целью последующей передачи телеметрии на обработку в геопортальную систему, решает задачу приема управляющих команд от геопортальной системы и передачи ее подчиненному устройству. Ключевыми компонентами головного устройства являются:

- микроконтроллер, инкапсулирующий в себе программную прошивку, определяющую бизнес-логику работы устройства;
- LoRa-передатчик, обеспечивающий передачу и сбор данных телеметрии с подчиненными устройствами;
- Wi-Fi модуль, посредством которого осуществляется передача информации на сервер обработки данных.

Устройство снабжено тремя светодиодными индикаторами, отвечающими соответственно за визуализацию факта питания устройства, подключения к сети Wi-Fi и передачу данных посредством технологии LoRa. В состав устройства также входит антенна, выполняющая функцию усиления передачи данных. Устройство получает энергию от внешнего источника питания.

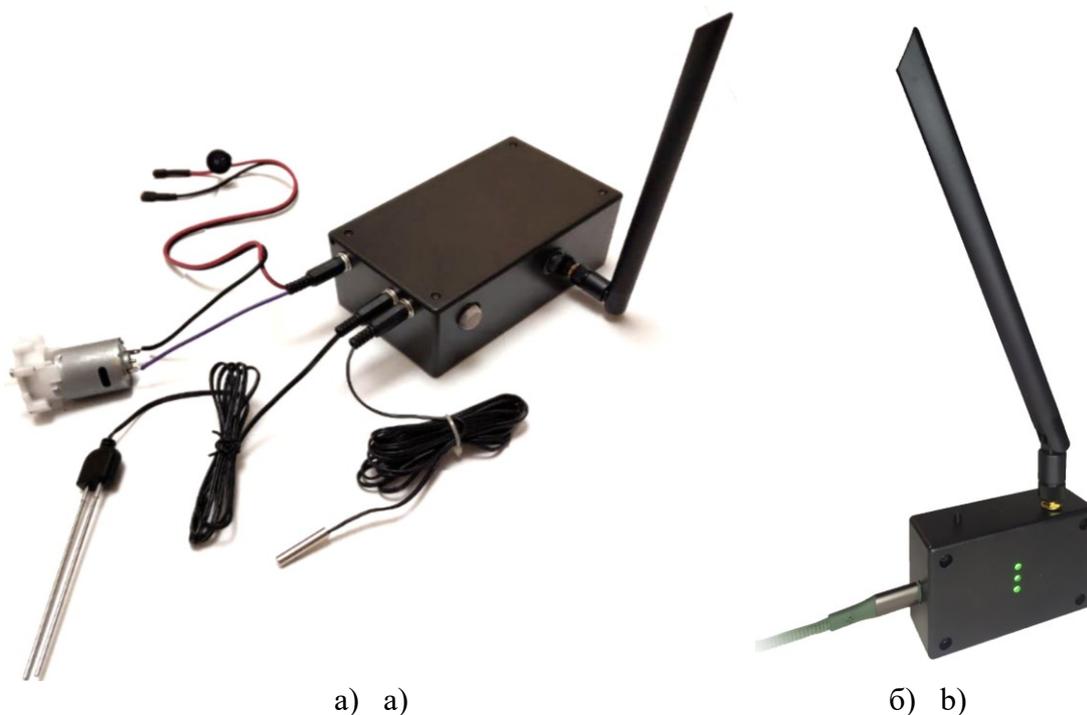


Рис. 6. Прототипы устройств, интегрируемых с геопортальной системой:
а) подчиненное и б) головное

Fig. 6. Prototypes of devices integrated with the geoport system: a) slave, and b) master

Подчиненное устройство выполняет функцию сбора данных с интегрированных датчиков и запуска управляющих команд. Модуль передачи данных на основе технологии LoRa позволяет обмениваться информацией с головным устройством. В подчиненное устройство может быть интегрировано исполнительное устройство (актуатор), которое запускается по удаленной команде, поступающей из геопортальной системы через головное устройство. Устройство также снабжено антенной для усиления качества передачи данных. Батареи питания инкапсулированы внутри подчиненного устройства для того, чтобы обеспечить автономность его работы. Головному и подчиненному устройству сопоставлен уникальный идентификатор, позволяющий ему корректно учитываться при передаче телеметрии в геопортальную систему. Важно отметить, что устройства организованы с соблюдением принципов модульности и могут быть расширены с целью демонстрации принципов работы геопортальной программной платформы при решении различных проектных задач.

Модуль интерактивной аналитической обработки (OLAP) консолидируемых пространственных данных обеспечивает возможность визуализации телеметрических данных, агрегируемых с устройств параллельно в табличном виде и на цифровой карте. Для хранения и аналитической обработки данных телеметрии, собираемых посредством сети управления пространственно-распределенными ресурсами, используется расширение системы управления базами данных для работы с временными рядами (time series). Модуль интерактивной аналитической обработки консолидируемых пространственных данных позволяет решать задачу мониторинга состояния подключенных устройств. Данные телеметрии при этом визуализируются в статистическом (табличном) виде и на цифровой карте. Компонент настройки вида отображения позволяет перейти к анализу телеметрических параметров, передаваемых с устройства (рис. 7): широте, долготе, скорости, пробегу и т. д. в соответствии с реестром агрегируемых данных.

Дополнительно может быть визуализирован детальный лог агрегируемых статистических данных с устройства. В рамках данного варианта использования реализована возможность последовательного анализа телеметрических параметров. Данные асинхронно подгружаются при осуществлении прокрутки интерфейсов до конца страницы. Аналогично реализована функция визуализации логов управляющих команд. Реестр отправленных команд может быть просмотрен при смене вида отображения в режим «Лог команд».

В совокупности варианты использования системы «Телеметрия» и «Мои устройства» обеспечивают решение задачи интерактивной аналитической обработки консолидируемых пространственных данных, что позволяет решать задачу мониторинга состояния подключенных устройств в расширенном табличном виде и в рамках виджета цифровой карты.

Подсистема автоматизации процессов на основе статистических данных о пространственных процессах представляет собой компонент, позволяющий гибко настраивать условия автоматизации для программирования триггеров. Интерактивный редактор навигационных маршрутов для контроля пространственных процессов позволяет на основе манипулирования объектами цифровой карты настроить параметры автоматического контроля перемещения объекта (рис. 8).

Для каждого маршрута должна быть указана информация о его названии, способе перемещения (автомобиль, пешеход, общественный транспорт, велосипед, самокат), ассоциированном контролируемым устройстве и статусе активности. Параметры отклонения от маршрута или границ периметра позволяют определить и реагировать на дистанцию отклонения в метрах, количество зарегистрированных отклонений и продолжительность отклонения. Карта маршрута может быть отредактирована в интерактивном режиме посредством задания начальных, промежуточных и конечных точек маршрута. Для пери-

метров (полигональных объектов) может быть задан способ контроля пространственного положения (перемещение объекта внутрь полигона или, наоборот, выход из него).

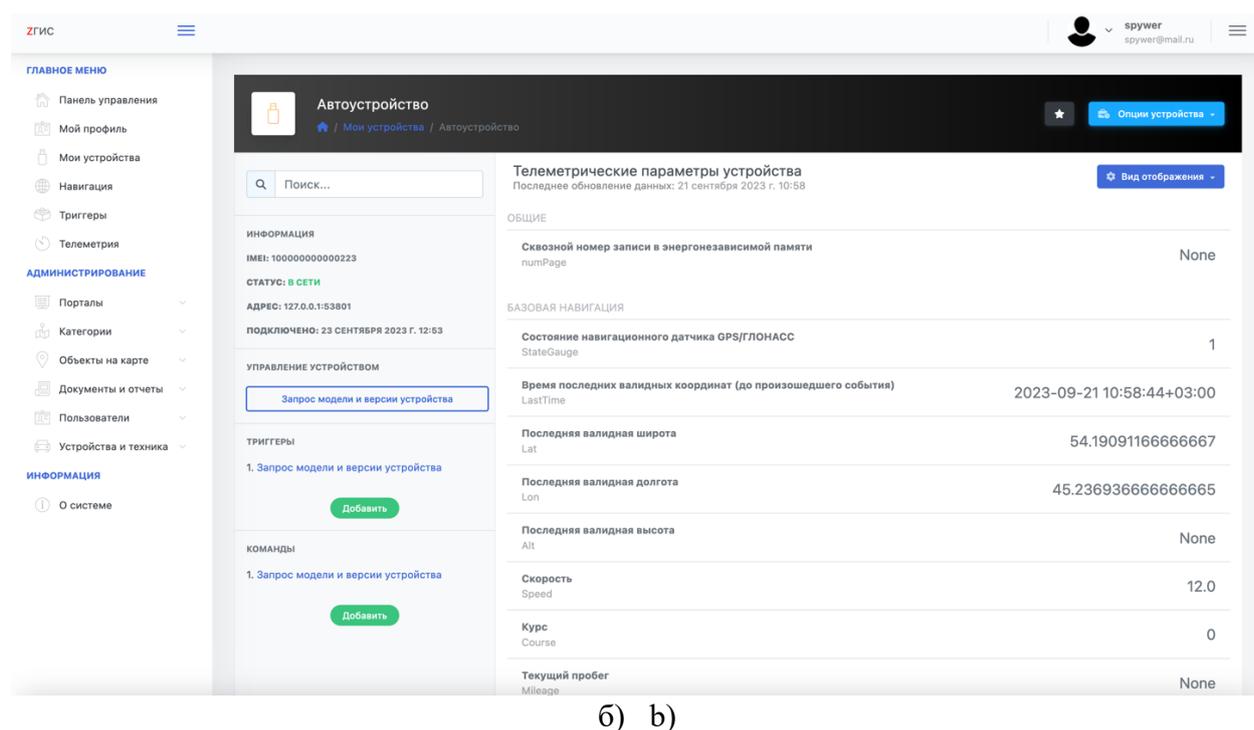
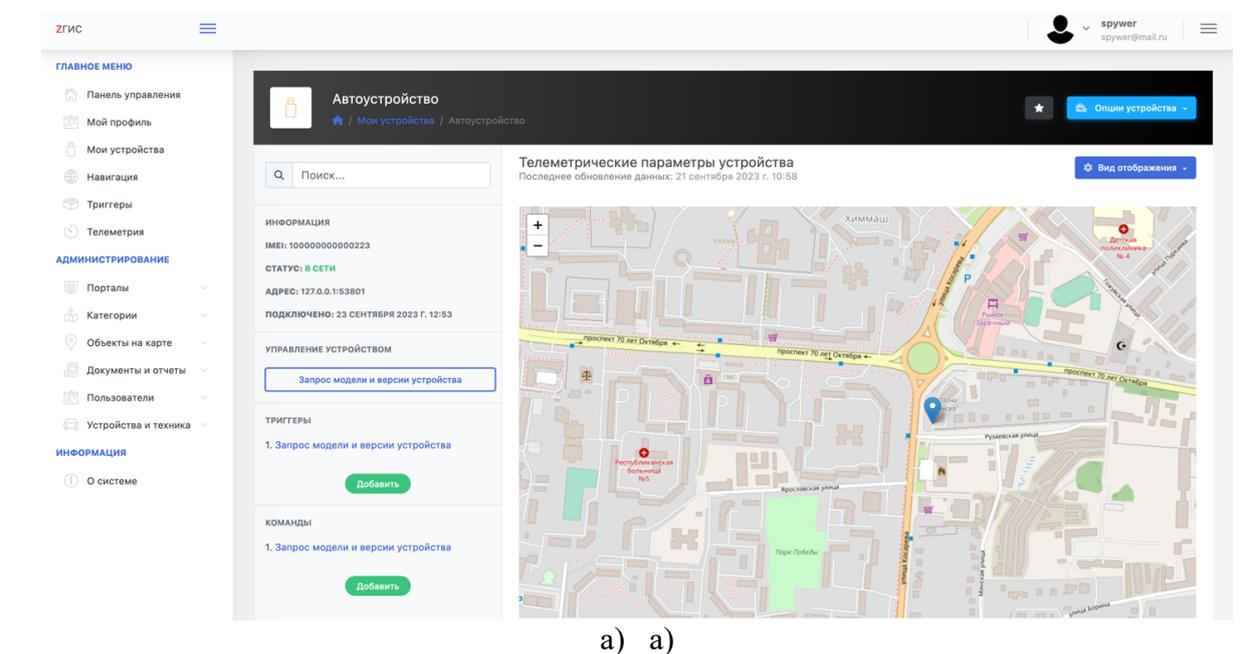


Рис. 7. Визуализация текущих параметров, получаемых с устройства с возможностью отправки управляющих команд: а) на цифровой карте, б) в форме табличных данных
Fig. 7. Visualization of current parameters received from the device with the ability to send control commands: a) on a digital map, b) with tabular data

Подсистема автоматизации процессов на основе статистических данных о пространственных процессах позволяет также учитывать изменение значений телеметрических показателей, консолидируемых с устройств, а также анализировать их агрегированное

статистическое значение, рассчитывая минимум, максимум и среднее значение. Данная функциональная возможность реализована в рамках модуля программирования триггеров, срабатывающих при наступлении определенных пространственно-определяемых условий и приводящих к целевым действиям.

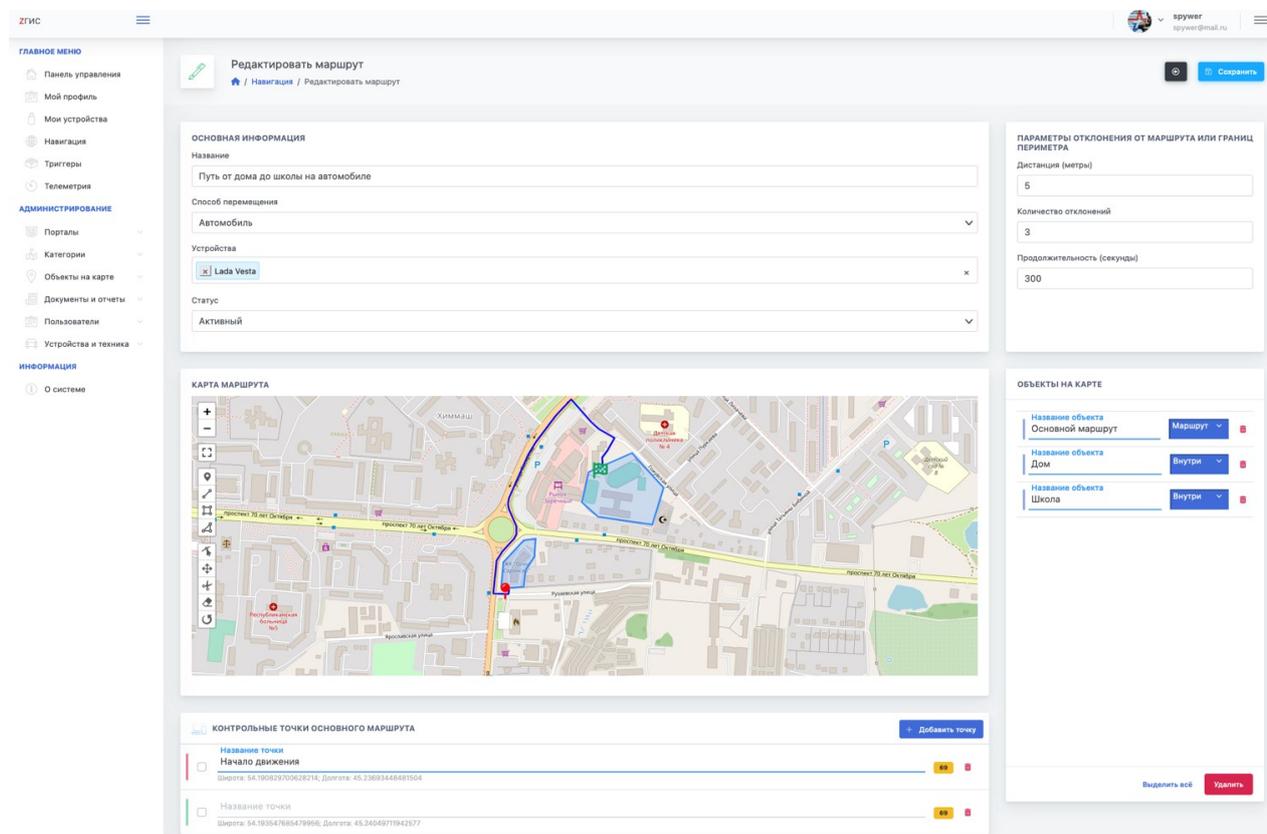


Рис. 8. Интерфейсы администратора геопортальной системы
Fig. 8. Geoportals system administrator interfaces

ВЫВОДЫ

Геопортальные системы востребованы в организационных системах, деятельность которых завязана на использовании пространственно-распределенных ресурсов: в органах регионального и муниципального управления, службах МЧС, производственных предприятиях и холдингах, логистических компаниях. Проектируемые и внедряемые на основе описанной программной платформы геопорталы представляют собой информационные системы, являющиеся инструментом поддержки принятия решений в организационных системах, деятельность которых направлена на управление природно-социально-производственными системами. Области промышленного применения: оптимальное природопользование, анализ состояния земель, мониторинг развития стихийных процессов, управление деятельностью организаций, ресурсы которых распределены на значительной территории, мониторинг социальных процессов.

Использование технологий Интернета вещей позволяет сформировать на основе геопорталов системы диспетчеризации, существенно расширяя реестр вариантов использования геопорталов в решении задач управления территориально-распределенными организационными системами. Совместное использование геопортальных систем и технологий

Интернета вещей позволяет решить задачу централизованного автоматизированного оперативного управления процессами, протекающими в системах значительного территориального охвата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Львович И. Я., Преображенский А. П., Преображенский Ю. П., Чопоров О. Н.* Проблемы использования технологий интернет вещей. Вестник Воронежского института высоких технологий, 2019. № 1(28). С. 73–75.
- Ямашкин С. А., Ямашкин А. А., Федосин С. А.* Разработка проектно-ориентированной инфраструктуры пространственных данных с применением облачных технологий. Радиопромышленность, 2019. № 3. С. 79–90.
- Ahmad S. I., Rana T., Maqbool A.* A model-driven framework for the development of MVC-based (Web) application. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022. No. 47(2). P. 1733–1747.
- 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.
- Gkotsiopoulos P., Zorbas D., Douligieris C.* Performance determinants in LoRa networks: A literature review. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021. No. 23(3). P. 1721–1758.
- Gopikumar S., Banu J. R., Robinson Y. H., Shanmuganathan V., Kadry S., Rho S.* Novel framework of GIS based automated monitoring process on environmental biodegradability and risk analysis using Internet of Things. Environmental Research, 2021. No. 194. 110621.
- Laghari A. A., Wu K., Laghari R. A., Ali M., Khan A. A.* A review and state of art of Internet of Things (IoT). Archives of Computational Methods in Engineering, 2021. P. 1–19.
- 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.
- Mishra B., Kertesz A.* The use of MQTT in M2M and IoT systems: A survey. IEEE Access, 2020. No. 8. P. 201071–201086.
- O'Connell M., Druyor C., Thompson K. B., Jacobson K., Anderson W. K., Nielsen E. J., Kleb B.* Application of the dependency inversion principle to multidisciplinary software development. Fluid Dynamics Conference, 2018. 3856.
- Safari Bazargani J., Sadeghi-Niaraki A., Choi S. M.* A survey of GIS and IoT integration: Applications and architecture. Applied Sciences, 2021. No. 11(21). 10365.
- Sotiropoulos T., Chaliasos S., Atlidakis V., Mitropoulos D., Spinellis D.* Data-oriented differential testing of object-relational mapping systems. 2021 IEEE/ACM 43rd International Conference on Software Engineering (ICSE), 2021. P. 1535–1547.

REFERENCES

- Ahmad S. I., Rana T., Maqbool A.* A model-driven framework for the development of MVC-based (Web) application. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022. No. 47(2). P. 1733–1747.
- 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.
- Gkotsiopoulos P., Zorbas D., Douligieris C.* Performance determinants in LoRa networks: A literature review. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021. No. 23(3). P. 1721–1758.

- Gopikumar S., Banu J. R., Robinson Y. H., Shanmuganathan V., Kadry S., Rho S.* Novel framework of GIS based automated monitoring process on environmental biodegradability and risk analysis using Internet of Things. *Environmental Research*, 2021. No. 194. P. 110621.
- Laghari A. A., Wu K., Laghari R. A., Ali M., Khan A. A.* A review and state of art of Internet of Things (IoT). *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2021. P. 1–19.
- 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.
- Lvovitch I. Ya., Preobrazhensky A. P., Preobrazhensky Yu. P., Choporov O. N.* Problems of using Internet of Things technologies. *Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*, 2019. No. 1(28). P. 73–75 (in Russian).
- Mishra B., Kertesz A.* The use of MQTT in M2M and IoT systems: A survey. *IEEE Access*, 2020. No. 8. P. 201071–201086.
- O’Connell M., Druyor C., Thompson K. B., Jacobson K., Anderson W. K., Nielsen E. J., Kleb B.* Application of the dependency inversion principle to multidisciplinary software development. *Fluid Dynamics Conference*, 2018. 3856.
- Safari Bazargani J., Sadeghi-Niaraki A., Choi S. M.* A survey of GIS and IoT integration: Applications and architecture. *Applied Sciences*, 2021. No. 11(21). 10365.
- Sotiropoulos T., Chaliasos S., Atlidakis V., Mitropoulos D., Spinellis D.* Data-oriented differential testing of object-relational mapping systems. *2021 IEEE/ACM 43rd International Conference on Software Engineering (ICSE)*, 2021. P. 1535–1547.
- Yamashkin S. A., Yamashkin A. A., Fedosin S. A.* Development of a project-oriented spatial data infrastructure using cloud technologies. *Radio Industry*, 2019. No. 3. P. 79–90 (in Russian).
-

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-179-192

**Mohammad Suhail¹, Mohd Nazish Khan², Alikul X. Ravshanov³,
Marufdjan Usmanov⁴**

SUITABILITY ASSESSMENT OF WIND ENERGY FARMING IN THE DESERT LANDSCAPE OF ZARAFSHAN VALLEY, UZBEKISTAN

ABSTRACT

Wind farm suitability analyses have been carried out to demarcate the potential zones in the Middle Zarafshan River basin. Uzbekistan's major cities occupy the middle and lower Zarafshan Valley, which needs to allocate and develop wind energy farms to restore sustainability. In the current study, the Middle Zarafshan valley was assessed to provide a synoptic view of potential zones for wind energy. This study aimed to develop a geospatial method to identify optimal locations in the valley. To accomplish this task, five criteria were considered: wind speed, slope, distance from the transmission network, road network, land use, and land cover. Further, each criterion was assigned a weight according to expert opinions and published research outcomes. In addition, a maximum of 45 % weight was assigned to wind speed, followed by land use, land cover, slope, and others. Further, these criteria were categorized into four classes viz., unsuitable, less suitable, moderately suitable, and highly suitable. Further, different thematic layers were produced to realize this study. Wind speed maps were derived at different heights to calculate the results and integrate them with other derivatives. The findings of this study show that the maximum intensity of winds received at 100 m height or more, and more than 40 % area of the study area was estimated suitable for wind energy exploitation.

KEYWORDS: wind energy, renewable energy, suitability analysis, Zarafshan Valley, Arid Region, GIS

INTRODUCTION

Growing carbon emissions, increasing population and depletion of fossil fuels increase pressure and create a significant challenge for humanity to develop an alternate and sustainable energy resource [Abas et al., 2015; Roehrkasten, 2015; Singer et al., 2017; Whiting et al., 2017; Barreto, 2018; Xu et al., 2019; Kahatapitiya et al., 2022]. The energy demand has increased manifold in the last decades and this growth seems to continue with fossil fuels providing the majority of this energy. However, manifestations of burning fossil fuels are being witnessed worldwide in the form of serious environmental problems including carbon emissions, air pollution, and climate change. It means that current energy trends are not sustainable and a better balance must be found between energy security, economic development, and protection of the

¹ Centre of Applied Remote Sensing and GIS Applications, Samarkand State University, 15, Universitetsky blvd., Samarkand, 140104, Uzbekistan, *e-mail*: netgeo.suhail@gmail.com

² Transformation Office, Samarkand State University, 15, Universitetsky blvd., Samarkand, 140104, Uzbekistan, *e-mail*: nazishgeo@gmail.com

³ Department of Socioeconomic Geography, Samarkand State University, 15, Universitetsky blvd., Samarkand, 140104, Uzbekistan, *e-mail*: ravshanov1401@gmail.com

⁴ Department of Socioeconomic Geography, Samarkand State University, 15, Universitetsky blvd., Samarkand, 140104, Uzbekistan, *e-mail*: usmaruf1974@gmail.com

environment. Therefore, it needs an alternative source of sustainable energy like wind. Wind is a plentiful natural resource that can be harnessed by mechanically converting wind energy to electricity with the aid of wind turbines [Ahmed et al., 2004; Shata et al., 2006]. Further, wind energy is explained by Ackermann and Soder [2002]. It has plentiful potential and comes from nature including tidal, wind, solar, and geothermal [Baydyk et al., 2019; Chamundeswari et al., 2021; Rahman et al., 2022]. Non-conventional energy achieves two goals: decarbonizing the energy supply chain and supplying energy to meet rising demand [Li et al., 2020; Laldjebaev et al., 2021]. On this topic, several researchers have worked on it. However, studies at the national level are more prevalent than evaluations at the regional level in this area. For instance, regional-level studies conducted in Africa have examined the potential, deployment status, and elements of renewable energy [Bugaje, 2006; Brunet et al., 2018; Da Silva et al., 2018], user interactions with technology [Amuzu-Sefordzi et al., 2018], and development and policy [Aliyu et al., 2018; Ouedraogo, 2019]. In Europe, there have been numerous devoted studies on the condition of energy resources, the development of renewable energy goals, and the efficacy of policy instruments [Bersalli et al., 2020].

Central Asia has the potential to effectively harness wind energy. Nonetheless, a comprehensive analysis of unconventional energy resources is uncommon in this area. A comprehensive examination of non-traditional energy in Central Asia is provided by Shadrina [2020] whereas Kazakhstan was studied more thoroughly than Kyrgyzstan, Tajikistan, Turkmenistan, and Uzbekistan. According to UNIDO and ICSHP [2016], Uzbekistan has a 1 600 MW wind energy potential. Avezova and co-researchers estimate wind potential at over 1 GWh [Avezova et al., 2017] while Kochnakyan and others jump it up to 4652 GWh [Kochnakyan et al., 2013]. It indicates that Uzbekistan has a considerable amount of wind energy potential, which needs detailed analysis using modern technologies in a precise and effective manner. This study focuses on estimating wind energy suitability zones in the middle Zarafshan River basin using geospatial technology. Geospatial technology is being used as a vital tool for assessing different non-conventional energy resources worldwide. As per UNDP, Uzbekistan has the potential to produce 1 600 MW of wind energy annually [UNDP, 2014]. Therefore, this study classifies the various criteria and assigns them weights to delineate viable wind energy farming zones.

RESEARCH MATERIALS AND METHODS

Study Area

Fig. 1 shows the location of the study area, which is formed by the deposition by the Zarafshan River. Upper Zarafshan Valley consists of mountains, piedmont zones, alluvial fans, and deep valleys while the middle Zarafshan Valley is dominated by nearly plain areas, low hills, and shallow & broad-floored valleys. In the north, the river carves low hills which demarcate basin boundaries. Further, this river divides into two parts, i. e. Akdarya and Karadarya.

Typically, winds range in speed from 4 to 15 m/s and blow from west to east before making a little shift to the south. It indicates that middle Zarafshan has a significant capacity to harness wind energy and provide carbon-free electricity for a variety of purposes. The climate in Uzbekistan is dry and continental (classified as Arid Region), with significant day-to-day and seasonal temperature changes. Flat topography dominates the country while the southeastern region is carved of highly elevated mountainous terrain like Tashkent (Tien-Shan) and Samarkand. Summers are long, hot, and dry with an average monthly temperature from 27.2 °C to 35 °C. Winters are cold with an average monthly temperature between -1 °C and -3 °C.

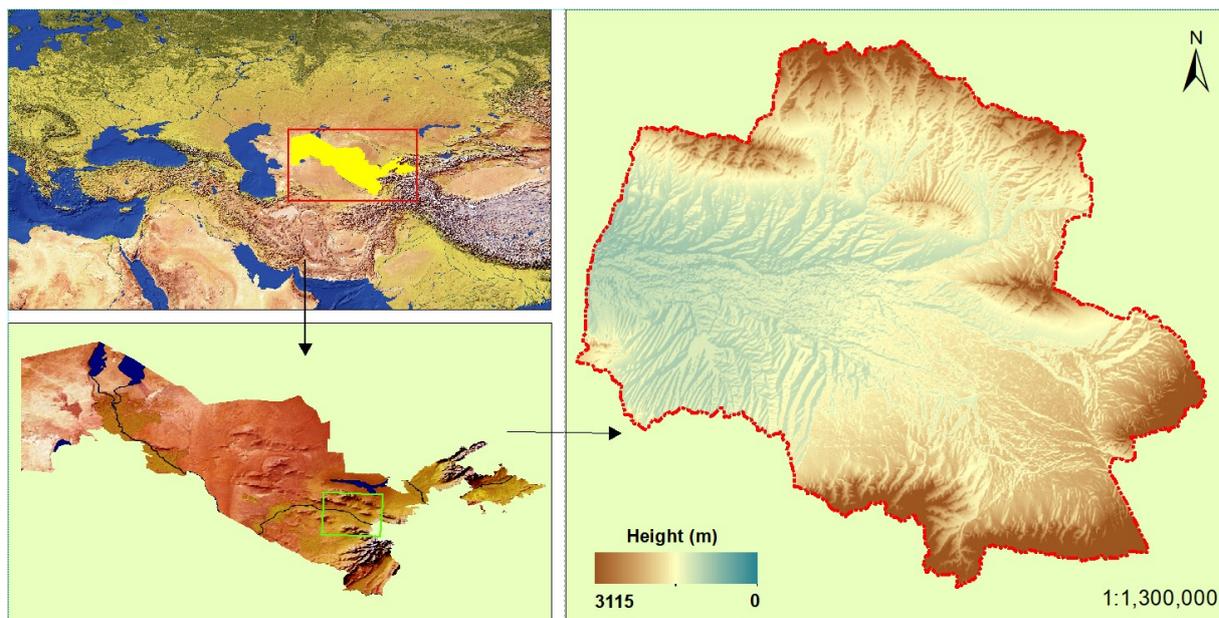


Fig. 1. Location of Study Area

Factors for Wind Power Suitability Analysis

The most important factor for establishing a wind farm or wind turbine is wind power. In this sense, Central Asia has a strong potential to locate new wind farms. However, wind turbine sites require many factors to evaluate before choosing a site. The efficiency of wind turbines depends on wind speed dominantly [McWilliam et al., 2012; Aktas, Kabak, 2016; Adedeji et al., 2021]. However, many factors influence the suitability of an area for setting up wind farms. These factors are distance from a road, distance from a transmission line, and slope of the area of interest. Previous studies confirmed that wind farms should not be located 10 km away from the road network [Amarsinghe, Perera, 2021]. Distance from the urban centers is also considered an important criterion. This criterion was considered in the land use and land cover classes. For this study, only non-populated areas were considered suitable. Further, the elevation creates technical issues for wind energy potential, as well as the cost of installation and maintenance. Practically, top of hills (rounded), open plains, and gaps in coastal mountains are best suited for wind power generation due to the availability of consistent and reliable winds [Amarsinghe, Perera, 2021]. Slope is another important parameter that influences wind potential and turbine stability. The apex of steep slope winds does not hit the turbine rotor at a perpendicular angle, resulting in increased fatigue for the turbine [Pao, Johnson, 2009; Hyvärinen, 2018; Katsaprakakis et al., 2021]. In addition, a value greater than a 5-degree slope will interfere with the stability of the turbine and give more turbulent wind patterns.

Data and Methods

Sentinel-2 and Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Digital Elevation Model were used in this study; they were both retrieved from online distribution services and were made available at Global Copernicus Open Access Hub¹ and NASA Earth data² platforms, respectively. Both datasets were obtained, and preprocessing was done to set up various thematic layers for relevant information extraction. To determine a drainage network

¹ Global Copernicus Open Access Hub. Web resource: <https://scihub.copernicus.eu> (accessed 12.06.2023)

² NASA Earth data platforms. Web resource: <https://search.earthdata.nasa.gov/search?portal=idn&fi=ASTER> (accessed 12.06.2023)

and watershed, the first digital elevation model (DEM) was integrated into a GIS system [Farooq et al., 2015]. The middle Zarafshan Valley, the area of interest, was also defined using the watershed. Further, the digital elevation model was used to generate the slope layer. Road networks and transmission lines data were collected by digitizing on Google Earth and from country statistics agencies, respectively. Land Use & Land Cover (LULC) derived from ESA Sentinel-2 imagery at 10 m resolution. The underlying learning method uses 4 bands of Sentinel-2 surface reflectance data, i. e. blue, (B2 490 nm), green (B3 560 nm), red (B4 665 nm), and near-infrared (B5 705 nm) bands with given central web lengths. To obtain the final result, a traditional approach of supervised image classification was steered with the help of GCP information collected during the field survey, and then a final representative map was composed in ArcGIS Software for the year 2022 (October). Further, Fig. 2 and Table 1 show the flowchart of the methodology and rationale of the study along with data used in the present study.

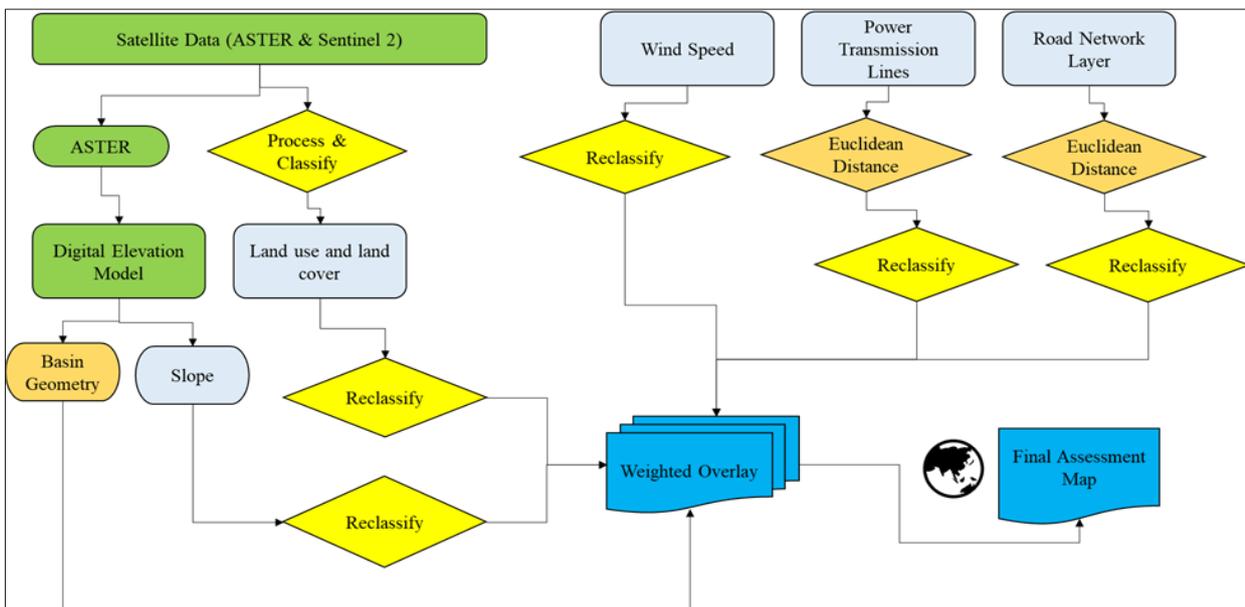


Fig. 2. Flow diagram of the methodology used in the present study

Table 1. Rationale and data used in the study area

Indicator (Data Layer)	Data Source	Rationale for selection	Data Type	Spatial Resolution
Wind speed	Neil et al., 2023	Constant availability of wind speed is essential for wind energy production	Raster	250 m
Slope, degree	ASTER DEM	Slope affects the development and construction activities of wind power infrastructure	Raster	30 m
Land use and land cover	Sentinel 2 satellite products	Land use is an important aspect of any type of development activity due to the suitability of land for various purposes	Raster	10 m
Distance to Transmission	OSM; Ministry of Energy, Uzbekistan	Utilization of existing transmission lines and viable investment in new transmission lines	Vector	Polyline
Distance to Road	OSM; Google Earth	Considering accessibility and minimizing the investment in construction and operation costs	Vector	Polyline

Further, the classified layer was categorized into 6 classes viz., water, vegetation, cropland, built-up, bare land, and rangeland. In the classification scheme water refers to rivers, ponds, lakes, and open water bodies surface, whereas vegetation includes both dense and sparse parcels of naturally grown land cover. Cropland was classified by considering all types of agricultural land, viz. irrigated and rainfed of both cereal and broadleaf types of agricultural practices. The built area includes urban and built-up areas with artificial surfaces, impervious surfaces, buildings, residential and commercial structures, asphalt, and associated areas. Further, the bare area was marked with rock or soil, large areas of sand, deserts, exposed rock, dry salt flats/pans, dried lake beds, etc. without or with very sparse to no vegetation for the entire year. The sixth category of land cover was rangeland, which includes all open areas covered in homogenous grasses, scrubs, or no taller vegetation. It also includes some cases of mixing small clusters of dispersed plants with exposed soil or rock. It is an important parameter in determining the suitability of land for wind energy farming as different land use and land cover classes as well as infrastructure facilitate the selection of potential wind energy farming sites/locations in more than one way. Further, to demarcate the potential zones of wind energy suitability, the following parameters have been derived and given suitable weights as per Table 2.

Table 2. Selected Parameters and their relative weight for assessing the suitability of wind energy farming locations

Sr. No.	Criteria	Weight (%)	Factors	Suitability
1	Wind Speed (range 3–12.41 m/s)	0.45	3–6 (m/s)	Unsuitable (1)
			6–7	Low Suitable (2)
			7–9	Moderate Suitable (3)
			>9.0	High Suitable (4)
2	Slope, degree	0.1	0–2	High Suitable (4)
			2–5	Moderate Suitable (3)
			5–8	Low Suitable (2)
			>8 %	Unsuitable (1)
3	Distance to Transmission (m)	0.15	0–5 000 m	High Suitable (4)
			5 000–10 000 m	Moderate Suitable (3)
			10 000–15 000 m	Low Suitable (2)
			>15 000 m	Unsuitable (1)
4	Distance to Road (m)	0.1	0–500 m	Low Suitable (2)
			500–5 000 m	High Suitable (4)
			5 000–20 000 m	Moderate Suitable (3)
			>20 000 m	Unsuitable (1)
5	Land use & land cover	0.2	Rangeland	Suitable

After generating all thematic layers, they were modeled for weighted overlay analysis in ArcGIS software to obtain the desired outcomes. Based on this output layer, wind energy suitability zones were described in the Middle Lower Zarafshan Valley.

RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

Results are shown separately and combined with other thematic layers to create the final product. A few important layers were derived to demarcate potential zones of wind energy farming in the Middle Lower Zarafshan valley.

Wind Speed

Wind speed results were derived for estimating varying speeds in the middle lower Zarafshan valley at heights about 50, 100, 150, and 200 m above the ground. It indicates that the Zarafshan Valley feels different wind intensities at varying heights. At 50 m, 71.94 % of area of the middle Zarafshan Valley experiences low-intensity wind (less than 6 m/s) and 23.38 % of area experiences higher wind velocity between 6–7 m/s while approximately 5 % of area experiences strong winds. It was also observed that as the height increases, wind speed increases. At 100 m, the strong winds area expanded significantly and covered more than 67 % of the study area. It indicates that 100 m in height is comparatively more suitable. At 150 m, 84.05 % of area of the middle Zarafshan Valley experiences potential winds, available for generating wind energy. It increases from 50–100 m while it decreases from 100–200 m. At wind speed between 7–9 m/s, it increases from 50–150 m while it decreases from 150–200 m. For wind speed >9 m/s, it shows an increasing trend with height continuously. It is observed that wind speed data indicates different trends of potential and spatial distribution of wind intensity (Table 3). For example, 71.94 % of the area is covered with low-intensity winds, which is less suitable for low-height wind turbines. One interesting fact observed is that flat and populated areas experience slow wind (Fig. 3a wind speed at 50 m) while increasing height is proportional to the wind speed.

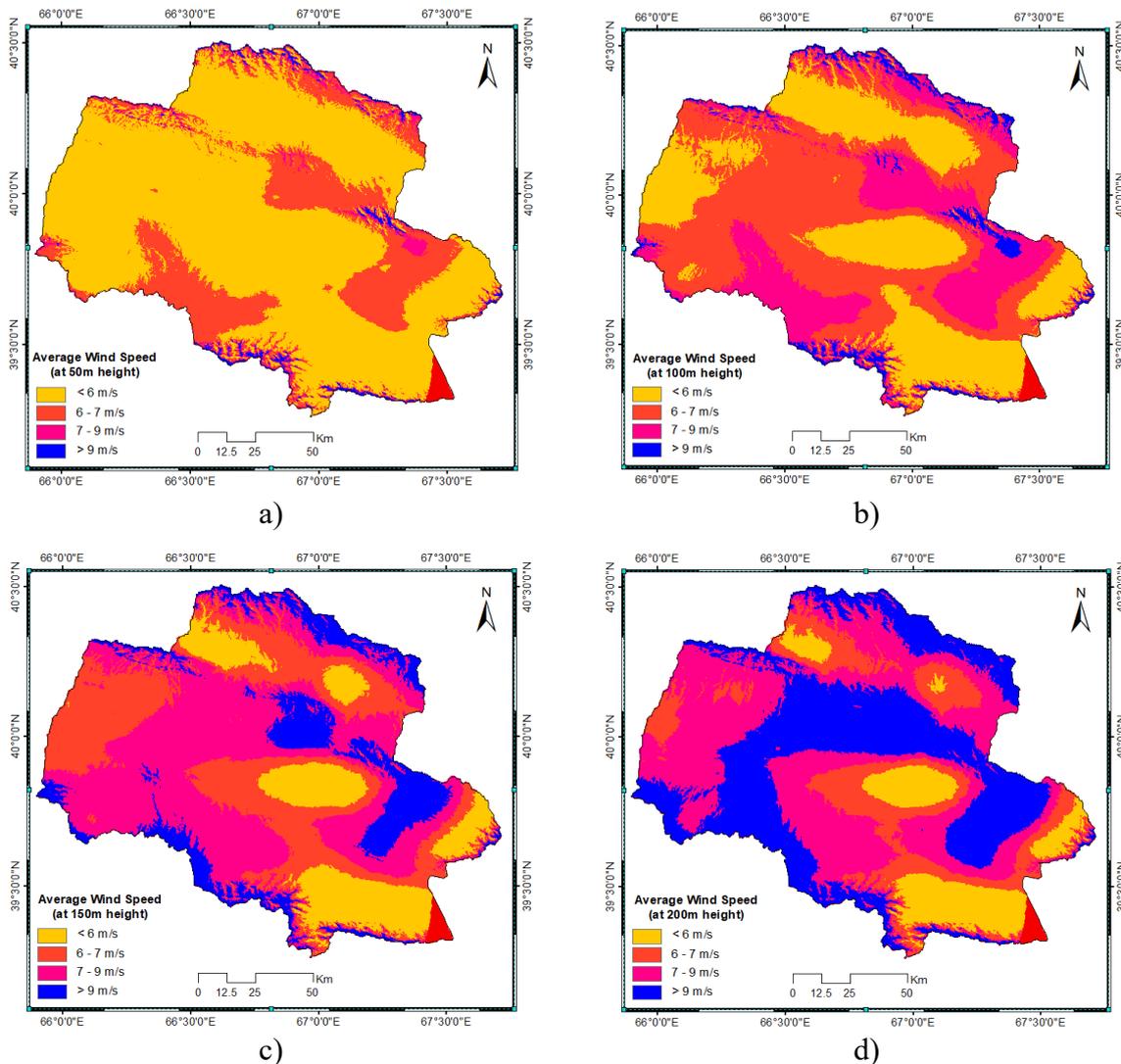


Fig. 3. Spatial distribution of wind speed at varying heights (a–d) at 50, 100, 150, and 200 m

Table 3. Statistics of wind speed under different speed categories

Wind Speed (m/s)	<6	6–7 m/s	7–9 m/s	>9
Wind Area (at 200 m)	1430.44	2152.06	4665.65	4495.21
	11.23 %	16.89 %	36.61 %	35.27 %
Wind Area (at 150 m)	2032.25	3657.96	5115.44	1937.71
	15.95 %	28.70 %	40.14 %	15.21 %
Wind Area (at 100 m)	4160.34	5225.10	2845.08	512.85
	32.65 %	41.00 %	22.33 %	4.02 %
Wind Area (at 50 m)	9167.75	2979.52	409.74	186.35
	71.94 %	23.38 %	3.22 %	1.46 %

Source: authors' estimate

Slope

The east-west trending middle Zarafshan valley consists of different slope categories that make it more suitable for wind energy potential in general. The results of this study exhibit some interesting facts. The central part of the middle Zarafshan Valley is almost flat and highly suitable for wind turbine installation. However, the boundaries of the valley (Northern and Southern areas) are not suitable for installing wind turbines due to the steep slope and high cost of installation. Out of the total study area of the valley, almost 34 % of area was flat with less than a 2° slope, while more than 35 % was almost plain with a slope ranging from 2° to 5°. This means that approximately two-thirds of the study area was suitable for setting up wind energy infrastructure from the slope perspective. Fig. 4a shows the spatial distribution of slope under different categories.

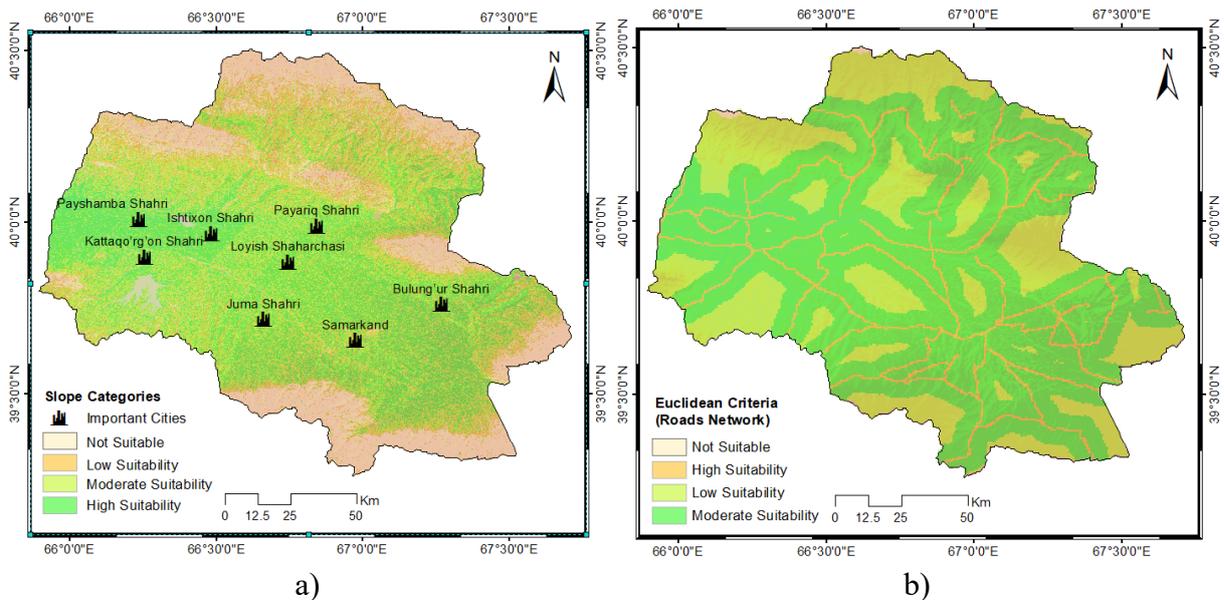


Fig. 4. Spatial distribution of slope and road network (a & b) — Euclidean distance

Distance from Road Network

The road network layer was draped over other layers to analyze the distance between potential areas, and the road network. Further, suitable areas were extracted into four categories viz., highly suitable, moderately suitable, low, and not suitable (Fig. 4b). The results of this analysis show that 6.75 % and 29.07 % of areas are under highly suitable and moderately suitable classes respectively, while 63.99 % and 0.19 % of areas are under low suitability and not suitable. It indicates that the road network needs more proliferation at the ground to provide the necessary support for converting low-suitability areas into highly suitable areas.

Distance from Transmission Network

The transmission network is one of the important parameters for the distribution of wind-generated energy from the source to users. Therefore, it makes sense to develop a system in which wind turbines and transmission networks share a common tower. For this purpose, the transmission network was studied and categorized into four classes viz., the transmission network less than 5 km away from suitable areas, 5–10 km, 10–15 km, and more than 15 km away (Fig. 5a). In this sense, results were studied and forwarded many remarkable facts. If the transmission network and wind farms are close-spaced (less than 5 km), there will be minimum loss of energy and it will be cost-effective. There will be less environmental impact as well.

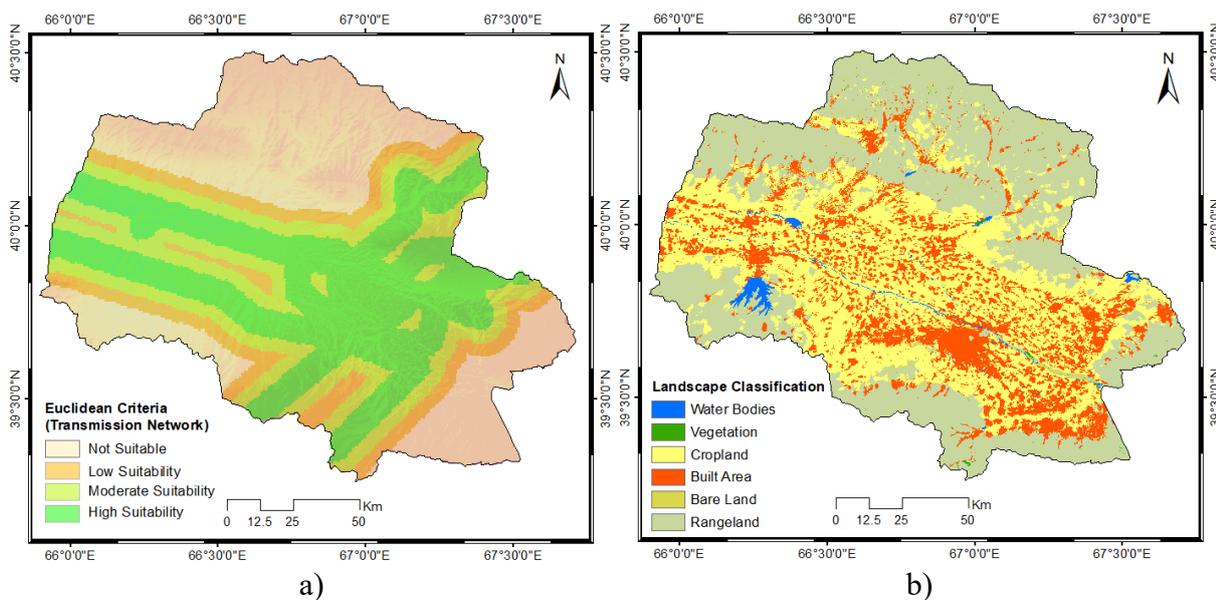


Fig. 5. Spatial distribution of power transmission network and land use land cover (a & b)

Land Use and Land Cover

Results of land use and land cover indicate that the Middle Zarafshan Valley displays a mosaic of vegetation, barren, rangeland, built-up, and cropland (Fig. 5b). Out of a total of 12 743.40 km² selected area, the highest share of land cover was classified into rangeland of about 5 341.1 km² followed by cropland (4 825.2 km²), urban built up (2 321.1 km²), water bodies (125.5 km²), bare land (118.4 km²), and natural vegetation (12 km²) in the study area. For establishing the wind turbine, LULC analysis reveals some distinguished facts [Shakir et al., 2018; Suhail et al., 2019] that rangeland and bare land are the most suitable areas in the middle Zarafshan Valley, which accounts for more than 42 % of the total study area. The Samarkand Region occupies most of the middle Zarafshan valley. The Samarkand city is densely populated, especially along both banks of the Zarafshan River.

Wind Energy Farming Suitability Zonation

In this study, suitability maps were generated at various heights using five key parameters: wind speed, slope, proximity to transmission lines, distance to road networks, and land use/land cover. These criteria were carefully integrated and weighted according to established standards to ensure accuracy and relevance. The analysis resulted in the classification of wind energy potential zones into four categories: not suitable, low suitability, moderate suitability, and high suitability. This categorization provides a clear framework for identifying regions with optimal conditions for wind energy development, offering a practical tool for decision-makers and planners in the energy sector.

At a height of 200 m, the total area classified as unsuitable for wind energy farming was 7 283.4 km², representing 58.44 % of the entire study area. The area considered less suitable measured 215.35 km², or 1.73 % of the total. Moderately suitable land was estimated at 1 757.39 km², accounting for 14.10 %, while the highly suitable category covered 3 207.15 km², equating to 25.73 % of the region. These figures suggest that the middle Zarafshan Valley offers significant potential for wind turbine installation.

At 150 m in height, the unsuitable area remained consistent at 7 283.84 km² (58.44 % of the study area). However, the less suitable area increased to 380.71 km², accounting for 3.05 %. Moderately suitable land expanded to 2 982.83 km², covering 23.93 % of the total area, while highly suitable land decreased to 1 816.36 km², or 14.57 %. This reveals that as height decreases, suitability for wind farming reduces, although the amount of moderately suitable land increases (Table 4). These findings provide valuable insights for optimizing the selection of wind energy zones at different heights.

Table 4. Statistics on the suitability of wind energy farming area

Height (amsl)	Not Suitable	Low Suitability	Moderate Suitability	High Suitability
Suitable area (at 200 m)	7 283.84	215.35	1 757.39	3 207.15
	58.44 %	1.73 %	14.10 %	25.73 %
Suitable area (at 150 m)	7 283.84	380.71	2 982.83	1 816.36
	58.44 %	3.05 %	23.93 %	14.57 %
Suitable area (at 100 m)	7 283.84	736.21	3 557.09	886.61
	58.44 %	5.91 %	28.54 %	7.11 %
Suitable area (at 50 m)	7 283.84	1 692.87	3 211.42	275.61
	58.44 %	13.58 %	25.77 %	2.21 %

Source: authors' estimates

At a height of 100 m, the analysis revealed that unsuitable land for wind energy farming remained consistent, covering 7 283.84 km², or 58.44 % of the total study area. The area deemed less suitable expanded to 736.21 km², representing 5.91 % of the region, indicating a slight increase in potential. Moderately suitable land accounted for 3 557.09 km², or 28.54 %, suggesting a favorable distribution for wind energy exploitation at this height. However, highly suitable land decreased to 886.61 km², which made up 7.11 % of the total area, reflecting a notable reduction in the highest potential areas at this altitude.

At 50 m, the unsuitable land area remained unchanged at 7 283.84 km² (58.44 %). However, the less suitable land expanded significantly to 1 692.87 km², accounting for 13.58 % of the total area. Moderately suitable land covered 3 211.42 km², representing 25.77 %, while the highly suitable area decreased sharply to 275.61 km², equaling only 2.21 % of the total area. These findings demonstrate that as the height decreases, the extent of highly suitable land diminishes, while less and moderately suitable areas increase. This pattern highlights the critical influence of elevation on the suitability of regions for wind energy farming, underscoring the importance of higher altitudes in maximizing the potential for wind energy generation in the study area. The shift in suitability across different heights provides crucial insights for selecting optimal locations for wind turbines, with higher elevations showing significantly greater promise.

The analysis reveals that moderately suitable and suitable areas for wind energy farming were consistently found across all assessed heights. Specifically, at 100 m, 28.54 % of the study area was classified as moderately suitable, highlighting this altitude as a favorable zone for wind energy development. However, a notable trend emerged, as the proportion of highly suitable areas decreased progressively with the reduction in height. The highest suitability was observed at 200 m, where the optimal conditions for wind turbines were identified, while at 50 m the highly suitable area reached its lowest extent. Wind speed emerged as the most critical factor influencing the establishment of wind turbines, as it directly affects energy generation. In the case of the middle Zarafshan valley, the data indicates strong wind speeds exceeding 7 m/s at elevations above 100 m, making it a prime location for wind energy exploitation. Areas with such strong winds are deemed particularly advantageous for harnessing wind energy, reinforcing the valley's potential as a wind energy zone. The study produced raster layers illustrating wind potential across various heights, generated through the weighted overlay model. These layers, displayed in Fig. 6a–d, clearly identify the spatial distribution of wind energy potential. The most suitable lands for wind turbine installation were found along the northern and southern boundaries of the middle Zarafshan valley. These regions, with their high wind speeds and favorable topographic conditions, present excellent opportunities for developing wind energy infrastructure, providing a strong case for strategic investment in renewable energy initiatives in this area. The study underscores the necessity of height consideration in maximizing wind energy potential, with the most productive zones lying at higher altitudes.

The results of the current study suggest that the land suitability for wind power farms is highly variable and dependent on different heights within the regions of the middle Zarafshan River valley. The present study has been conducted on a macro level, providing a broad-scale analysis applicable across various regions. The model developed in this research offers a versatile framework that can be adapted to other geographic areas globally. By utilizing this model, it is possible to identify and evaluate regions with the highest potential for wind energy farming. This methodology can serve as a valuable tool for decision-makers and stakeholders looking to optimize site selection for wind energy projects, ensuring a more efficient and sustainable approach to harnessing renewable energy in diverse environmental and climatic contexts. In terms of governance, national policies and priorities have to reduce the usage of fossil fuels by replacing them with clean and sustainable energy alternatives. This study offers valuable insights into the development and utilization of renewable energy resources as a sustainable alternative to conventional energy sources. It is recommended that the government of the Republic of Uzbekistan implement strategic measures to transform the region into a wind energy zone, aligning with the objectives of the UN Sustainable Development Goals. Additionally, such policies will contribute significantly to meeting climate targets. The model presented in this research holds great potential for policymakers, providing crucial data to assess the region's capacity for renewable energy production, thereby supporting long-term energy sustainability and environmental resilience.

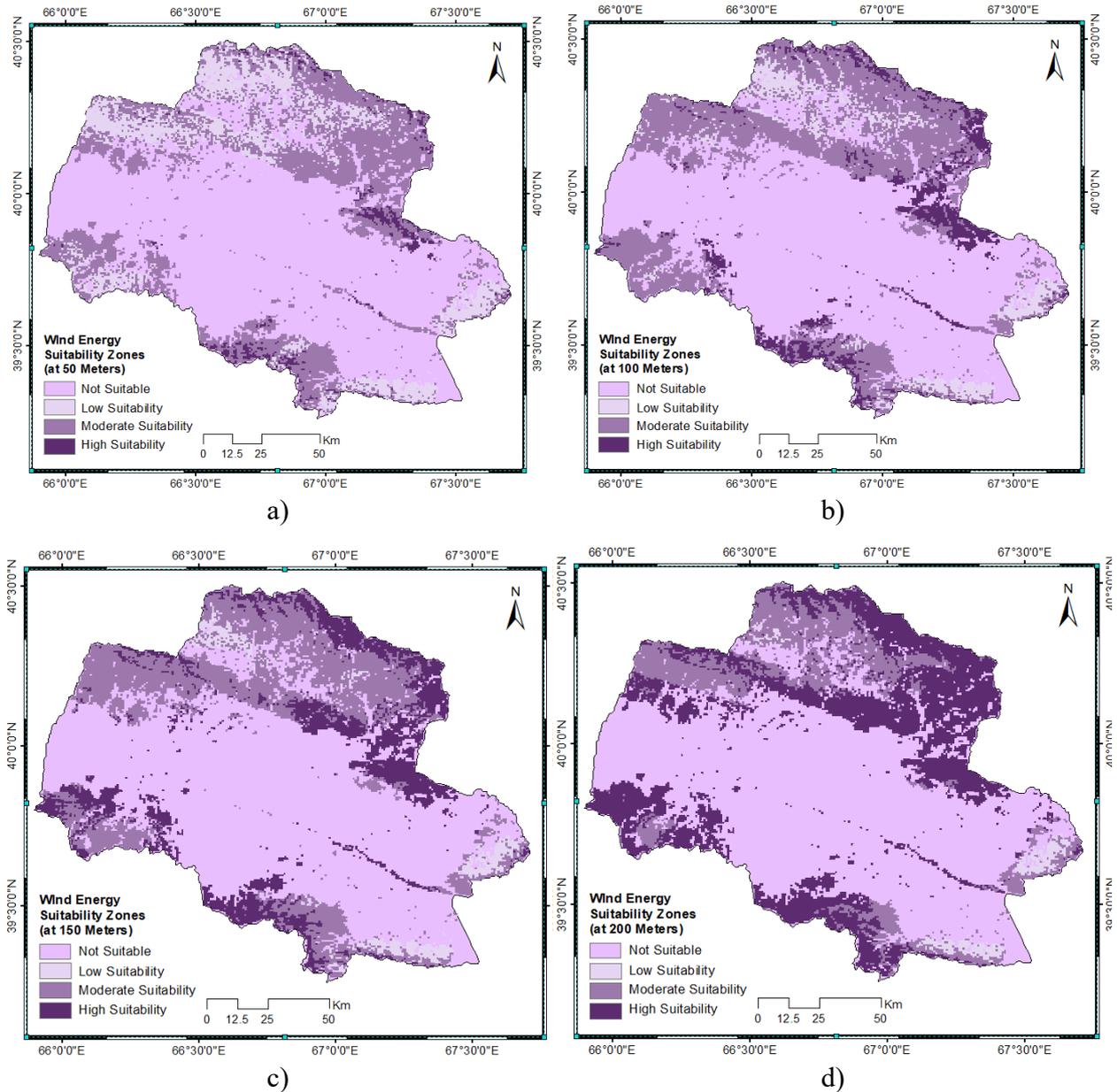


Fig. 6. Zoning of land suitability of wind energy farming in the study area (a–d)

CONCLUSIONS

The present study was undertaken to evaluate the effectiveness of geospatial datasets combined with weighted overlay models in forecasting wind power generation potential in the middle Zarafshan Valley. A comprehensive suitability index was calculated by incorporating multiple factors, including wind speed, terrain slope, proximity to road networks, distance to power transmission lines, and land use/land cover patterns. The findings revealed that the northern and southern parts of the valley emerged as the most suitable areas for wind power exploitation. These regions are characterized by undisturbed landscapes, low population density, well-connected road infrastructure, and other favorable conditions, making them ideal for renewable energy development. Among the four height categories examined, the lower elevations of 50 and 100 m showed the highest potential for wind energy generation compared to the higher elevations of 150 and 200 m. At 50 and 100 m, highly suitable and moderately suitable areas accounted for approximately 28 % and 36 % of the total land, respectively. This suggests that lower heights are

more likely to generate greater wind energy due to sustained wind intensities at those elevations. Additionally, the selected region includes Samarkand, Uzbekistan's second-largest city, indicating that economic viability and energy demand may further enhance the region's potential for wind energy development. The proximity to an urban center like Samarkand could play a critical role in energy generation and consumption, thereby contributing to energy conservation and the mitigation of climate change impacts. The study's results underscore the importance of selecting regions with optimal height and wind intensity for maximizing the benefits of wind power, offering a sustainable energy solution for Uzbekistan.

REFERENCES

- Abas N., Kalair A., Khan N.* Review of fossil fuels and future energy technologies. *Futures*, 2015. V. 69. P. 31–49.
- Adedeji P. A., Akinlabi S. A., Madushele N., Olatunji O. O.* Hybrid neuro-fuzzy wind power forecast and wind turbine location for embedded generation. *International Journal of Energy Research*, 2021. V. 45. P. 413–428.
- Ahmed M., Ahmad F., Akhtar M.* Assessment of Wind Power Potential for Coastal Areas of Pakistan. *Turkish Journal of Physics*, 2006. P. 30.
- Aktas A., Kabak M.* A model proposal for locating wind turbines. *Procedia Computer Science*, 2016. V. 102. P. 426–433.
- Aliyu A. K., Modu B., Tan C. W.* A review of renewable energy development in Africa: A focus in South Africa, Egypt and Nigeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. V. 81. P. 2502–2518. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.055.
- Amarasinghe A., Perera E.* Modeling predictive suitability to determine potential areas for establishing wind power plants in Sri Lanka. *Model Earth System Environment*, 2021. V. 7. P. 443–454.
- Amuzu-Sefordzi B., Martinus K., Tschakert P., Wills R.* Disruptive innovations and decentralized renewable energy systems in Africa: A sociotechnical review. *Energy Research & Social Science*, 2018. V. 46. P. 140–154. DOI: 10.1016/j.erss.2018.06.014.
- Avezova N., Khaitmukhamedov A., Vokhidov A.* Uzbekistan renewable energy short overview: Programs and prospects. *IJESG*, 2017. V. 2. P. 43–46. DOI: 10.23884/IJESG.2017.2.2.03.
- Barreto R. A.* Fossil fuels, alternative energy and economic growth. *Economic Modelling*, 2018. V. 75. P. 196–220.
- Baydyk T., Kussul E., Wunsch II D. C.* Renewable energy: solar, wind, and others. *Intelligent automation in renewable energy*. Cham: Springer, 2019. P. 1–11.
- Bersalli G., Menanteau P., El-Methni J.* Renewable energy policy effectiveness: A panel data analysis across Europe and Latin America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020. V. 133. 110351. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110351.
- Brunet C., Savadogo O., Baptiste P., Bouchard M. A.* Shedding some light on photovoltaic solar energy in Africa — A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. V. 96. P. 325–342. DOI: 10.1016/j.rser.2018.08.004.
- Bugaje I. M.* Renewable energy for sustainable development in Africa: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2006. V. 10. P. 603–612. DOI: 10.1016/j.rser.2004.11.002.
- Chamundeswari V., Niraimathi R., Shanthi M., Subahani A.* Renewable energy technologies. John Wiley & Sons, 2021. P. 1–18.

- Da Silva P. P., Cerqueira P. A., Ogbe W.* Determinants of renewable energy growth in sub-Saharan Africa: Evidence from panel ARDL. *Energy*, 2018. V. 156. P. 45–54. DOI: 10.1016/j.energy.2018.05.068.
- Farooq S., Sharma I., Khan M. N.* Geomorphic evidence of active tectonics in eastern Kumaon Himalaya as deciphered from the morphometry of Ramganga River basin. *International Journal of Advancement in Earth and Environmental Sciences*, 2015. V. 3. No. 1. P. 30–39.
- Hyvärinen A.* Wind turbines over a hilly terrain: performance and wake evolution. (Licentiate thesis, comprehensive summary), KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2018. DiVA database. Web resource: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-221675> (accessed 10.19.2024).
- Kahatapitiya C., Jayasooriya V., Muthukumaran S.* GIS-based weighted overlay model for wind and solar farm locating in Sri Lanka. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022. V. 30. DOI: 10.1007/s11356-022-24595-0.
- Katsaprakakis D. A., Papadakis N., Ntintakis I.* A comprehensive analysis of wind turbine blade damage. *Energies*, 2021. V. 14. P. 59–74.
- Khan M. S., Suhail M., Alharbi T.* Evaluation of urban growth and land use transformation in Riyadh using Landsat satellite data. *Arab Journal of Geosciences*, 2018. V. 11. P. 540. DOI: 10.1007/s12517-018-3896-5.
- Kochnakyan A., Khosla S. K., Buranov I., Hofer K., Hankinson D., Finn J.* Uzbekistan Energy/Power Sector Issues Note (Report No. ACS4146). World Bank, Washington, D.C., 2013.
- Laldjebaev M., Isaev R., Saukhimov A.* Renewable energy in Central Asia: An overview of potentials, deployment, outlook, and barriers. *Energy Reports*, 2021. V. 7. P. 3125–3136. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.05.014.
- Li L., Lin J., Wu N., Xie S., Meng C., Zheng Y., Wang X., Zhao Y.* Review and outlook on the international renewable energy development. *Energy and Built Environment*, 2020. DOI: 10.1016/j.enbenv.2020.12.002.
- McWilliam M., Van Kooten G., Crawford C.* A method for optimizing the location of wind farms. *Renewable Energy*, 2012. V. 48. P. 287–299.
- Ouedraogo N. S.* Opportunities, barriers, and issues with renewable energy development in Africa: a comprehensible review. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 2019. V. 6. P. 52–60. DOI: 10.1007/s40518019-00130-7.
- Pao L. Y., Johnson K. E.* A tutorial on the dynamics and control of wind turbines and wind farms. 2009 — American Control Conference. IEEE, 2009. P. 2076–2089.
- Rahman A., Farrok O., Haque M. M.* Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022. P. 161.
- Roehrkasten S.* Global governance on renewable energy. *Global Governance on Renewable Energy*. Springer, 2015.
- Shadrina E.* Non-hydropower renewable energy in central Asia: Assessment of deployment status and analysis of underlying factors. *Energies*, 2020. V. 13. P. 2963. DOI: 10.3390/en13112963.
- Shata A., Ahmed S., Hanitsch R.* The potential of electricity generation on the east coast of Red Sea in Egypt. *Renewable Energy*, 2006. V. 31. No. 10. P. 1597–1615. DOI: 10.1016/j.renene.2005.09.026.

Singer S., Denruyter J. P., Yener D. The energy report: 100 % renewable energy by 2050. Towards 100 % renewable energy. Springer, 2017.

Suhail M., Khan M. S., Faridi R. A. Assessment of Urban Heat Islands Effect and Land Surface Temperature of Noida, India by Using Landsat Satellite Data. MAPAN, 2019. V. 34. P. 431–441. DOI: 10.1007/s12647-019-00309-9.

Thomas A., Lennart S. An overview of wind energy status 2002. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2002. V. 6. P. 67–128.

UNDP. United Nations report on migration, 2014. Web resource: <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/eurasia/Uzbekistan.pdf> (accessed 10.19.2024).

Whiting K., Carmona L. G., Sousa T. A review of the use of exergy to evaluate the sustainability of fossil fuels and non-fuel mineral depletion. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. V. 76. P. 202–211.

Xu X., Wei Z., Ji Q., Wang C., Gao G. Global renewable energy development: Influencing factors, trend predictions and countermeasures. Resources Policy, 2019. V. 63. 101470. DOI: 10.1016/j.resourpol.2019.101470.

УДК: 338.012

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-193-207

А. А. Панкратов¹

ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ РЕЙТИНГА РЕГИОНОВ РОССИИ ПО УРОВНЮ РАЗВИТИЯ ИТ-ИНДУСТРИИ

АННОТАЦИЯ

Предлагаемое исследование посвящено анализу существующих подходов к разработке рейтингования регионов России по уровню развития ИТ-индустрии. Актуальность исследования определяется высоким стратегическим значением софтверной индустрии для развития российской экономики, ее инновационной направленностью, необходимостью разработки эффективной государственной политики в исследуемой сфере, а также проведением на системной основе реалистичной оценки текущего состояния и уровня развития ИТ-индустрии на территории субъектов Российской Федерации. Сложность репрезентативного ранжирования регионов России по уровню развития софтверной отрасли определяется отсутствием подробных и достоверных статистических данных, отражающих показатели деятельности российской ИТ-индустрии, влиянием экстерриториальных факторов размещения производственного потенциала ИТ-отрасли, а также высокой пространственной мобильностью как ИТ-компаний, так и ИТ-специалистов. В рамках исследования рассматривается методический подход к формированию рейтинга регионов России по уровню развития индустрии разработки программного обеспечения, подготовленный ассоциацией ИТ-компаний, разрабатывающих программное обеспечение «Руссофт». На основании данного подхода в исследовании предлагается дополнительный перечень статистических индикаторов, выявленных с учетом факторов конкурентоспособности российской ИТ-отрасли, на основании которых разрабатывается методический подход к рейтингованию регионов по уровню развития ИТ-индустрии. В рамках исследования осуществляется апробация предложенного подхода, полученные результаты сопоставляются с результатами рейтинга российских регионов ассоциации «Руссофт», определяются группы субъектов Российской Федерации по уровню развития софтверной индустрии, производится анализ и интерпретация выявленных различий. Результаты, полученные в рамках исследования, могут использоваться научно-исследовательскими и экспертно-аналитическими организациями в рамках разработки методического инструментария по оценке уровня развития российской ИТ-отрасли в разрезе субъектов Российской Федерации, федеральными и региональными органами исполнительной власти при подготовке стратегических документов в области развития российской ИТ-индустрии, моделировании инструментов ее государственной поддержки, а также определении приоритетных отраслевых направлений и территориальных центров развития российской ИТ-отрасли.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИТ-отрасль, регионы России, рейтинг регионов, пространственный анализ, «Руссофт»

¹ Московский государственный институт международных отношений (университет) МИД Российской Федерации (МГИМО), Институт международных исследований, пр. Вернадского, д. 76, Москва, Россия, 119454, e-mail: pankratov_aleksey_ml@mail.ru

Alexey A. Pankratov¹

APPROACHES TO DEVELOPING RATINGS OF RUSSIAN REGIONS BY LEVEL OF IT INDUSTRY DEVELOPMENT

ABSTRACT

The proposed study is dedicated to the analysis of existing approaches to developing ratings of Russian regions according to the level of development of the IT industry. The relevance of the study is determined by the high strategic importance of the software industry for the development of the Russian economy, its innovative orientation, the need to develop effective public policy in the area under study, as well as a systematically realistic assessment of the current state and level of development of the IT industry on the territory of the constituent entities of the Russian Federation. The complexity of a representative ranking of Russian regions according to the level of development of the software industry is determined by the lack of detailed and reliable statistical data reflecting the performance indicators of the Russian IT industry, the influence of extraterritorial factors in the location of the production potential of the IT industry, as well as the high spatial mobility of both IT companies and IT specialists. The study examines a methodological approach to forming a rating of Russian regions according to the level of development of the software design industry, elaborated by the Association of software development companies “Russoft”. Based on this approach, the study proposes an additional list of statistical indicators identified taking into account the competitiveness factors of the Russian IT industry, on the basis of which a methodological approach is developed for rating regions by the level of development of the IT industry. As part of the study, the proposed methodological approach is tested, the results obtained are compared with the results of the rating of Russian regions of “Russoft”, groups of constituent entities of the Russian Federation are classified by the level of development of the software industry, and the differences identified are analyzed and interpreted. The results obtained as part of the study can be used by research and expert analytical organizations as part of the development of methodological tools for assessing the level of development of the Russian IT industry in the context of the constituent entities of the Russian Federation, federal and regional executive authorities when preparing strategic documents in the field of development of the Russian IT industry, modeling the state support instruments, as well as identifying priority industry areas and territorial centers for the development of the Russian IT industry.

KEYWORDS: IT industry, Russian regions, regional ratings, spatial analysis, “Russoft”

ВВЕДЕНИЕ

Рейтингование территориальных образований по уровню развития тех или иных социально-экономических параметров и характеристик [Унтура, 2012; Митяков и др., 2017], формирование на их основе картографических схем и изображений [Черкасов и др., 2020; Черешня, Грибок, 2023] является одним из наиболее доступных и эффективных инструментов пространственного анализа [Бабурин, Горячко, 2009; Зубаревич, 2010; Коломак, 2013]. Рейтингование территорий позволяет сформировать достоверное понимание текущего состояния и уровня развития исследуемых процессов, что является особенно ценным обстоятельством в условиях дефицита времени, ограниченности поисково-исследовательских ресурсов и возможностей. Ключевым элементом метода

¹ Moscow State Institute of International Relations (MGIMO University), Institute for International Studies, 76, Vernadsky ave., Moscow, 119454, Russia, e-mail: pankratov_aleksey_ml@mail.ru

рейтингования является сравнительный анализ различных территорий между собой [Михеева, 2014], в результате которого наглядно выделяются определенные типы территорий по уровню развития исследуемых социально-экономических процессов и характеристик.

Формирование рейтингов необходимо при разработке и обосновании социально-экономической, отраслевой и пространственной политики, выявлении наиболее развитых и отстающих территорий, формировании с учетом этого дифференцированных подходов к их развитию и поддержке [Кузнецова, 2019, 2023]. Так, инструменты государственной отраслевой и пространственной политики, применимые к регионам-лидерам, могут оказаться неактуальными и нецелесообразными для отстающих регионов и наоборот. Недоучет пространственной дифференциации в развитии социально-экономических процессов, в свою очередь, может оказаться лимитирующим фактором в итоговой результативности предпринимаемых управленческих действий [Бадина, Панкратов, 2024]. Таким образом, особенно важно, чтобы методология рейтингования была качественно сформирована и в высокой степени проработана, наиболее полно и репрезентативно отражала исследуемые социально-экономические процессы. От уровня проработанности методологических основ, определяющих методические подходы к рейтингованию, прямым образом зависит качество и репрезентативность получаемых в рамках рейтингования результатов.

Оценка качества применяемых методик является наиболее проблемной стороной в процессе рейтингования, анализа и интерпретации результатов. Влияние субъективных и необоснованных факторов, недоучет значимых факторов, неверно сформированная система весовых коэффициентов и многие другие аспекты в рамках разработки методик рейтингования представляют собой те дискуссионные аспекты, которые требуют системного взгляда, изучения и обсуждения. Указанные обстоятельства определяют необходимость сохранения на постоянной основе критического взгляда на те или иные методические подходы, а также постоянного совершенствования методов построения и интерпретации социально-экономических рейтингов.

Разработка различных рейтингов субъектов Российской Федерации, как правило, является особенно ответственной исследовательской и аналитической задачей, т. к. прямым образом влияет на позиционирование регионов по тем или иным рассматриваемым характеристикам, что в свою очередь может использоваться при оценке результативности деятельности региональных органов исполнительной власти. Именно поэтому разрабатываемые рейтинги регионов должны в максимально возможной степени соответствовать действительности и отражать текущее состояние исследуемых процессов. В противном случае рейтинги могут превратиться в инструмент продвижения определенных интересов и источник недостоверной информации.

Предлагаемое исследование посвящено анализу существующих подходов к разработке рейтингования регионов России по уровню развития ИТ-индустрии. Целью исследования является разработка системы индикаторов, отражающих состояние и уровень развития ИТ-индустрии в регионах России, и на основании нее — методического подхода к рейтингованию субъектов Российской Федерации по исследуемым характеристикам. В рамках исследования рассматриваются существующие методические подходы к оценке уровня развития индустрии разработки программного обеспечения, в т. ч. рейтинг регионов России, разработанный ассоциацией ИТ-компаний «Руссофт», производится анализ методического подхода к построению указанного рейтинга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рейтингование регионов России по уровню развития ИТ-индустрии является относительно новой и вследствие этого малоизученной темой, как в нормативных правовых документах, так и в отечественной научной литературе. Во-первых, тематика развития ИТ-индустрии в целом является относительно молодым направлением научных исследований, во-вторых, на уровне государственной статистики ИТ-отрасль не рассматривается как отдельный сегмент российской экономики, в-третьих, у разных исследователей в значительной степени различаются подходы к определению отраслевого содержания ИТ-отрасли, смысловой интерпретации рассматриваемого понятия. Тем не менее, в настоящее время исследуемая тема обладает высокой актуальностью, ее значимость еще более возросла с ужесточением санкционного давления на российскую экономику, уходом западных ИТ-компаний с российского ИТ-рынка, а также необходимостью обеспечения технологического суверенитета в данной области.

Построение рейтинга регионов по уровню развития софтверной отрасли можно отнести к большой группе региональных рейтингов в области инновационного развития, среди которых следует выделить как более общие рейтинги, например, рейтинг инновационных регионов России¹, рейтинг регионов SMART² (оба рейтинга подготовлены Ассоциацией инновационных регионов России, АИРР), национальный рейтинг научно-технологического развития субъектов Российской Федерации³ (Минобрнауки России), рейтинг инновационного развития субъектов Российской Федерации⁴ (НИУ ВШЭ), так и более специальные и узконаправленные рейтинги, близкие по смыслу к рейтингу регионов по уровню развития ИТ-индустрии — рейтинг субъектов Российской Федерации по внедрению платформы обратной связи⁵, рейтинг регионов России по развитию информационного общества⁶ (оба — Минцифры России), рейтинг регионов России по работе в Интернете⁷ (АНО «Диалог»), рейтинг регионов России по качеству предоставления электронных госуслуг⁸ (Минэкономразвития России) и многие другие.

Ассоциацией ИТ-компаний-разработчиков программного обеспечения «Руссофт» начиная с 2019 г. рассчитывается ежегодный рейтинг регионов России по уровню развития индустрии разработки программного обеспечения⁹, основной целью которого является получение максимально полной и разносторонней информации о том, в каком состоянии находится софтверная отрасль в конкретном регионе, каковы у нее перспективы развития и

¹ Электронный ресурс: <https://i-regions.org/reiting/rejting-innovatsionnogo-razvitiya/> (дата обращения 25.04.2024)

² Электронный ресурс: <https://i-regions.org/reiting/rejting-regionov-smart/> (дата обращения 25.04.2024)

³ Электронный ресурс: <https://static.minobrnauki.gov.ru/action/stat/rating/> (дата обращения 25.04.2024)

⁴ Электронный ресурс: <https://www.hse.ru/primarydata/rir> (дата обращения 25.04.2024)

⁵ Электронный ресурс: <https://digital.gov.ru/ru/events/50726/> (дата обращения 25.04.2024)

⁶ Электронный ресурс: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/783/> (дата обращения 25.04.2024)

⁷ Электронный ресурс: <https://dialog.info/ratings/heads-of-regions-personal-pages/> (дата обращения 25.04.2024)

⁸ Электронный ресурс: https://www.economy.gov.ru/material/news/minekonomrazvitiya_predstavilo_itogi_monitoringa_kachestva_elektronnyh_uslug_v_regionah_rf.html (дата обращения 25.04.2024)

⁹ При расчете рейтинга «Руссофт» рассматриваются ИТ-предприятия, основным видом экономической деятельности которых является разработка компьютерного программного обеспечения (коды ОКВЭД-2 62.0 и 62.01). В то же время Институт статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ в рамках своих исследований к отрасли информационных технологий относит совокупность видов экономической деятельности, связанных с разработкой программного обеспечения (62.01), оказанием услуг (выполнением работ) в области компьютерных технологий (62.02, 62.03), обработкой данных, размещением информации (63.11)

какие для этого существуют ресурсы¹. Рассматриваемый рейтинг является весьма ценным с информационно-аналитической точки зрения, т. к. во многом выстраивается на уникальных статистических данных, собираемых и агрегируемых ассоциацией «Руссофт» от предприятий ИТ-отрасли, в т. ч. являющихся участниками ассоциации.

Основу методики расчета рейтинга составляет промежуточное рейтингование субъектов Российской Федерации по отдельным статистическим показателям по вкладу (доле) каждого конкретного региона России в общероссийский показатель. Перечень используемых при расчете рейтинга показателей несколько корректировался на протяжении периода расчета рейтинга в 2019–2023 гг. (табл. 1).

Табл. 1. Показатели, используемые при формировании рейтинга регионов России по уровню развития индустрии разработки программного обеспечения «Руссофт»
Table 1. Indicators used in calculating the rating of Russian regions according to the level of development of the software development industry, by “Russoft”

Показатель	Источник данных	Использование показателя				
		2019	2020	2021	2022	2023
Совокупный оборот (выручка)	Руссофт	+	+	+	+	+
Корректированный совокупный оборот с поправкой на наличие удаленных центров разработки					+	+
Совокупный оборот (выручка) на душу населения			+	+	+	+
Совокупный штат предприятий					+	+
Потенциал развития разработки программного обеспечения ²					+	+
Рейтинг городов по качеству работы учебных заведений (данные опроса)					+	+
Оценка государственной поддержки (данные опроса)					+	
Количество аккредитованных ИТ-компаний	Минцифры России	+	+	+	+	+
Количество ИТ-компаний в базе “hh.ru”	HeadHunter	+	+	+		
Количество компаний с открытыми вакансиями		+	+	+		+
Количество вакансий программистов		+	+	+	+	+
Объем экспорта компьютерных услуг	Банк России	+	+	+	+	
Совокупный экспорт на душу населения	Банк России, расчеты Руссофт	+	+	+	+	
Абсолютный / относительный (индекс) рост экспорта услуг		+	+	+	+	
Доля экспорта компьютерных услуг в общем экспорте услуг региона				+	+	

Источник: «Руссофт». Рейтинги регионов: Разработка ПО в России в региональном разрезе, 2019–2023 гг., составлено автором

¹ Руссофт. Рейтинг регионов России по уровню развития индустрии разработки ПО. 5-й рейтинг регионов РУССОФТ. Электронный ресурс: <https://russoft.org/wp-content/uploads/2023/12/Rejting-regionov-web.pdf> (дата обращения 25.04.2024)

² Индикатор впервые появляется в методике рейтинга за 2022 г. Потенциал развития разработки программного обеспечения рассчитывается умножением численности жителей региона на средний по России совокупный оборот (экспорт) на душу населения и вычитанием из этого значения объема фактического совокупного оборота (экспорта)

Рейтингование «Руссофт» изначально охватывало не все регионы России, а 40 наиболее крупных с точки зрения развития ИТ-индустрии и еще 10 регионов, которым не присваивался ранг, но которые имели предпосылки к ускоренному развитию ИТ-индустрии и обладали возможностями для вхождения в число относительно развитых крупных регионов (так называемая группа «Генезис-3»). В рейтинге 2019 г. исследуемые 50 регионов интерпретировались как регионы, «в которых имеются хотя бы зачатки формирования софтверной индустрии»¹. В рейтинге 2020 г. указывалось, «что реально сформировавшаяся софтверная индустрия имеется примерно в 15 регионах России, еще в 15 регионах можно оценивать состояние и перспективы развития существующих предприятий»². Начиная с 2019 г. основным критерием отбора топ-50 регионов являлось их ранжирование по показателю объема экспорта телекоммуникационных, компьютерных, информационных услуг, предоставляемого Центральным Банком России. В 2022 г. российская внешнеторговая статистика была исключена из общего доступа, вследствие чего при расчете рейтинга топ-50 исследуемых регионов России стали определяться на основании их ранжирования по показателю общего объема выручки региональных ИТ-компаний.

Остальные 35 регионов России, не учитываемые при ранжировании и последующем анализе, характеризовались в рейтингах 2019–2020 гг. и 2023 г. как «субъекты федерации, имеющие незначительные по объемам показатели, которыми можно пренебречь», также указывалось, что «изучать потенциал развития софтверной индустрии в этих регионах преждевременно». В рейтингах 2021–2022 гг. данные регионы интерпретировались как регионы с «нулевыми показателями экспорта софтверных компаний, вследствие чего говорить даже о каких-либо зачатках софтверной индустрии в том или ином регионе не приходится»³.

Указанные особенности отчетливо демонстрируют дискретный характер развития ИТ-отрасли на территории Российской Федерации и отражают крайне неравномерную территориальную организацию ее экономического потенциала [Панкратов, 2023]. На протяжении всего периода наблюдения сохраняется устойчивая картина: выделяется группа регионов, лидирующих с большим отрывом: Москва и Санкт-Петербург; к развитым регионам в разные годы относятся Нижегородская, Новосибирская, Свердловская Самарская области, Республика Татарстан; в качестве регионов-претендентов на лидерство рассматриваются Ростовская, Московская, Воронежская, Ярославская, Калининградская, Саратовская области, Пермский край, Удмуртская Республика и Краснодарский край и др.

Ежегодные рейтингования «Руссофт» демонстрируют, что ситуация в области территориальной организации потенциала отрасли разработки ПО является весьма статичной и слабо трансформируется с течением времени [Панкратов и др., 2021]. Указанное обстоятельство в свою очередь определяет необходимость и целесообразность корректировки визионерского направления подобных исследований: от анализа текущей ситуации, что фактически представляет собой констатацию сложившихся фактов, к измерению потенциала, предпосылок и факторов развития ИТ-индустрии, выявлению новых центров роста — перспективных территориальных образований — для их последующей целевой поддержки [Pankratov et al., 2021].

¹ Руссофт. Рейтинг регионов: Разработка ПО в России в региональном разрезе – 2019. Электронный ресурс: <https://russoft.org/wp-content/uploads/2019/12/Rejting-regionov.pdf> (дата обращения 25.04.2024)

² Руссофт. Рейтинг регионов: Разработка ПО в России в региональном разрезе – 2020. Электронный ресурс: <https://russoft.org/wp-content/uploads/2020/12/2020-Rejting-regionov.pdf> (дата обращения 25.04.2024)

³ Руссофт. Рейтинг регионов России по уровню развития индустрии разработки ПО. 5-й рейтинг регионов РУССОФТ. Электронный ресурс: <https://russoft.org/wp-content/uploads/2023/01/Rejting-regionov.pdf> (дата обращения 25.04.2024)

В рамках настоящего исследования предлагается методический подход к оценке уровня и потенциала развития ИТ-отрасли, выстраиваемый на основании более широкого перечня социально-экономических и географических индикаторов, характеризующих условия социально-экономической среды для развития ИТ-индустрии. Подбор данных индикаторов определяется факторами, значимыми для развития ИТ-индустрии [Лавриненко и др., 2019; Максименко, 2023], которые в свою очередь характеризуют различные стратегии развития и поддержки ИТ-отрасли в разных регионах России. К таким факторам следует отнести экономический потенциал хозяйственной системы региона и его ИТ-отрасли, уровень развития конкурентной среды на региональном ИТ-рынке, уровень жизни населения в регионе, инновационный и образовательный потенциал региональной экономики, а также условия для проживания населения и параметры качества жизни (табл. 2).

Табл. 2. Факторы и статистические показатели, используемые при оценке уровня и потенциала развития ИТ-отрасли в регионах России в 2022 г.
Table 2. Factors and statistical indicators used in assessing the level and potential of development of the IT industry in the regions of Russia in 2022

Фактор / весовой коэффициент, %	Показатель (индикатор)	Источник данных	Единица измерения
Экономический потенциал (30 %)	Валовой региональный продукт (ВРП)	Росстат	млн руб.
	Объем выручки ИТ-компаний	СПАРК-Интерфакс	чел.
	Количество занятых в ИТ-компаниях		ед.
Конкурентная среда (10 %)	Количество ИТ-компаний с ненулевой выручкой		
Уровень жизни (10 %)	Среднедушевые денежные доходы населения		тыс. руб.
Инновационный потенциал (20 %)	Доля внутренних затрат на НИОКР	Росстат	% к ВРП
	Доля инновационных товаров, работ, услуг		% от общ. объема
Образовательный потенциал (20 %)	Число образовательных организаций высшего образования	ГИВЦ Минобрнауки России	ед.
	Численность студентов, обучающихся по программам высшего образования	Минобрнауки России	чел. на 10 000 населения
Условия для проживания и качество жизни (10 %)	Средний индекс качества городской среды ¹	Минстрой России	баллы
	Средняя годовая температура в административном центре ²	Гидрометцентр России	градусы Цельсия

Источник: составлено автором

¹ Для оценки условий качества жизни используется комплексный социально-экономический показатель средний индекс качества городской среды, в том числе учитывающий оценку качества жилья, улично-дорожной сети, социальной и досуговой инфраструктуры. Методика расчета показателя утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 23 марта 2019 г. № 510-р. Электронный ресурс: <https://docs.cntd.ru/document/553937399> (дата обращения 01.08.2024)

² Для оценки условий для проживания населения используется показатель средней годовой температуры в административном центре, являющийся важнейшим климатическим показателем местности, широко применяемым при анализе качества условий для проживания [Анисимов и др., 2007; Ревич и др., 2008; Виноградова, 2021]

Указанные в табл. 2 статистические индикаторы были приведены в единую систему измерения с помощью метода линейного масштабирования, после чего методом нахождения среднего арифметического по нормированным значениям индикаторов отдельно были рассчитаны факторные индекс-компоненты рейтинга. На завершающем этапе методом расчета среднего арифметического факторных индексов-компонентов было определено интегральное значение индекса оценки уровня и потенциала развития ИТ-отрасли в регионах России.

При проведении расчетов в соответствии с предложенным методическим подходом из выборки регионов были исключены 2 региона-лидера — Москва и Санкт-Петербург — в целях получения репрезентативных результатов среди остальной выборки российских регионов и более эффективного выявления потенциальных территориальных центров развития ИТ-индустрии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассчитанный рейтинг субъектов Российской Федерации по уровню и потенциалу развития ИТ-отрасли был дифференцирован на 4 группы регионов (рис. 1):

- **лидеры 2-го порядка** — наиболее крупные с точки зрения развития ИТ-отрасли регионы после Москвы и Санкт-Петербурга;
- **потенциальные центры** — регионы, располагающие необходимым ресурсным потенциалом для эффективного развития ИТ-индустрии, обладающие реальными возможностями в среднесрочной перспективе улучшить свое положение в рейтинге;
- **регионы, располагающие условиями для развития ИТ-индустрии**, но не являющиеся в настоящее время значимыми территориальными центрами российской ИТ-отрасли, для развития которых требуется разработка отраслевых и инвестиционных стратегий, приоритетное внимание к ИТ-отрасли со стороны федеральных и региональных органов исполнительной власти;
- **периферийные регионы**, наименее развитые в исследуемой сфере, характеризующиеся низким потенциалом для развития ИТ-отрасли.

Сформированная в рамках методического подхода система статистических показателей, факторных индексов и их весовых коэффициентов приводит к получению репрезентативных результатов, которые в целом соответствуют результатам рейтингования «Руссофт» и таким образом дополнительно их верифицируют. С учетом того, что анализируемая картина пространственного развития ИТ-отрасли в настоящее время в значительной степени сформировалась, характеризуется устойчивостью во времени и в целом является весьма понятной с аналитической точки зрения, при анализе полученных результатов гораздо важнее сосредоточиться на интерпретации выявленных расхождений с рейтингом «Руссофт»¹, уделив наиболее пристальное внимание развитым регионам-лидерам, определить причины и факторы данных расхождений, сформировать выводы об итоговой репрезентативности сравниваемых рейтингов и методических подходов.

В группе регионов-лидеров 2-го порядка, как и в рейтинге «Руссофт» (категории «лидеры» и «претенденты на лидерство»), представлены Республика Татарстан, Московская, Нижегородская, Свердловская, Новосибирская, Ростовская, Самарская, Челябинская, Ульяновская области и Краснодарский край. Существенные расхождения в данной категории характерны для позиции Республики Башкортостан, которая в рассчитанном рейтинге заняла 13 место, в то время как в рейтинге «Руссофт» только 28 место. Относительно низкая позиция Башкирии в рейтинге «Руссофт» никак не

¹ Под значительным расхождением в данном случае понимается разница ранга того или иного региона России в рассматриваемых рейтингах, превышающая 10 позиций

интерпретируется, в то же время ее положение является явно недооцененным, т. к. регион занимает 12 и 14 места соответственно по факторным индексам — экономический и образовательный потенциал: в регионе действует 40 вузов (12 место в стране); по объему ВРП и объему выручки ИТ-компаний регион занимает 15 место, по количеству занятых в ИТ-отрасли — 16 место.



Рис. 1. Рейтинг регионов России по уровню и потенциалу развития ИТ-отрасли, 2022
Fig. 1. Rating of Russian regions by level and potential for development of the IT industry, 2022
Источник: рассчитано и составлено автором

В рассчитанном в рамках исследования рейтинге в группу регионов-лидеров 2-го порядка не вошли Пермский край, Воронежская и Ярославская области, Удмуртская Республика, а также Калининградская и Саратовская области, которые в рейтинге «Руссофт» включены в категорию «претенденты на лидерство». Если первые четыре региона возглавляют следующую категорию рейтинга («потенциальные центры»), и по ним разница рангов в исследуемых рейтингах в целом незначительна и составляет менее 10 позиций, то для Калининградской и Саратовской областей характерны существенные расхождения: в рейтинге «Руссофт» они занимают 13 и 14 места соответственно, в рассчитанном рейтинге — 33 и 29 места.

Высокое место Калининградской области в рейтинге «Руссофт», в первую очередь, объясняется «региональными предпочтениями местным ИТ-компаниям, что стимулирует предприятия из других регионов переводить в этот регион свои штаб-квартиры», т. е. теми факторами, которые невозможно выявить на основании данных официальной статистики и которые содержатся в базах аналитических данных «Руссофт». Если рассматривать положение региона по факторным индексам рассчитанного в рамках исследования рейтинга, его низкое положение проявляется в факторах, которые напрямую не относятся к индикаторам развития ИТ-индустрии: уровень жизни — 48 место в стране; образовательный потенциал — 52 место; инновационный потенциал — 61 место. Таким

образом, относительно низкое положение региона определяют дополнительные факторы, что также частично подтверждается и в рейтинге «Руссофт»: «система образования региона в плане подготовки специалистов для программной индустрии не попадает даже в топ-30». В то же время по объему выручки ИТ-компаний Калининградская область в рассчитанном рейтинге занимает 10 место среди остальных регионов России, но ее данного высокого положения все же оказывается недостаточно, чтобы попасть в топ-15 регионов.

Расхождение позиции Саратовской области в анализируемых рейтингах менее выражено, объяснение различий во многом аналогично интерпретации различных позиций Калининградской области. По объему выручки ИТ-компаний Саратовская область занимает 17 место в стране, по количеству занятых на предприятиях ИТ-отрасли — 21 место. Однако рассмотрение дополнительных факторов определяет ее более низкое положение в рассчитанном рейтинге по сравнению с рейтингом «Руссофт»: инновационный потенциал — 52 место, уровень жизни — 74 место. В то же время регион имеет относительно высокие позиции по образовательному потенциалу (19 место), а также по условиям проживания и качеству жизни (26 место).

Отдельно следует выделить группу недооцененных в рейтинге «Руссофт» регионов: Республика Мордовия (25 место против 14), Ставропольский край (33 место против 21) и Красноярский край (35 место против 23). Высокое положение Мордовии в рассчитанном рейтинге определяется высоким положением региона по экономическому потенциалу (17 место) среди остальных регионов и уровню инновационного развития (5 место). Примечательно, что по показателю доли инновационных товаров, работ и услуг от их общего объема в 2022 г. регион занял 1 место, опередив Республику Татарстан и столичные центры¹. В рейтинге «Руссофт» высокое место Мордовии во многом определяется системой образования, по показателям которой регион занимает 2 место.

Ставропольский край в рейтинге «Руссофт» 2022 г. занимал 25 позицию, однако в последнем рейтинге 2023 г. переместился на 8 ступеней вниз, заняв 33 место. Высокая изменчивость ранговых позиций в данном случае не может рассматриваться в качестве фактора, положительно характеризующего используемый методический подход. Более того, обоснования реальных причин существенных изменений позиции Ставропольского края в рейтинге «Руссофт» не представлено. В то же время в рассчитанном рейтинге регион занимает высокие позиции по факторам образовательного потенциала (14 место среди регионов России) и инновационного развития экономики (16 место), а также по условиям для проживания и качеству жизни (17 место). Вместе с более развитыми Краснодарским краем и Ростовской областью Ставропольский край формирует территориальный кластер ИТ-развития на Юге России и в этой связи его положение в рейтинге «Руссофт» является явно недооцененным.

Еще более недооцененным является и положение Красноярского края (35 место) — региона, который является крупнейшим экономическим, инновационным и образовательным центром Восточной Сибири, с самым восточным городом-миллионером России. В рейтинге «Руссофт» за 2022 г. позиция Красноярского края была еще более низкой: регион не попал в перечень ранжированных. В то же время по большинству факторных индексов в рамках рассчитанного рейтинга, кроме качества жизни и инновационного потенциала экономики, Красноярский край входит в топ-20 регионов России.

Среди значительных расхождений между результатами рейтингования следует также отметить полученные более низкие позиции регионов Центральной России в

¹ Республика Мордовия на протяжении последних лет является одним из лидеров по показателям инновационного развития. Электронный ресурс: <https://www.e-mordovia.ru/glava-rm/novosti/rejting-vshe-mordoviya-v-chisle-desyati-luchshikh-regionov-p/> (дата обращения 25.04.2024)

рассчитанном рейтинге по сравнению с рейтингом «Руссофт» — для Рязанской области (42 место против 23), Владимирской области (48 место против 37), Орловской области (49 место против 24), Брянской области (52 место против 38), Костромской области (77 место против 26). Ключевым объяснением более высоких позиций данных регионов в рейтинге «Руссофт» является влияние фактора наличия функционирующих в регионах удаленных центров разработки компаний из других субъектов Российской Федерации, что не находит отражения в данных официальной статистики. В то же время нельзя не согласиться и оставить без внимания реальное более высокое положение данных регионов, значительная часть производственного, инновационного и кадрового потенциала которых аккумулируется в Москве и Московской области и не идет им в зачет. Использование уникальных статистических данных и результатов опросов отраслевого сообщества «Руссофт» в данном случае позволяет улучшить территориальную прослеживаемость экономического потенциала софтверной индустрии и получить более точные и репрезентативные результаты.

Другой существенной проблемой, выявленной в рамках предлагаемого в исследовании факторного рейтингования, является пространственное несоответствие экономического и инновационного потенциала российских регионов, когда регионами-лидерами по уровню экономического развития и уровню жизни населения являются ресурсодобывающие северные регионы, гораздо менее привлекательные для развития наукоемких высокотехнологичных видов экономической деятельности, в т. ч. таких как ИТ-индустрия. Так, в рассчитанном рейтинге относительно высокие места заняли Ямало-Ненецкий автономный округ (26 место), Хабаровский край (27 место), Мурманская область (31 место) и Ханты-Мансийский автономный округ (32 место), которые в рейтинге «Руссофт» вообще не попали в анализируемую выборку ранжируемых регионов и которые позиционируются как «ничтожно малые с точки зрения развития ИТ-индустрии».

Значимой проблемой для государственной региональной инновационной политики является низкий уровень развития ИТ-индустрии регионов Восточной Сибири, и особенно Дальнего Востока. Оба рейтинга подтверждают проблему: восточнее Новосибирска отсутствуют сопоставимые с группой регионов-лидеров крупные центры развития ИТ-индустрии. С точки зрения стратегических вопросов развития страны, обеспечения ее национальной безопасности, такие крупные ИТ-центры, если они не сложились в естественных условиях рыночной экономики, необходимо создавать и поддерживать за счет инструментов государственной региональной политики. Такими стратегически значимыми опорными центрами в среднесрочной перспективе могут и должны стать крупнейшие города Восточной Сибири и Дальнего Востока: Красноярск, Иркутск, Хабаровск и Владивосток.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование позволило получить ряд важных теоретико-практических результатов, которые могут использоваться при разработке отраслевых и пространственных стратегий. В целях повышения эффективности и репрезентативности рейтингования регионов России по тем или иным социально-экономическим характеристикам крайне важно разрабатывать и одновременно применять несколько взаимно-верифицирующих методических подходов.

Исследование также показало, что для повышения прикладной целесообразности различных рейтингов необходимо трансформировать целевые установки их формирования, корректировать методические подходы к рейтингованию, совершенствовать исследовательские подходы к анализу результатов. В данном отношении социально-экономические процессы важно изучать не как статические данности, результатом чего, как

правило, является констатация очевидных фактов, а исследовать их с точки зрения выявления факторов и предпосылок формирования текущего положения, определения и обоснования возможностей изменения этого положения в обозримой перспективе.

Социально-экономические рейтинги должны, помимо прочего, использоваться как основание для проведения активной экономической политики. Факторное рейтингование целесообразно и необходимо не только потому, что оно предполагает использование более широкого набора статистических показателей и индикаторов, а в первую очередь потому, что на основании различных факторных характеристик возможно выработка различных региональных моделей и стратегий развития и поддержки исследуемых социально-экономических процессов.

Так, высокое положение Республики Башкортостан по уровню образовательного потенциала определяет приоритетную стратегию развития региональной ИТ-индустрии на базе университетских центров; высокое положение Красноярского края по уровню развития конкурентной среды может стать основанием для региональной модели кластерного развития ИТ-отрасли; Ставропольский край, используя свои конкурентные преимущества благоприятной среды для проживания и развитый туристско-рекреационный потенциал, может стать притягательным центром для удаленной работы ИТ-компаний и ИТ-специалистов из разных регионов страны и т. д.

Наконец, исследование продемонстрировало необходимость поддержки развития ИТ-индустрии во всех регионах страны как элемента современной технологической инфраструктуры, обеспечивающей эффективное социально-экономическое развитие и национальную безопасность. В данном отношении важно коренным образом трансформировать сложившийся подход к пространственному анализу развития ИТ-отрасли, когда территория страны фактически дифференцируется на три зоны: 2 крупнейших столичных центра, 15–20 промежуточных центров развития ИТ-индустрии и остальные регионы (половина страны), позиционируемые в качестве глубокой периферии, в границах которой ИТ-отрасль фактически отсутствует. В рамках такой пространственной картины особенно важно анализировать территорию всей страны, сосредоточиться на проблемных территориях, выявлять потенциальные центры и точки роста для их последующей поддержки.

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

Анисимов О. А., Лобанов В. А., Ренева С. А. Анализ изменений температуры воздуха на территории России и эмпирический прогноз на первую четверть XXI века. Метеорология и гидрология, 2007. № 10. С. 20–30.

Бабурин В. Л., Горячко М. Д. Стратегическое управление региональным развитием: экономико-географический подход. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2009. № 5. С. 53–58.

Бадина С. В., Панкратов А. А. Береговые природно-хозяйственные системы Печорско-Карского региона в контексте рисков климатических изменений. Экономика региона, 2024. Т. 20. № 2. С. 506–521. DOI: 10.17059/ekon.reg.2024-2-11.

Виноградова В. В. Районирование России по природным условиям жизни населения с учетом экстремальных климатических событий. Известия РАН. Серия географическая, 2021. Т. 85. № 1. С. 5–13. DOI: 10.31857/S2587556621010167.

Зубаревич Н. В. Регионы России: неравенство, кризис, модернизация. М.: Независимый институт социальной политики, 2010. 160 с.

Коломак Е. А. Неравномерное пространственное развитие в России: объяснения новой экономической географии. Вопросы экономики, 2013. № 2. С. 132–150. DOI: 10.32609/0042-8736-2013-2-132-150.

Кузнецова О. В. Стратегия пространственного развития Российской Федерации: иллюзия решений и реальность проблем. Пространственная экономика, 2019. Т. 15. № 4. С. 107–125. DOI: 10.14530/se.2019.4.107-125.

Кузнецова О. В. Рейтинг научно-технологического развития регионов: подходы, итоги, вызовы. Проблемы прогнозирования, 2023. № 4 (199). С. 94–103. DOI: 10.47711/0868-6351-199-94-103.

Лавриненко П. А., Михайлова Т. Н., Ромашина А. А., Чистяков П. А. Агломерационные эффекты как инструмент регионального развития. Проблемы прогнозирования, 2019. № 3 (174). С. 50–59.

Максименко Д. Д. Актуальные факторы размещения высокотехнологичных производств в России. Региональные исследования, 2023. № 4 (82). С. 29–40. DOI: 10.5922/1994-5280-2023-4-3.

Митяков С. Н., Митякова О. И., Мурашова Н. А. Инновационное развитие регионов России: методика рейтингования. Инновации, 2017. № 9 (227). С. 97–104.

Михеева Н. Н. Сравнительный анализ инновационных систем российских регионов. Пространственная экономика, 2014. № 4. С. 61–81. DOI: 10.14530/se.2014.4.061-081.

Панкратов А. А., Мусаев Р. А., Бадина С. В. Оценка потенциала кластеризации ИТ-отрасли России в 2005–2018 гг. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф., 2021. Т. 27. Ч. 1. С. 44–59. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-44-59.

Панкратов А. А. Анализ современного состояния Российской ИТ-отрасли: ключевые проблемы и тенденции. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф., 2023. Т. 29. Ч. 1. С. 201–216. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-201-216.

Ревич Б. А., Шапошников Д. А., Семутникова Е. Г. Климатические условия и качество атмосферного воздуха как факторы риска смертности населения Москвы. Медицина труда и промышленная экология, 2008. № 7. С. 29–35.

Унтура Г. А. Стратегическая поддержка регионов России: проблемы оценки статуса территорий инноваций. Регион: экономика и социология, 2012. № 1 (73). С. 123–141.

Черешня О. Ю., Грибок М. В. Комплексная оценка цифрового неравенства в регионах России. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф., 2023. Т. 29. Ч. 1. С. 143–157. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-143-157.

Черкасов А. А., Панин А. Н., Чихичин В. В. Картографо-геоинформационное обеспечение реализации национальных проектов: социально-экономические, демографические вызовы и инструменты пространственного планирования. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф., 2020. Т. 26. Ч. 1. С. 45–51. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-1-26-45-51.

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.

REFERENCES

Anisimov O. A., Lobanov V. A., Reneva S. A. Analysis of changes in air temperature in Russia and an empirical forecast for the first quarter of the 21st century. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2007. No. 10. P. 20–30 (in Russian).

Baburin V. L., Goryachko M. D. Strategic management of regional development: economic-geographical approach. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5. Geografiya (Lomonosov Geography Journal. Series 5. Geography)*, 2009. No. 5. P. 53–58 (in Russian).

Badina S. V., Pankratov A. A. Coastal natural and economic systems of the Pechora-Kara region in the context of climate change risks. *Economy of regions*, 2024. V. 20. No. 2. P. 506–521 (in Russian). DOI: 10.17059/ekon.reg.2024-2-11.

Chereshnya O. Yu., Gribok M. V. Complex assessment of digital inequality in the Regions of Russia. *InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International Conference*, 2023. V. 29. Part 1. P. 143–157 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-143-157.

Cherkasov A. A., Panin A. N., Chikhichin V. V. Cartography-geoinformation support of national projects implementation: social-demographic challenges and spatial planning tools. *InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International Conference*, 2020. V. 26. Part 1. P. 45–51 (in Russian) DOI: 10.35595/2414-9179-2020-1-26-45-51.

Kolomak E. A. Uneven spatial development in Russia: explanations from new economic geography. *Voprosy Ekonomiki (Economic issues)*, 2013. No. 2. P. 132–150 (in Russian). DOI: 10.32609/0042-8736-2013-2-132-150.

Kuznetsova O. V. Problems of elaboration of spatial development strategy of the Russian Federation. *Spatial Economics*, 2019. V. 15. No. 4. P. 107–125 (in Russian). DOI: 10.14530/se.2019.4.107-125.

Kuznetsova O. V. Rating of scientific and technological development of regions: approaches, results, challenges. *Problems of Forecasting*, 2023. No. 4(199). P. 94–103 (in Russian). DOI: 10.47711/0868-6351-199-94-103.

Lavrinenko P. A., Mikhailova T. N., Romashina A. A., Chistyakov P. A. Agglomeration effects as a tool for regional development. *Problems of Forecasting*, 2019. No. 3 (174). P. 50–59 (in Russian).

Maksimenko D. D. Current factors for locating high-tech industries in Russia. *Regional Studies*, 2023. No. 4 (82). P. 29–40 (in Russian). DOI: 10.5922/1994-5280-2023-4-3.

Mityakov S. N., Mityakova O. I., Murashova N. A. Innovative development of Russian regions: rating methodology. *Innovations*, 2017. No. 9 (227). P. 97–104 (in Russian).

Mikheeva N. N. Comparative analysis of innovation systems in Russian regions. *Spatial Economics*, 2014. No. 4. P. 61–81 (in Russian). DOI: 10.14530/se.2014.4.061-081.

Pankratov A. A., Musaev R. A., Badina S. V. Assessment of the potential of Russian IT industry clusterization, 2005–2018. *InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International Conference*, 2021. V. 27. Part. 1. P. 44–59 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-44-59.

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. Analysis of the current state of the Russian IT Industry: key issues and trends. *InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International Conference*, 2023. V. 29. Part 1. P. 201–216 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-201-216.

Revich B. A., Shaposhnikov D. A., Semutnikova E. G. Climatic conditions and air quality as risk factors for mortality in the Moscow population. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*, 2008. No. 7. P. 29–35 (in Russian).

Untura G. A. Strategic support for Russian regions: problems of assessing the status of innovation territories. *Region: Economics and Sociology*, 2012. No. 1(73). P. 123–141 (in Russian).

Vinogradova V. V. Zoning of Russia according to the natural living conditions of the population, taking into account extreme climatic events. *Izvestia Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya* (News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series), 2021. V. 85. No. 1. P. 5–13 (in Russian). DOI: 10.31857/S2587556621010167.

Zubarevich N. V. Regions of Russia: inequality, crisis, modernization. Moscow: Independent Institute for Social Policy, 2010. 160 p. (in Russian).

Nikolai A. Grudtsyn¹, Anatoly I. Chistobaev², Evgeniy S. Kulakovskiy^{3,4}

GIS IN THE STUDY OF THE SPATIAL ORGANIZATION OF MEDICAL TOURISM INFRASTRUCTURE: METHODOLOGY AND PRACTICAL APPROACHES

ABSTRACT

The article is devoted to analysing and assessing the possibilities of using the theoretical foundations of geographic information systems (GIS), the methodology, and techniques of GIS technologies in identifying trends and justifying strategies for the development and spatial organisation of medical tourism. It is shown that medical tourism is a dynamically developing sector of the global economy, which allows harnessing the achievements of medicine and the opportunities of tourism to strengthen public health and develop elements of healthcare systems, thereby forming the basis for the formulation of state and regional policies to stimulate the development of this type of activity in the country and/or region, thus enhancing their positions on the global stage, ensuring the interaction of medical and tourist institutions with authorities and business structures in their promotion on the world market. It is established that case studies analysis using GIS technologies allows for identifying spatial patterns in the provision of medical care and the provision of related services to patients from other regions and countries, visualising the geographical distribution of medical institutions, assessing the accessibility of medical care and recreational facilities for rehabilitation and recreation, analysing the travel routes of medical tourists, and ultimately providing recommendations for optimising the formation and subsequent development of medical tourism clusters. An illustration of visualising the obtained results based on heat maps, highlighting areas with high or low concentrations of medical tourism resources and densities of infrastructure elements, is provided. Singapore has been chosen as an experimental site to test GIS technologies' effectiveness in achieving this research's goal, where medical tourism has gained significant development and has become an important source of income for government and business structures.

KEYWORDS: health preservation, tourism industry, geosystems, medical tourism clusters, Singapore

INTRODUCTION

The medical tourism industry is one of the fastest-growing sectors in the global economy, catering to the population's demand for treatment of various illnesses, surgical interventions, dental care and other medical procedures outside the patient's country of residence. Medical tourism is developing amidst increasing global, national, regional and local competition.

¹ St. Petersburg State University, Institute of Earth Science, Department of Regional Policy and Political Geography, 33-35, 10th line of Vasil'evsky island, St. Petersburg, 199178, Russia,
e-mail: poxes@yandex.ru

² St. Petersburg State University, Institute of Earth Science, Department of Regional Policy and Political Geography, 33-35, 10th line of Vasil'evsky island, St. Petersburg, 199178, Russia,
e-mail: chistobaev40@mail.ru

³ St. Petersburg State University, Institute of Earth Science, Department of regional policy and political geography, 33-35, 10th line of Vasil'evsky island, St. Petersburg, 199178, Russia,
e-mail: evgeny.kyl@yandex.ru

⁴ Voronezh State University, Department of Socio-Economic Geography and Regional Studies, 40, Kholzunova str., Voronezh, 394068, Russia, *e-mail: evgeny.kyl@yandex.ru*

Prospective patients seek high-quality medical care at affordable prices for treatment, transportation expenses, post-operative rehabilitation and all types of services. Medical tourists contribute to the country and regional economies by paying for medical services and other amenities, promoting health preservation at various levels of societal organisation and governmental and municipal management.

For a long time, medical tourism has predominantly developed in European and North American countries. Still, in recent years, it has significantly accelerated in Asian countries, particularly Singapore, China, India, Turkey, Malaysia and Japan [Barat, 2022; Chistobaev, 2024]. The main focus of its development has been the establishment of medical tourism clusters, incorporating not only medical institutions but also other elements of the healthcare system. Similar progress in promoting medical tourism has been observed in Russia, facilitated by adopting two governmental documents: the “Federal Project for the Development of Medical Services Export”¹ and the “Concept of Technological Development until 2030”². The coupled development of health preservation elements (infrastructure, staffing, accommodation tailored to service specifics, pedestrian access to hospitals and recreational facilities) ensures the successful advancement of medical tourism.

The process of developing and implementing strategies to develop medical tourism and optimise the flow of medical tourists to specific geographic regions or countries involves analysing geographic data, demographic characteristics, healthcare infrastructure and other factors that may influence the attractiveness of a particular location to medical tourists from different countries [Sultana et al., 2014]. The main goal of such geostrategic developments in medical tourism is to provide competitive advantages for a specific country or region in the medical care market: the development of specialised medical centres, attracting qualified specialists and creating comfortable conditions for the living and treatment of medical tourists. As a result of scientifically based strategies for the development of medical tourism, a country or region can receive economic benefits, strengthen its position in the global health arena, and interact with medical and tourism institutions with local authorities and business communities [Abadi et al., 2018].

A comprehensive approach to the development and territorial organisation of medical tourism involves analysing and forecasting its development using extensive data reflecting the specificities of healthcare systems at the country and/or regional levels. This task can be addressed by applying geographic information systems (GIS) theory and GIS technology methodology, allowing for the visualisation of the geographical distribution of medical institutions, assessment of service availability and analysis of medical tourists’ travel routes [DeMicco, 2022]. Such analysis is necessary for spatially analysing the development of medical tourism, its impact on healthcare infrastructure, the country’s economy, regions, municipalities and businesses. This approach expands the spectrum of research into factors influencing the overall development of medical tourism and the selection by medical tourists of the most suitable destinations for this type of tourism.

The study aims to analyse the possibilities of using GIS technologies in studying the basic situation of the spatial organisation of medical tourism.

¹ Passport of the federal project “Development of export of medical services”. Web resource: https://static-0.minzdrav.gov.ru/system/attachments/attaches/000/044/789/original/Pasport_FP_export.pdf?1558614408 (accessed 10.05.2024)

² The concept of technological development for the period until 2030. Approved by Order of the Government of the Russian Federation of May 20, 2023 No. 1315-r. Web resource: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LA_W_447895/f62ee45faefd8e2a11_d6d88941ac66824f848bc2/ (accessed 10.05.2024)

Brief Literature Review

Geoinformation technologies are actively penetrating various spheres of society, including scientific research in medical tourism [Dar et al., 2022; Wang et al., 2022; Biswas, Rai, 2023], including data collection and processing on provided services and database formation [Beladi et al., 2019], identifying peculiarities of organising medical care within the healthcare system [Gokhman, 2012; Kim et al., 2017; Wang et al., 2023], analysing the experience of developing strategies for forming medical tourism clusters in Russia [Grudtsyn, Chistobaev, 2023; Chistobaev, 2023a, 2023b] and other countries worldwide [Page et al., 2015; Firza et al., 2023], using modern analysis tools such as PCA [Luna, 2022], SWOT analysis, and other strategic planning tools [Wong et al., 2014; Ganguli et al., 2019]. Works dedicated to promoting medical tourism in Singapore identify specific conditions and development factors of this industry [Pocock et al., 2011; Ebrahim et al., 2019], assessing its contribution to economic development and the entire healthcare system [Gan et al., 2014; Lianto et al., 2020].

RESEARCH MATERIALS AND METHODS

Using a systems approach is necessary to consider the geostrategizing process as a set of interconnected stages, each contributing to a country, region or municipality's overall social and economic development goal. The example of Singapore is used as a case study for a detailed analysis of this country's territorial organisation of medical tourism infrastructure. The advantage of this approach lies in the ability to consider real data for a specific country. A noted disadvantage is that the results obtained may be limited in their applicability to other territories.

Quantitative analysis was conducted based on data published by Singaporean authorities. Medical institutions are represented by the Ministry of Health's data¹. Hotels were selected based on data from the Hotels Licensing Board², while parks, sports facilities, and eateries promoting "healthy eating" were selected based on Health Promotion Board 3 data.

The following technical tools and their components were used in the work:

1. Tableau Desktop is used to display medical institutions participating in the CHAS scheme.
2. Google Maps for displaying travel time.
3. The matplotlib.pyplot library³ for Python for visualising a series of maps with choropleth data representation, where various districts or zones (in this case, Singapore districts) are displayed with different degrees of shading or colour depending on the number of objects of a particular type (e. g., clinics, sports grounds, etc.) in each of these districts. This allowed to identify areas with high or low concentrations of medical tourism resources, determine infrastructure densities and develop management approaches.
4. The seaborn library for Python⁴ for visualising a heatmap of lines (KDE) is a data visualisation method used to estimate the density distribution of points on a map. This study uses the coordinates of the medical tourism industry objects. The seaborn library provides the kdeplot function, which visualises kernel density estimation based on point coordinates. A two-dimensional kernel estimation is used since the data is presented as geographic coordinates (latitude and longitude).
5. The KMeans method and the sklearn library for Python for clustering medical tourism infrastructure objects (4–7 clusters) within administrative-territorial units.

¹ Data.gov.sg. Web resource: https://beta.data.gov.sg/collections/2036/datasets/d_65d11d02ab0246cec53bfc995c782

628/view (accessed 11.03.2024)

² Data.gov.sg. Web resource: https://beta.data.gov.sg/datasets?query=hotels&resultId=d_654e22f14e5bb817423f0e0c9ac4f632 (accessed 11.03.2024)

³ Matplotlib: Visualization with Python. Web resource: <https://matplotlib.org/> (accessed 12.02.2024)

⁴ Seaborn: statistical data visualization. Web resource: <https://seaborn.pydata.org/> (accessed 20.02.2024)

6. The Adjusted Rand Index determines the correspondence of Singapore’s administrative-territorial division to the clusters of medical tourism infrastructure obtained.

RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

Geostrategizing is a process of sequential stages (Table 1) aimed at structuring and systematising strategy development and implementation, which is important in strategic spatial planning and management of territorial development.

Table 1. Stages of geostrategising medical tourism

Stage	Description
Defining goals and methodology	Involves selecting the goals, tasks and methods for conducting geostrategy in a specific region or country. Ensures an understanding of the target functions of strategic planning in medical tourism. Determines approaches and tools
Baseline situation investigation and trend analysis	Integrated research in medical tourism allows for identifying trends in patient preferences and the competitive environment, demand for medical services in countries and/or regions, competitor offerings, and market segmentation based on needs and preferences
Strategy development	Defining target functions and tasks for management, financial, marketing and technological structures. Geospatial modelling of potential effects from the implementation of strategies. Cost, risk assessments and profit forecasting
Regulatory setting	Development of regulatory documents for strategic planning and strategy implementation
Strategy implementation	Creation or modernization of medical tourism clusters, introduction of new technologies
Quality and safety control	Achieving the standard of quality and safety in medical care, certification of institutions, staff training
Monitoring and results analysis	Tracking the effectiveness of servicing medical tourists, customer satisfaction, profitability, and other indicators
Strategy adjustment and update	Refinement of target functions and decision-making methods in accordance with changing conditions and customer expectations

At the second level, sub-stages of geostrategizing medical tourism are investigated. For example, management strategy, operational management strategies, personnel management, service quality improvement, enhancement of customer experience, staff attraction and training and creation of motivational systems to retain qualified specialists are developed. Marketing strategy is subdivided into pricing strategies — establishing competitive prices for medical services and tourist packages to attract clients; promotion — developing marketing campaigns and advertising initiatives to increase the region’s recognition as a medical tourism destination; and market segmentation — identifying target audiences and adapting services to their needs and preferences. Financial management strategies involve investment attraction, financial stability, financial flow diversification, financial risk management, tax planning and liquidity management. Possible risks and challenges, threats and obstacles are identified in each direction, and corresponding measures for minimisation and/or prevention are developed. The key task is to assess the probability of risks occurring and mitigate them.

GIS can accompany almost each of the above stages of geostrategizing. While these technologies have significant advantages, it is also important to consider the possible risks of their use using risk and strategic analysis methods.

Spatial analysis of basic medical tourism conditions (based on Singapore data)

Singapore was chosen as the key country for this study, as it has demonstrated significant achievements in medical tourism for many years and consistently ranks among the best countries in global rankings. The healthcare system here has undergone comprehensive development, and the population demonstrates a keen awareness of their health, enhancing public health.

The first stage of the analysis involves visualising medical organisations participating in the CHAS¹ Clinics program (Fig. 1). This set of institutions covers the majority of healthcare providers in Singapore. Mapping them onto satellite imagery provides an overview of their locations and distribution and enhances understanding of Singapore's physical and geographical characteristics, which should be considered when examining subsequent cartographic materials.

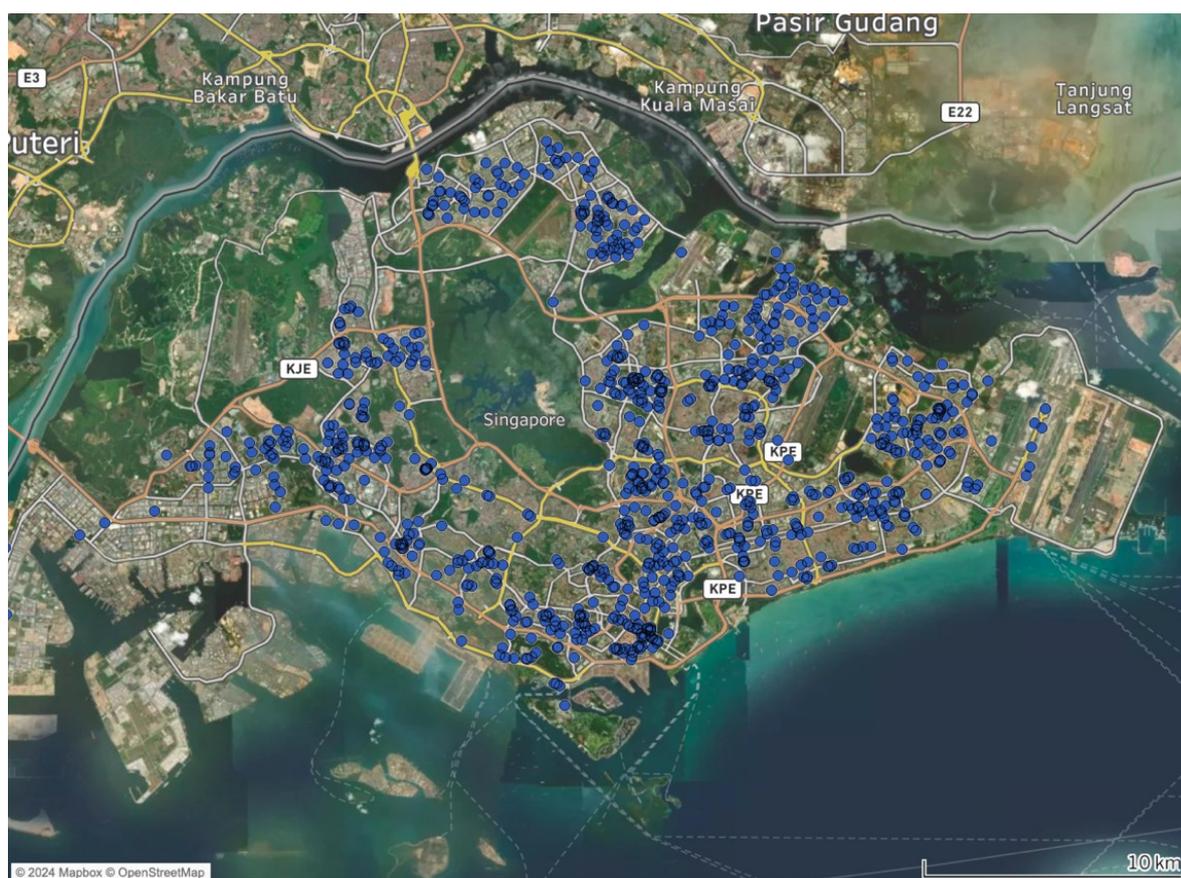


Fig. 1. Medical institutions participating in the CHAS scheme in Singapore

As mentioned earlier, analysing the medical tourism situation in a country or region requires considering the medical infrastructure and other factors that affect the comfort and convenience of medical tourists. One such factor is the transportation infrastructure, which determines the accessibility of medical services for patients from other regions and countries, the convenience of using airports, railway stations, bus and metro systems and the speed and comfort of intra-city or intra-region travel. In this regard, Singapore boasts a highly developed transportation system. Changi Airport is a major regional and international hub, consistently

¹ CHAS stands for Community Health Assist Scheme, a public health initiative in Singapore. It provides all Singaporean citizens, including holders of Pioneer Generation (PG) and Merdeka Generation (MG) cards, with subsidies for medical and/or dental services at participating General Practitioner (GP) clinics and dental clinics. As of 2023, 1191 organizations were participating in this program, with one organization for every 3 thousand residents

recognised as one of the best in the world. In 2023 it served approximately 58.9 million passengers, representing 86.3 % of pre-pandemic 2019 levels¹. The country also has a highly efficient public transport system [Prathyusha et al., 2021], which may be excluded when medical tourism infrastructure is considered. Fig. 2 shows an example of one of the longest routes in the country (less than 2 hours for bus/MRT and about 40 minutes for a taxi).



Fig. 2. Estimated travel time in Singapore (bus and metro — top, taxi/car — bottom)

¹ Traffic Statistics. Changi Airport group. Web resource: <https://www.changiairport.com/corporate/our-expertise/air-hub/traffic-statistics.html> (accessed 25.03.2024)

In addition to the transportation accessibility of medical institutions, the presence of accommodation, dining options, public parks and sports facilities within the medical tourism cluster is significant (Fig. 3). The quality and variety of services can significantly impact patient satisfaction and their decision to choose a specific medical tourism destination.

Fig. 3 displays over 3 800 objects, which complicates visualization but still provides an understanding of the density of the infrastructure. Below are visualisations for each group of objects separately (Fig. 4), followed by an assessment of the overall concentration of all selected objects for analysis across the administrative districts of Singapore (Fig. 5).

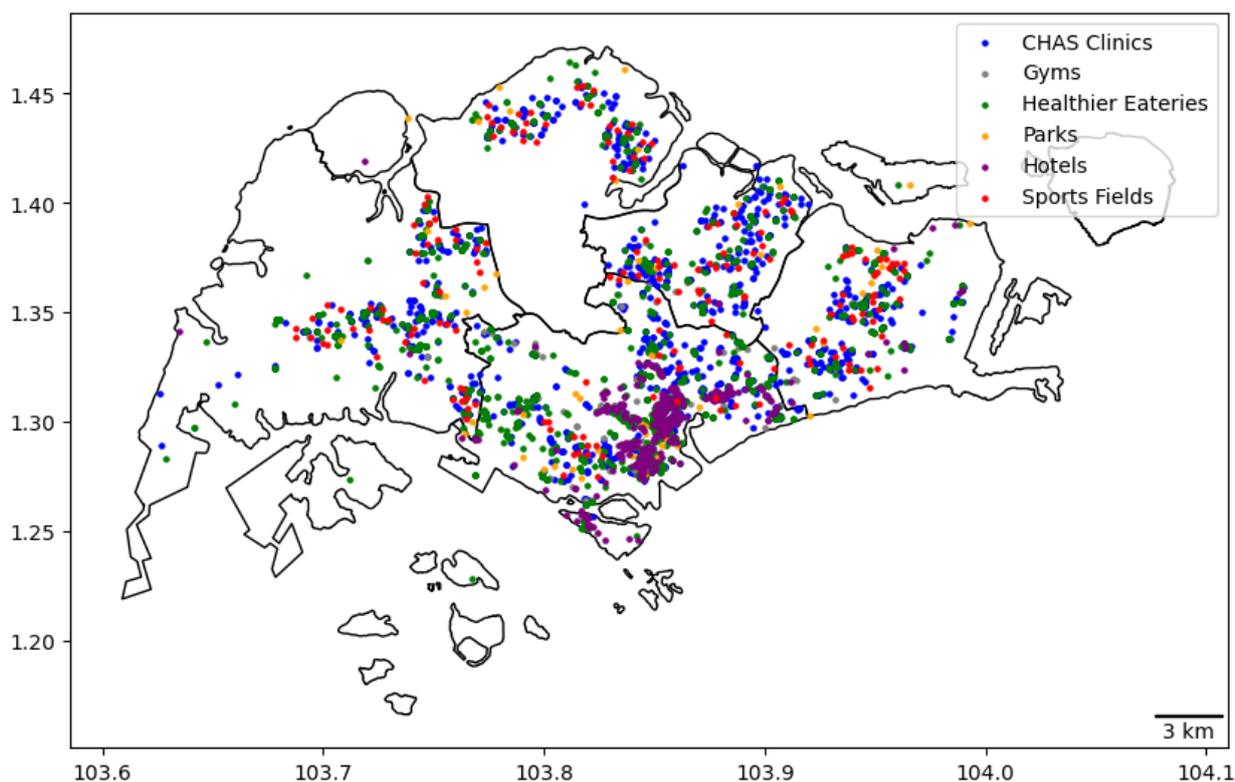


Fig. 3. Objects of accompanying and the healthcare infrastructure

The presented maps effectively illustrate the spatial characteristics of developing the basic components of Singapore's healthcare and tourism systems, which are essential for forming and developing medical tourism. The central district stands out prominently in terms of the concentration of medical tourism infrastructure (Fig. 6).

As an additional analysis tool, clustering of medical tourism infrastructure was carried out (Fig. 7). The results show a clear correlation between medical tourism infrastructure and internal administrative boundaries: the existing administrative division of Singapore into five districts best reflects the distribution of medical tourism infrastructure (adjusted Rand index (ARI) for 5 clusters — 0.75).

The cluster boundaries shown in Fig. 8 can be used from the point of view of zoning and managing the development of medical tourism, an important element of geostrategizing medical tourism. The clustering results allow us to conclude that developing a policy for developing medical tourism infrastructure in Singapore can be carried out within the framework of existing districts and does not require separate zoning.

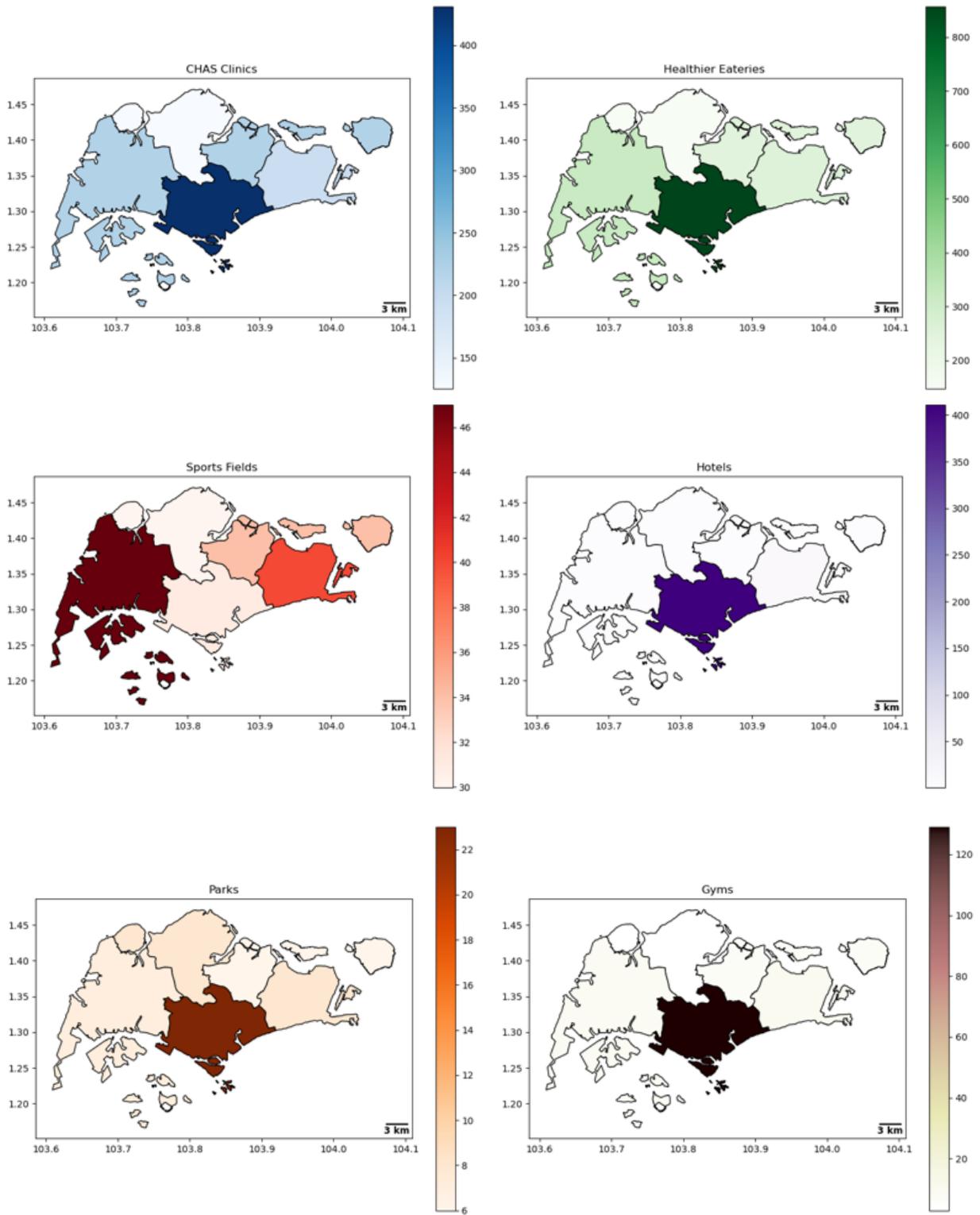


Fig. 4. Number of medical and accompanying infrastructure facilities in Singapore across the administrative division

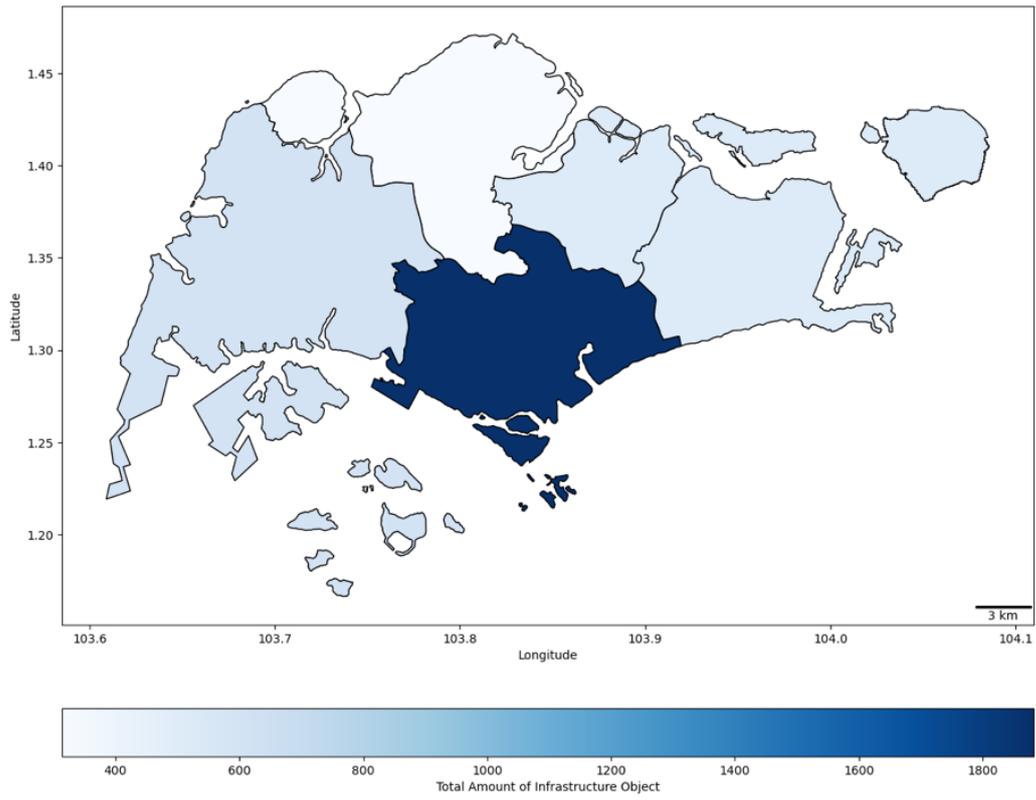


Fig. 5. Number of medical and accompanying infrastructure facilities in Singapore across the administrative division

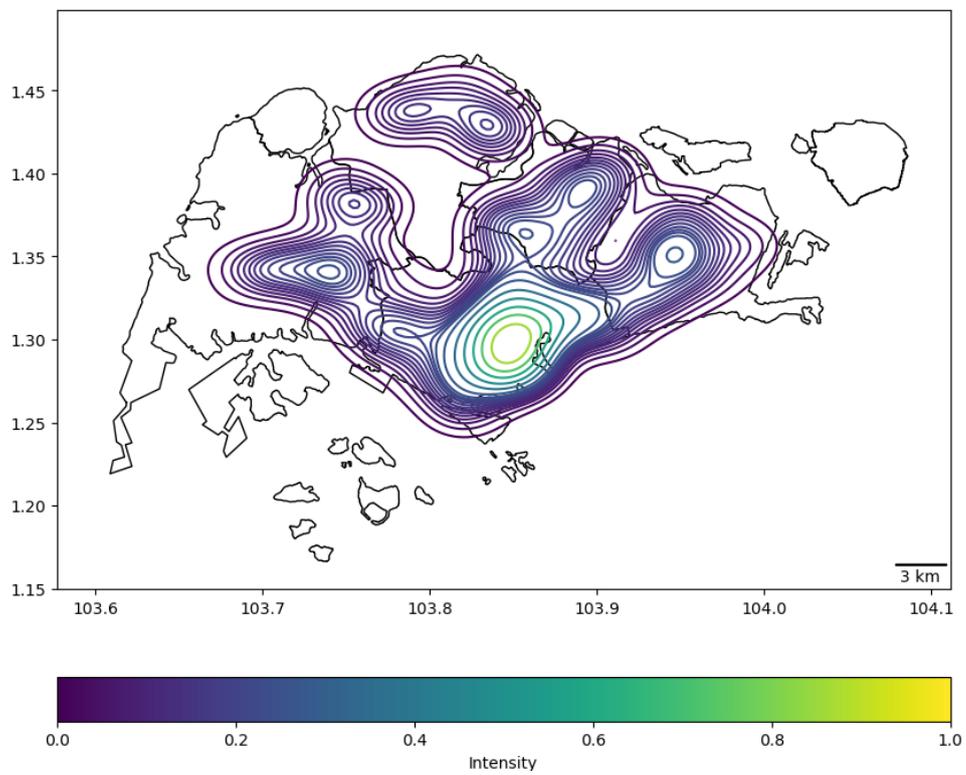


Fig. 6. Heat map of lines of intensity of medical and tourism infrastructure facilities

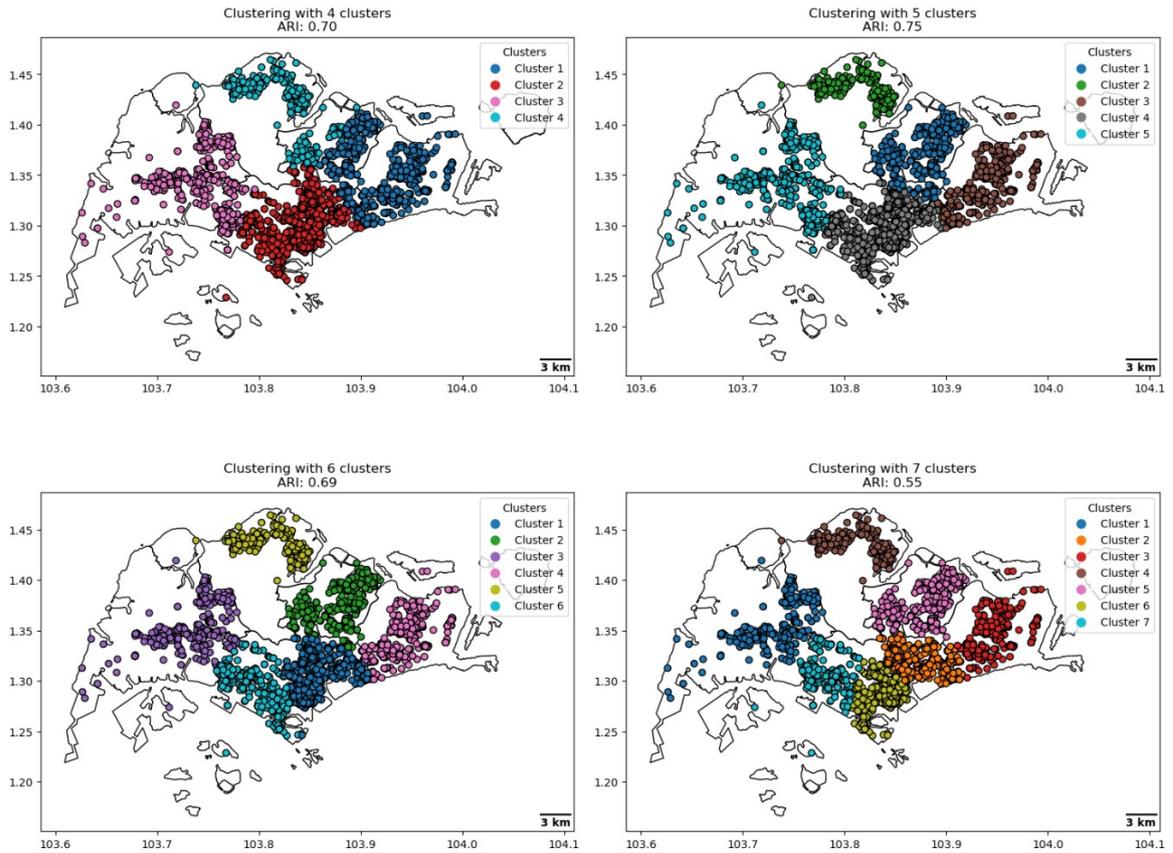


Fig. 7. Clusters of medical and accompanying infrastructure in Singapore

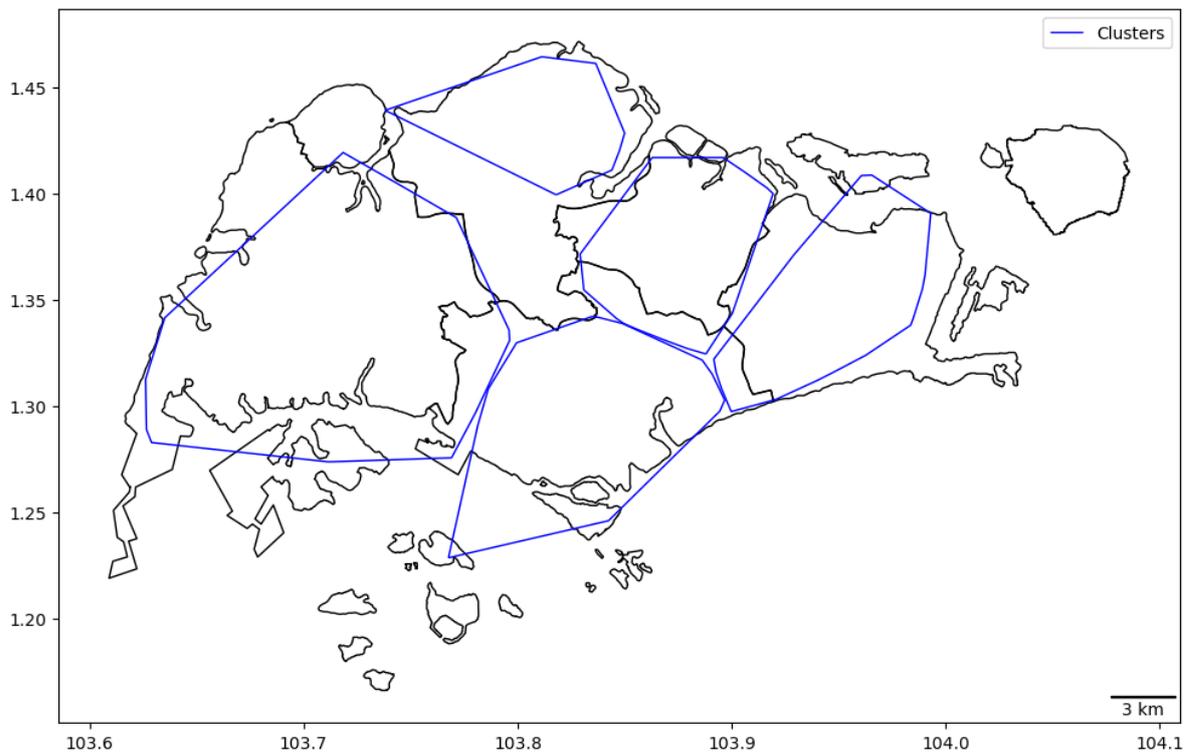


Fig. 8. Boundaries of medical tourism clusters in Singapore across the administrative division

Not all healthcare institutions participating in the CHAS scheme have programs for working with medical tourists. However, they can be used both at the preparation stage for clinical intervention and after it and are also in demand among regional medical tourists from Malaysia or Indonesia [Leng, 2010]. At the same time, tourists may prefer large medical hospitals that are more ready to interact with patients from abroad (Fig. 9).

Several recent projects have been launched in Singapore to promote medical tourism. Some hospitals (Mount Elizabeth Hospitals, Raffles Hospital, etc.) have launched special programs for foreign patients that offer transportation, accommodation and translation services. Opened as part of an international project, SingHealth Duke-NUS Academic Medical Centre offers a wide range of medical services, and it has become one of the largest medical centres in Asia. One of the most important projects in the healthcare sector was the Raffles Hospital, which opened in 2019 in the city centre, which offers a wide range of medical services, including consultations with doctors, diagnostics, operations and rehabilitation, as well as special packages for medical tourism, including services for organising accommodation, transport and translator. Raffles Hospital maintains Singapore's regional and international healthcare hub leadership, offering complex clinical procedures such as neurovascular procedures, targeted cancer treatments, cardiac surgeries, orthopaedic surgeries and infertility treatments. More than 35 % of Raffles are foreigners from more than 100 countries.

As part of the study, groups of large medical institutions were identified, with pairs' distances not exceeding 500 m (Fig. 10).

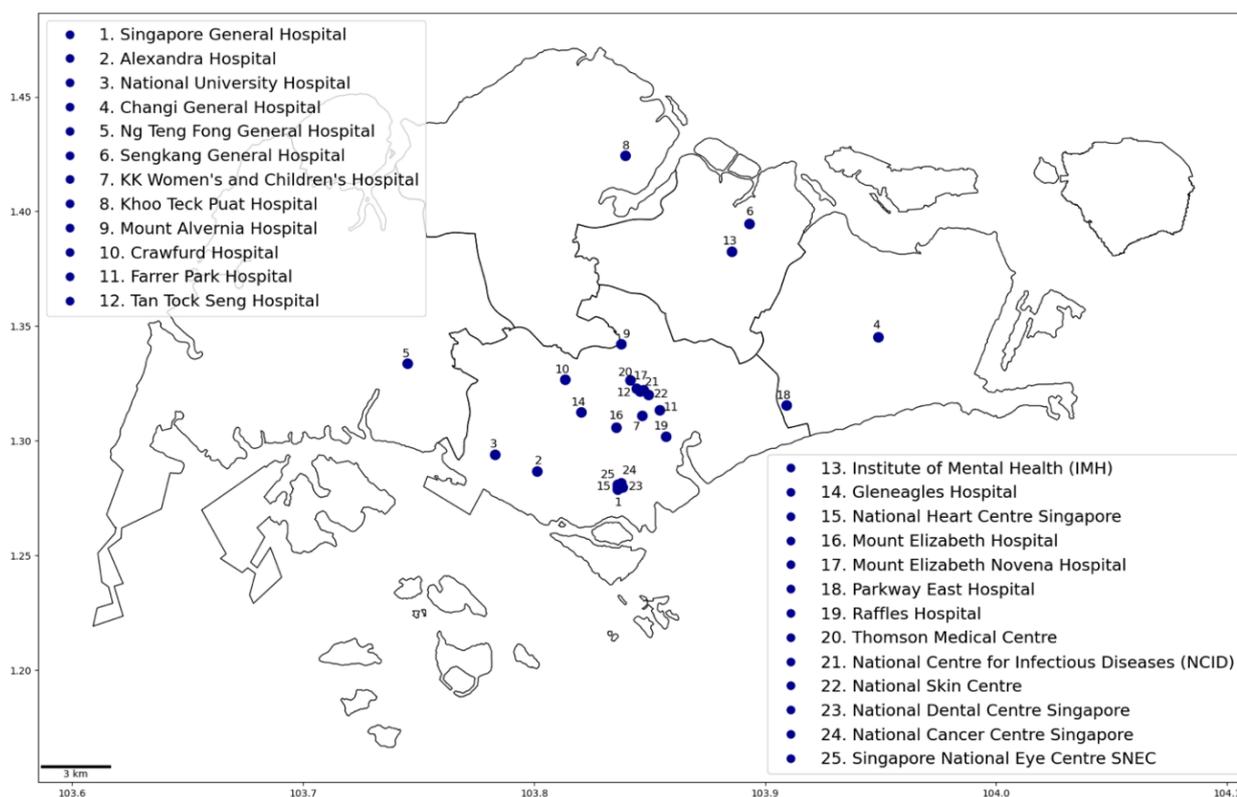


Fig. 9. The largest medical institutions in Singapore across the administrative division

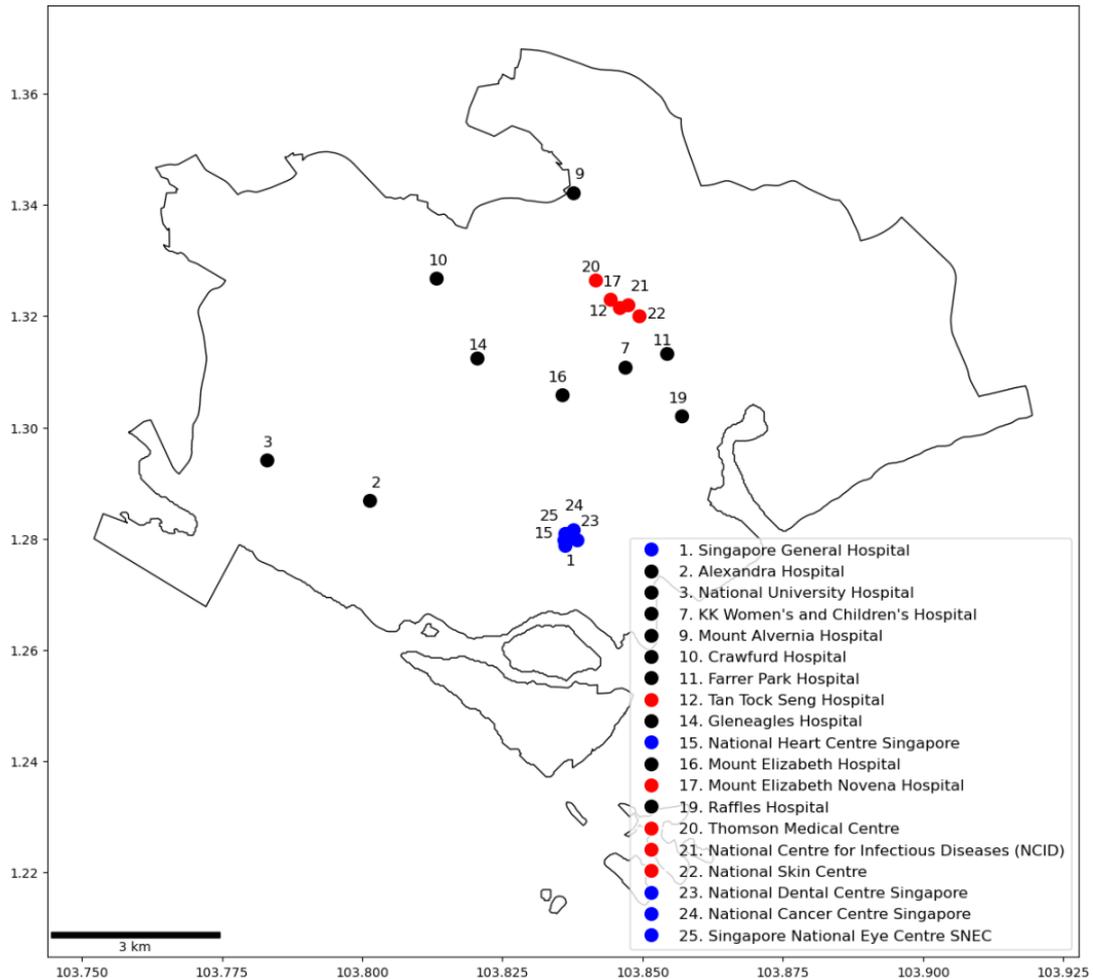


Fig. 10. Groups of medical institutions in Singapore located within a distance of no more than 500 m from each other

There are only two such groups in Singapore, both in the central district. These groups are further presented with touristic infrastructure, forming the basis for identifying and developing local medical tourism clusters. The first group gravitates towards Singapore General Hospital (Fig. 11), while the second group gravitates towards Mount Elizabeth Novena Hospital (Fig. 12).

The presence of developed healthcare and health preservation systems, excellent transportation accessibility from abroad and within the country and extensive hotel and restaurant services create favourable conditions for tourists visiting Singapore. Based on the above, Singapore has all the necessary conditions for the successful development of medical tourism despite being one of the most expensive cities in the world.

Analysing the spatial distribution of health preservation infrastructure objects in Singapore demonstrates their concentration in the central district. This indicates key areas of demand and identifies potential for further development in this field.

Based on the above facts, Singapore has certain advantages for developing medical tourism. The spatial concentration of infrastructure provides a basis for strategic planning and strengthens its position in the global medical tourism market.

This study mainly focused on the infrastructure aspects of geostrategizing medical tourism. We did not consider factors such as treatment and accommodation costs, destination climate conditions, the destination's image and brand, promotional effort, etc. Comprehensive geostrategizing goes beyond the scope of individual research.

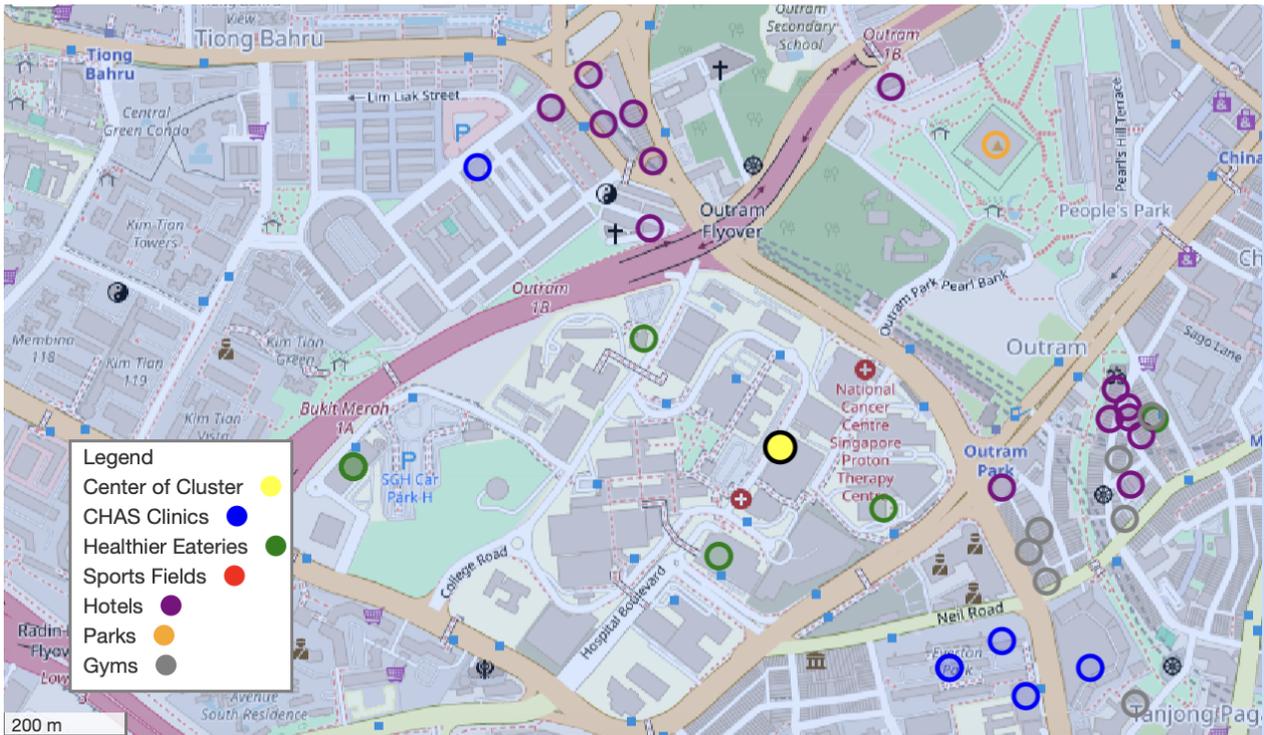


Fig. 11. Medical-tourist infrastructure gravitating towards Singapore General Hospital

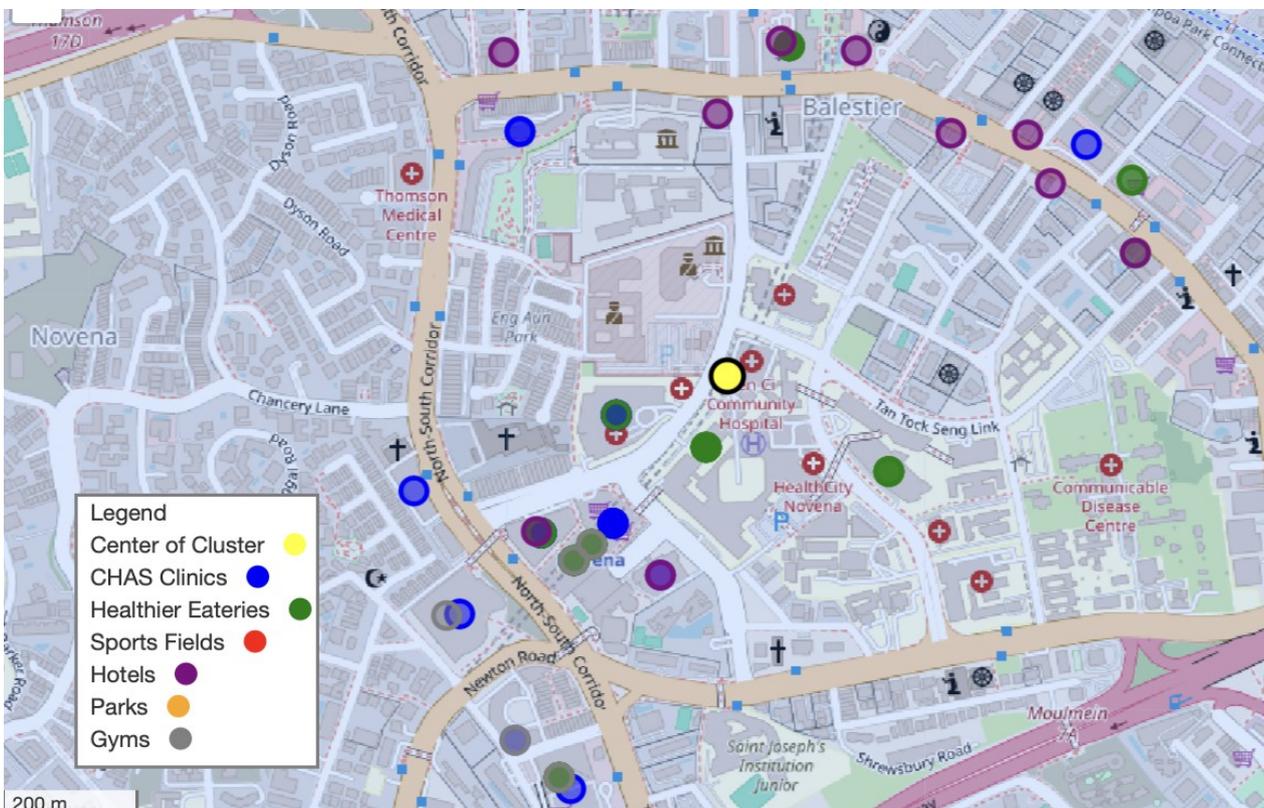


Fig. 12. Medical-tourist infrastructure gravitating towards Mount Elizabeth Novena Hospital

CONCLUSIONS

Research in medical tourism represents an important direction in promoting healthcare and developing the service sector economy. One of the management tools for this type of activity is geostrategising, which allows for the analysis of the provision of medical care and wellness services and the territorial organisation of medical tourism, one form of which is medical tourism clusters.

GIS technologies in developing strategies for medical tourism allow for the visualisation of processed arrays of geographic data, identification of patterns and trends and integration of economic, medical and geographic information impacting medical tourism's development and territorial organisation.

The two main groups of medical organisations in Singapore identified in this study, with the potential to serve as the basis for forming medical tourism clusters, are attractive destinations for medical tourists as they possess the necessary infrastructure and expertise to provide quality medical and wellness services. The creation of medical tourism clusters can contribute to developing other elements of the healthcare system in the region and country, attracting more clients.

The central district of Singapore is the main centre for the concentration of medical institutions and tourist attractions. The geographical distribution of medical infrastructure, largely following administrative divisions, allows for more effective planning and development of medical tourism at the governmental and business community levels interested in developing this direction.

Further research in the field of involving GIS in the development and territorial organisation of medical tourism involves focusing the attention of specialists on studying the influence of socio-geographical factors on the choice of medical tourists where to receive medical care, depending on factors such as the cost and quality of medical and health services, the availability of related infrastructure, sociocultural aspects. It is equally important to draw the attention of researchers to such unresolved issues as assessing the potential for the development of medical tourism in regions and countries of various types, determining the most effective strategies for attracting medical tourists to medical tourism clusters that provide high-quality medical care and health services at affordable prices. Additional research may include analysis of the competitive environment and identification of key success factors in the development of medical tourism.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by Russian Science Foundation grant No. 23-28-00279, "Development trajectories of the medical tourism market in the context of reformatting the world order".

REFERENCES

- Abadi F., Sahebi I., Arab A., Alavi A., Karachi H.* Application of best-worst method in evaluation of medical tourism development strategy. *Decision Science Letters*, 2018. No. 7(1). P. 77–86. DOI: 10.5267/j.dsl.2017.4.002.
- Barat S.* Looking at the future of medical tourism in Asia. *International Journal of Tourism and Hospitality Management in the Digital Age*, 2021. No. 5(1). P. 19–33. DOI: 10.4018/IJTHMDA.2021010102.
- Beladi H., Chao C.-C., Ee M. S., Hollas D.* Does Medical Tourism Promote Economic Growth? A Cross-Country Analysis. *Journal of Travel Research*, 2019. No. 58(1). P. 121–135. DOI: 10.1177/0047287517735909.
- Biswas T., Rai A.* Analysis of spatial patterns and driving factors of domestic medical tourism demand in North East India. *GeoJournal*, 2023. No. 88. P. 3163–3181. DOI: 10.1007/s10708-022-10798-y.

Chistobaev A. I. Geographical field of the medical tourism cluster of the region: forgotten theory, best practices. *Pacific Geography*, 2023a. No. 3(15). P. 47–55 (in Russian). DOI: 10.35735/26870509_2023_15_4.

Chistobaev A. I. Medical and tourism cluster of the region from the perspective of the geospatial approach. *Geosystems of North-East Asia: natural, natural resource and socio-economic structures: Collection of scientific articles*. Vladivostok: Federal State Budgetary Institution of Science Pacific Institute of Geography of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 2023b. P. 64–67 (in Russian). DOI: 10.35735/9785604844175_64.

Chistobaev A. I. Medical and health tourism: a textbook for universities. Moscow: Yurayt Publishing House, 2024. 237 p. (in Russian).

Dar S. N., Shah S. A., Wani M. A. Geospatial tourist information system for promoting tourism in trans-Himalayas: A study of leh ladakh India. *GeoJournal*, 2022. No. 87. P. 3249–3263. DOI: 10.1007/s10708-021-10431-4.

DeMicco F. J., Linn S., Yoshimi A. A Geo Mapping Project for Medical Travel and Wellness: Opportunity to Enhance Tourism Revenue in Colorado. In *Medical Travel Brand Management*. Apple Academic Press, 2022. P. 149–158.

Ebrahim A. H., Ganguli S. A comparative analysis of medical tourism competitiveness of India, Thailand and Singapore. *Tourism: An International Interdisciplinary Journal*, 2019. No. 67(2). P. 102–115.

Firza N., Antonucci L., Crocetta C., D'Ovidio F. D., Monaco A. Spatial Analysis to Investigate the Relationship Between Tourism and Wellbeing in Italy. *Social Indicators Research*, 2023. DOI: 10.1007/s11205-023-03234-2.

Gan L. L., Frederick J. R. Medical tourism in Singapore: A structure-conduct-performance analysis. *Journal of Asia-Pacific Business*, 2011. No. 12(2). P. 141–170.

Ganguli S., Ebrahim A. H. A qualitative analysis of Singapore's medical tourism competitiveness. *Tourism Management Perspectives*, 2017. V. 21. P. 74–84. DOI: 10.1016/j.tmp.2016.12.002.

Gokhman V. V. Geoinformation systems for healthcare and medicine. *Century of Quality*, 2012. No. 3. P. 74–75 (in Russian).

Grudtsyn N. A., Chistobaev A. I. Formation of medical tourism clusters in the territorial structure of the healthcare sector: issues of methodology and techniques. *Geographical Bulletin*, 2023. No. 4(67). P. 172–182 (in Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2023-4-172-182.

Kim M., Koo D.-W., Shin D.-J., Lee S.-M. From Servicescape to Loyalty in the Medical Tourism Industry: A Medical Clinic's Service Perspective. *INQUIRY: The Journal of Health Care Organization, Provision, and Financing*, 2017. No. 54. DOI: 10.1177/0046958017746546.

Leng C. H. Medical tourism and the state in Malaysia and Singapore. *Global Social Policy*, 2010. No. 10(3). P. 336–357.

Lianto M., Suprpto W., Mel M. The Analysis Factor of Medical Tourism in Singapore. *SHS Web Conferences*, 2020. V. 76. P. 01028. DOI: 10.1051/shsconf/20207601028.

Luna L. I. Application of PCA with georeferenced data in the tourism industry: A case study in the province of Córdoba, Argentina. *Tourism Economics*, 2022. No. 28(2). P. 559–579. DOI: 10.1177/1354816620987681.

Page S. J., Innes A., Cutler C. Developing Dementia-Friendly Tourism Destinations: An Exploratory Analysis. *Journal of Travel Research*, 2015. No. 54(4). P. 467–481. DOI: 10.1177/0047287514522881.

Pocock N. S., Phua K. H. Medical tourism and policy implications for health systems: a conceptual framework from a comparative study of Thailand, Singapore and Malaysia. *Globalization and Health*, 2011. No. 7(1). P. 1–12.

Prathyusha C., Singh S., Shivananda P. Strategies for sustainable, efficient, and economic integration of public transportation systems. In *Urban Science and Engineering: Proceedings of ICUSE*, 2020. Singapore: Springer, 2021. P. 157–169. DOI: 10.1007/978-981-33-4114-2_13.

Sultana S., Haque A., Momen A., Yasmin F. Factors affecting the attractiveness of medical tourism destination: an empirical study on India-review article. *Iranian Journal of Public Health*, 2014. No. 43(7). P. 867.

Wang H., Feng Y., Xu S., Xu X., Jiang K., Nie X., Zhou N. Analysis of spatial-temporal pattern, dynamic evolution and influencing factors of health tourism development in China. *Scientific Reports*, 2023. No. 13. P. 15436. DOI: 10.1038/s41598-023-42462-x.

Wang X., Wang M., Lu X., Gu L., Zhao R., Ji R. Spatio-temporal Evolution and Driving Factors of the High-quality Development of Provincial Tourism in China. *Chinese Geographical Science*, 2022. V. 32. P. 896–914. DOI: 10.1007/s11769-022-1307-z.

Wong K. M., Velasamy P., Arshad T. N. T. Medical tourism destination SWOT analysis: A case study of Malaysia, Thailand, Singapore and India. *SHS Web Conferences*, 2014. V. 12. P. 01037. DOI: 10.1051/shsconf/20141201037.

О. В. Марчукова¹, Д. А. Дирин², М. А. Борисенко³, М. В. Гудковских⁴

ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ГОРНОМ АЛТАЕ В ПОСТСОВЕТСКИЙ ПЕРИОД

АННОТАЦИЯ

Республика Алтай является репрезентативным регионом для изучения климатических изменений в горах Северной Евразии. Алтай обладает полным набором высотных поясов и значительным ландшафтным разнообразием, на его территории находится крупный центр современного оледенения, он является важным водо- и климаторазделом, отделяющим бассейн Северного Ледовитого океана от бассейна внутреннего стока. К тому же на Алтае имеется довольно длительный ряд климатических наблюдений. Все это создает предпосылки к использованию территории Горного Алтай как модельного региона для выявления пространственных закономерностей изменения климата в горных странах. В настоящей работе исследованы тренды изменения температуры воздуха и количества выпавших осадков в Республике Алтай за три постсоветских климатических десятилетия: с 1992 по 2001, с 2002 по 2011 и с 2012 по 2021 гг. по данным метеостанций и двум атмосферным реанализам: NCEP/NCAR и ERA5. Для анализа использованы технологии ГИС в Matlab с применением Mapping Toolbox. Величина линейного тренда изменения среднемесячной температуры воздуха для трех периодов в Республике Алтай демонстрирует, что с 1991 по 2001 и с 2012 по 2021 гг. фиксируется потепление, средняя скорость которого в постсоветское десятилетие составляет 1,7 °C/10 лет, а в последнее десятилетие — 1,2 °C/10 лет. Однако с 2002 по 2011 гг. почти на всех метеостанциях Республики Алтай наблюдаются отрицательные значения коэффициентов линейных трендов, а средняя скорость похолодания в это десятилетие составила -0,9 °C/10 лет. Климатический анализ изменения количества выпавших осадков в Республике Алтай в среднем за последние два десятилетия показывает уменьшение тенденций. Средняя скорость сокращения осадков с 2002 по 2011 гг. составляет -2,2 мм/10 лет, а с 2012 по 2021 гг. — -11,0 мм/10 лет. Важно отметить, что сокращение жидких и твердых осадков характерно именно для западной части Республики Алтай.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: климат Горного Алтая, глобальное потепление, реанализы атмосферы, ГИС в климатологии

¹ Тюменский государственный университет, ул. Володарского, д. 6, Тюмень, Россия, 625003, *e-mail: o.v.marchukova@utmn.ru*

² Тюменский государственный университет, ул. Володарского, д. 6, Тюмень, Россия, 625003, *e-mail: d.a.dirin@utmn.ru*

³ Тюменский государственный университет, ул. Володарского, д. 6, Тюмень, Россия, 625003, *e-mail: m.a.borisenko@utmn.ru*

⁴ Тюменский государственный университет, ул. Володарского, д. 6, Тюмень, Россия, 625003, *e-mail: m.v.gudkovskikh@utmn.ru*

Olesia V. Marchukova¹, Denis A. Dirin², Maxim A. Borisenko³, Maria V. Gudkovskikh⁴

TRENDS OF CLIMATE CHANGE IN MOUNTAIN ALTAI DURING POST-SOVIET PERIOD

ABSTRACT

The Altai Republic is a representative region for studying climate change in the mountain areas of Northern Eurasia. Altai has a full set of high-altitude belts and significant landscape diversity, a large center of modern glaciation is located on its territory, it is an important water and climate divide separating the Arctic Ocean basin from the basin of internal runoff. In addition, there is a fairly long series of climatic observations in Altai. All this creates prerequisites for using the territory of the Altai Mountains as a model region to identify spatial patterns of climate change in mountainous countries. Monitoring and studying climate change in the Altai Mountains is an important and urgent task for Russia and the World, because in this region are located the largest glaciation areas. In the paper trends of air temperatures and precipitations in the Altai Republic are examined during three post-Soviet climatic decades: from 1992 to 2001, from 2002 to 2011 and from 2012 to 2021 used weather station data sets and two atmospheric reanalyses (NCEP/NCAR & ERA5). For the analysis, GIS technologies were used in Matlab using Mapping Toolbox. The magnitude of the linear trend in changes in average monthly air temperature for three periods in the Altai Republic demonstrates that from 1991 to 2001 and from 2012 to 2021 warming is recorded, the average rate of which in the post-Soviet decade is 1.7 °C/10 years, and in the last decade — 1.2 °C/10 years. However, from 2002 to 2011, almost all weather stations in the Altai Republic observed negative values of linear trend coefficients, and the average cooling rate in this decade was –0.9 °C/10 years. Climatic analysis of changes in the amount of precipitation in the Altai Republic on average over the past two decades shows a decreasing trend. The average rate of precipitation declines from 2002 to 2011 is –2.2 mm/10 years, and from 2012 to 2021 — –11.0 mm/10 years. It is important to note that the reduction in liquid and solid precipitation is typical specifically for the western part of the Altai Republic.

KEYWORDS: Altai climate, global warming, atmospheric reanalyses, GIS in climatology

ВВЕДЕНИЕ

Горный Алтай — один из центров криосферы и оледенения. Из-за глобального потепления количество ледников ежегодно сокращается [IPCC, 2021; IPCC, 2022; IPCC, 2023], что приводит к изменениям всей ландшафтной структуры, меняет водный режим и объем речного стока, отражаясь на жизнедеятельности населения не только самого горного региона, но и довольно удаленных от него территорий. По этой причине мониторинг и изучение изменения климата в этом регионе остается важной и актуальной стратегической задачей.

Климат Республики Алтай Российской Федерации обусловлен в первую очередь географическим положением самого региона и его сложным рельефом. Республика полностью находится в пределах горной системы Алтай, где высота горных хребтов достигает 4 км. Располагаясь на значительном удалении от океанов, Горный Алтай имеет

¹ Tyumen State University, 6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia,
e-mail: o.v.marchukova@utmn.ru

² Tyumen State University, 6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia, *e-mail:* d.a.dirin@utmn.ru

³ Tyumen State University, 6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia, *e-mail:* m.a.borisenko@utmn.ru

⁴ Tyumen State University, 6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia,
e-mail: m.v.gudkovskikh@utmn.ru

умеренно-континентальный климат с холодной зимой и теплым летом. В статье десятилетней давности 2012 г. [Ротанова и др., 2012] авторы утверждали, что годовая температура воздуха в Алтае за последние 170 лет выросла до 2,8 °С. Однако сохранилась ли эта тенденция в последнее десятилетие? Также важно понимать, за счет каких сезонов растет среднегодовая температура (т. к. от этого зависит протекание многих природных процессов), и как этот общий тренд дифференцирован в пространстве (в данном случае, в разных частях Республики Алтай и на разных высотных ярусах). Целью настоящей работы является изучение тенденций изменения температуры воздуха и количества выпавших осадков в Республике Алтай за три климатических десятилетия, приходящихся на постсоветский период: с 1992 по 2001, с 2002 по 2011 и с 2012 по 2021 гг.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе привлекались разные данные основных гидрометеорологических параметров:

- среднемесячные значения температуры воздуха и осадков из реанализа NCEP/NCAR Национального центра прогнозирования окружающей среды США (NOAA) с разрешением 2,5° x 2,5° с 1950 по 2022 гг. [Kalnay et al., 1996];
- среднемесячные значения температуры воздуха из реанализа проекта Европейского союза «Copernicus» для наблюдения Земли ERA5 за период с 1940 по 2022 гг. с более высоким разрешением сетки в 0,25° [Hersbach et al., 2020];
- среднемесячные значения температуры воздуха и количества осадков с 1992 по 2022 гг. с 11 метеостанций Республики Алтай: Горно-Алтайск (51,97° с. ш., 85,83° в. д.), Кара-Тюрек (50,03° с. ш., 86,45° в. д.), Катанда (50,17° с. ш., 86,18° в. д.), Кош-Агач (50° с. ш., 88,67° в. д.), Кызыл-Озек (51,9° с. ш., 86° в. д.), Онгудай (50,75° с. ш., 86,13° в. д.), Турочак (52,25° с. ш., 87,13° в. д.), Усть-Кана (50,93° с. ш., 84,75° в. д.), Усть-Кокса (50,27° с. ш., 85,62° в. д.), Чемал (51,38° с. ш., 86,02° в. д.), Яйлю (51,77° с. ш., 87,6° в. д.). Расположение метеостанций продемонстрировано на рис. 1.

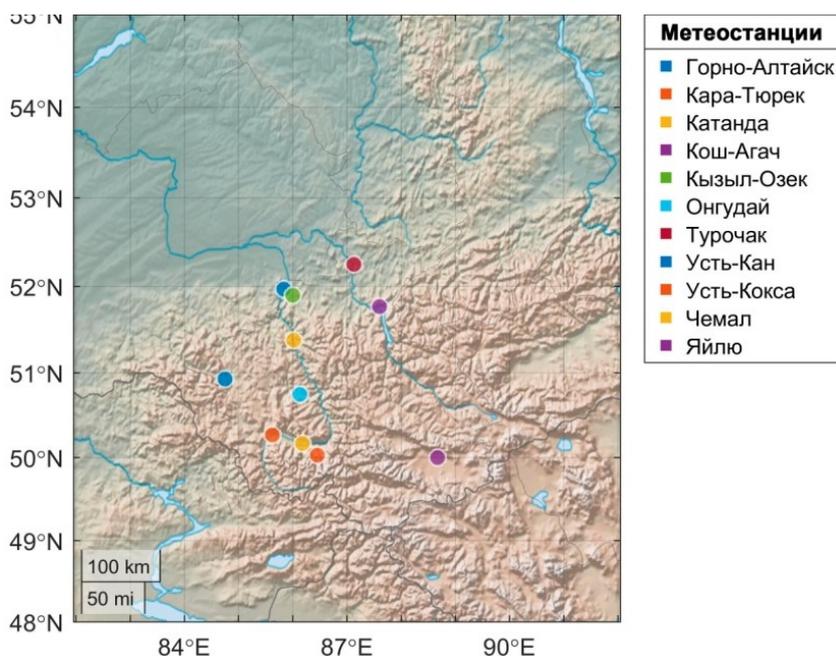


Рис. 1. Расположение метеостанций в Республике Алтай, Россия
Fig. 1. Location of weather stations in the Altai Republic, Russia

Основным методом исследования тенденций изменения температуры и количества выпавших осадков в Республике Алтай был выбран анализ линейных трендов. Коэффициенты линейных временных трендов вычислялись методом наименьших квадратов для периодов с 1992 по 2001, с 2002 по 2011 и с 2012 по 2021 гг. Размерность величины трендов (Tr) для температуры воздуха выражена в °C/10 лет, для осадков — мм/10 лет. Для картографического анализа пространственного изменения величин трендов были использованы технологии ГИС в Matlab с применением Mapping Toolbox.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчитанная величина линейного тренда изменения среднемесячной температуры воздуха для трех периодов на метеостанциях Республики Алтай показала, что с 1991 по 2001 и с 2012 по 2021 гг. наблюдалось потепление, средняя скорость которого в постсоветское десятилетие в исследуемом регионе составила 1,7 °C/10 лет, а в последнее десятилетие — 1,2 °C/10 лет. Однако с 2002 по 2011 гг. почти на всех метеостанциях Республики Алтай зафиксированы отрицательные значения коэффициентов линейных трендов, а средняя скорость похолодания в это десятилетия равна -0,9 °C/10 лет (табл. 1).

Табл. 1. Величины линейных трендов изменения температуры воздуха за 10 лет по данным метеостанций Республики Алтай
Table 1. The magnitude of linear trends in air temperature changes over 10 years according to weather stations in the Altai Republic

Метеостанция	Высота расположения (м)	Tr 1992–2001 (°C/10 лет)	Tr 2002–2011 (°C/10 лет)	Tr 2012–2021 (°C/10 лет)
Горно-Алтайск	291	1,8	-0,8	1,8
Кара-Тюрек	2596	1,4	0,3	1,1
Катанда	949	2,3	-2,1	1,2
Кош-Агач	1760	1,2	-1,0	0,9
Кызыл-Озек	326	1,6	-1,0	1,5
Онгудай	833	2,4	-1,5	0,9
Турочак	327	1,7	-0,9	1,3
Усть-Кан	1037	1,7	-1,0	1,2
Усть-Кокса	979	1,6	-0,4	1,3
Чемал	419	1,5	-1,0	1,1
Яйлю	480	1,3	-0,8	0,9

Если рассматривать пространственно-временную дифференциацию изменения величин трендов температуры воздуха в Республике Алтай, то по данным реанализа NCEP/NCAR на юго-востоке региона во второе десятилетие фиксируется незначительное потепление в районе метеостанции Кош-Агач, а с 2012 по 2021 — похолодание (рис. 2). Это не согласуется с реальными значениями (см. табл. 1), и отсюда можно сделать вывод, что в реанализе NCEP/NCAR плохо усвоены данные российских метеостанций Республики Алтай.

В отличие от NCEP/NCAR, реанализ ERA5 правильно воспроизводит величины линейных трендов изменения температуры воздуха для всех трех десятилетий в исследуемом регионе (рис. 3). Исходя из полученных результатов, можно предположить о влиянии квазипериодических межгодовых процессов, возникающих в климатической системе Земли, которые относятся к естественным природным процессам и могут вносить

большой вклад в изменчивость разных метеопараметров, нежели антропогенные процессы. Однако для доказательства этой гипотезы необходим более углубленный анализ изучения изменения климата в республике Алтай в зависимости от влияния основных индексов циркуляции атмосферы, таких как Южное Колебание, Арктическая Осцилляция, Северо-Атлантическое Колебание и др.

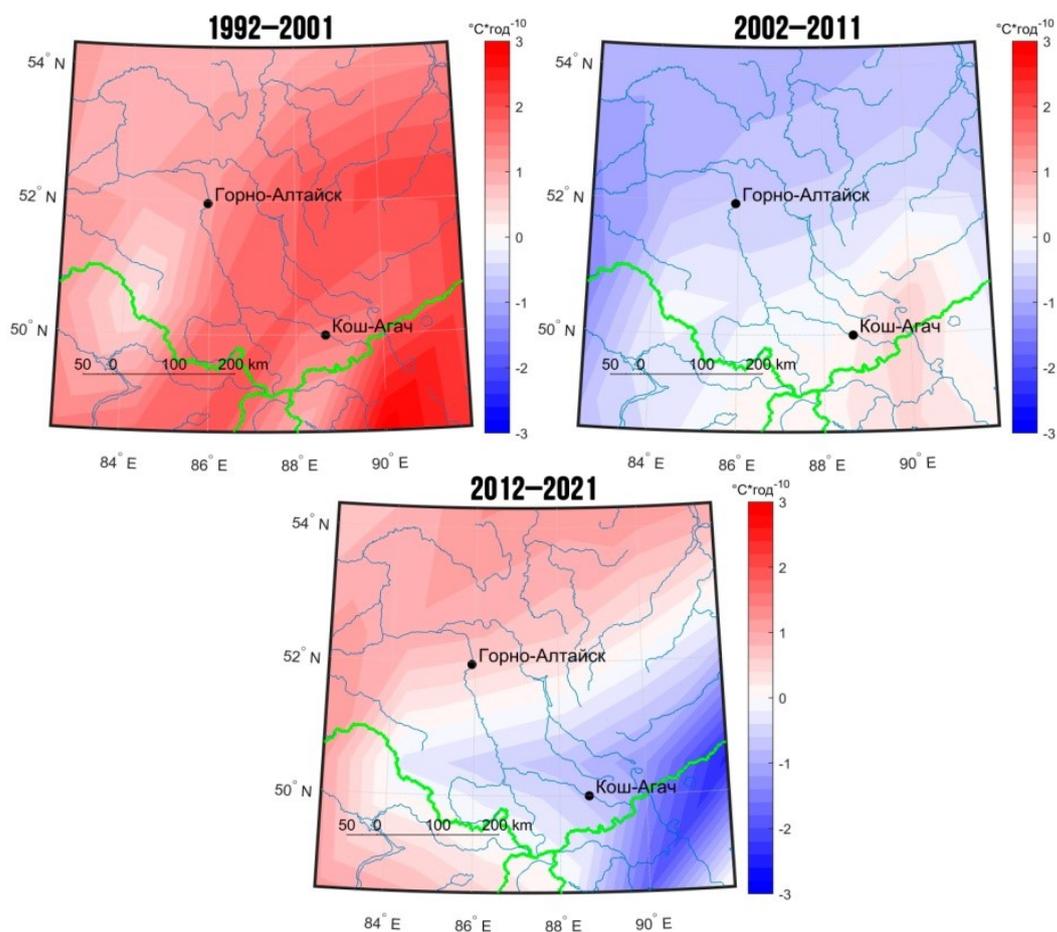


Рис. 2. Пространственное изменение величин линейных трендов температуры воздуха в Республике Алтай по данным реанализа NCEP/NCAR для трех десятилетних периодов
Fig. 2. Spatial changes in linear air temperature trends in the Altai Republic according to NCEP/NCAR reanalysis data for three ten-year periods

Климатический анализ изменения количества выпавших осадков в Республике Алтай для трех десятилетий вызвал трудности из-за огромных пропусков данных. В табл. 2 зеленым цветом выделены метеостанции, на которых зафиксированы полные ряды среднемесячных значений количества выпавших осадков. Это метеостанции Кара-Турек, Кызыл-Озёк, Турочак и Чемал. В среднем в регионе за последние два десятилетия наблюдается уменьшение количества осадков. Средняя скорость сокращения осадков с 2002 по 2011 гг. составила $-2,2$ мм/10 лет, а с 2012 по 2021 гг. — $-11,0$ мм/10 лет. Максимальная скорость уменьшения осадков ($Tr = -58,08$ мм/10 лет) в последнее десятилетие наблюдается на самой высокорасположенной метеостанции — Кара-Турек (высота составляет 2 596 м). Интересно отметить, что сокращение осадков характерно именно для западной части Республики Алтай (рис. 4).

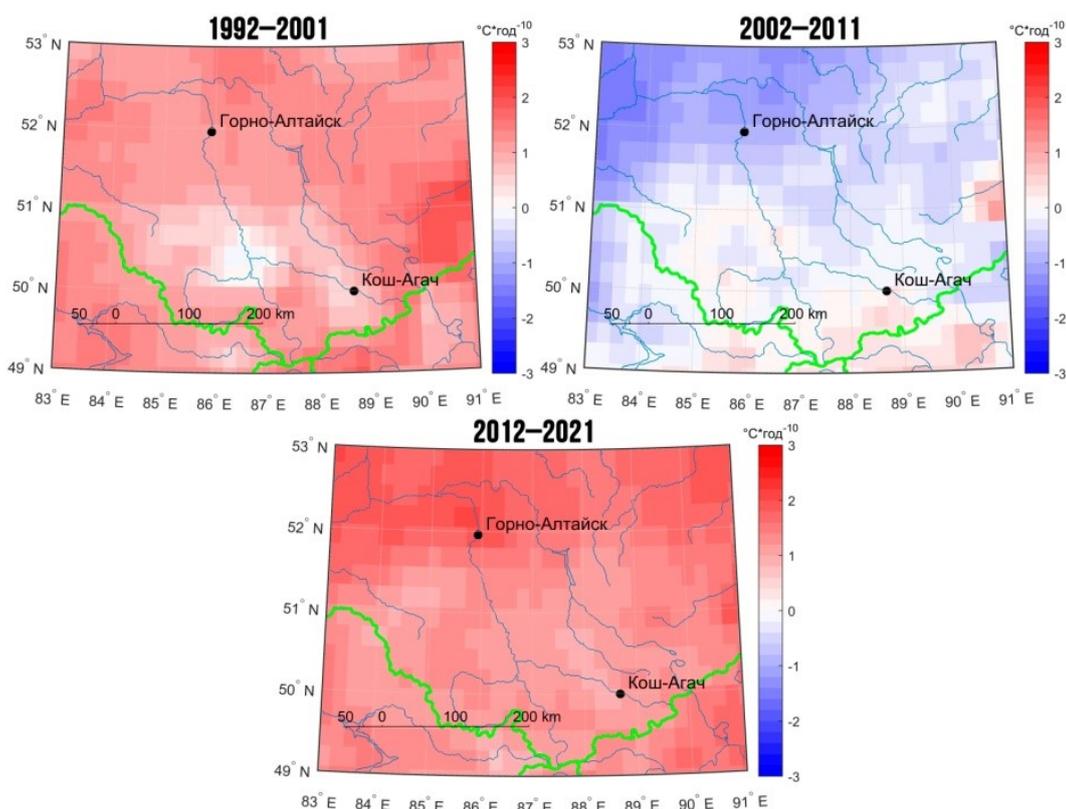


Рис. 3. Пространственное изменение величин линейных трендов температуры воздуха в Республике Алтай по данным реанализа ERA5 для трех десятилетних периодов
 Fig. 3. Spatial changes in linear air temperature trends in the Altai Republic according to ERA5 reanalysis data for three ten-year periods

Табл. 2. Величины линейных трендов изменения количества выпавших осадков за 10 лет по данным метеостанций Республики Алтай. Зеленым цветом отмечены полные ряды данных

Table 2. The magnitude of linear trends in changes in the amount of precipitation over 10 years according to weather stations in the Altai Republic. Complete data series are marked in green

Метеостанция	Высота расположения (м)	Tr 1992–2001 (мм/10 лет)	Tr 2002–2011 (мм/10 лет)	Tr 2012–2021 (мм/10 лет)
Горно-Алтайск	291	30,9	–33,528	–
Кара-Тюрек	2596	2,844	3,48	–58,08
Катанда	949	38,424	–3,072	4,944
Кош-Агач	1760	0,516	1,896	3,996
Кызыл-Озек	326	0,144	0,144	–38,22
Онгудай	833	3,144	2,184	–1,14
Турочак	327	13,872	–7,68	–3,132
Усть-Кан	1037	21,66	9,84	–4,476
Усть-Кокса	979	4,236	–1,236	–4,668
Чемал	419	11,556	–3,36	–1,428
Яйлю	480	–4,308	7,116	–8,064

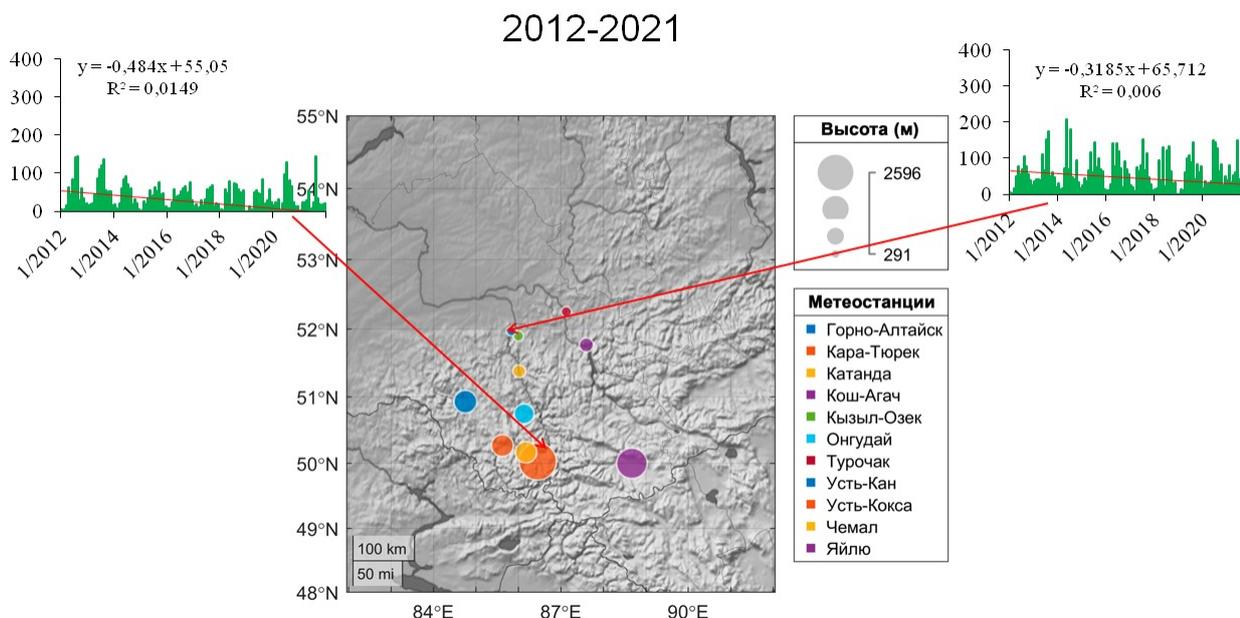


Рис. 4. Схема максимально сократившихся тенденций изменения количества осадков за период с 2012 по 2021 гг. на метеостанциях Кара-Тюрек и Кызыл-Озёке
Fig. 4. Scheme of the most reduced trends in precipitation changes for the period from 2012 to 2021 at the Kara-Tyurek and Kyzyl-Ozyok weather stations

ВЫВОДЫ

По данным метеостанций Республики Алтай Российской Федерации и двух атмосферных реанализов NCEP/NCAR и ERA5 проанализированы изменения двух основных климатических параметров — среднемесячной температуры воздуха и суммарного количества выпавших осадков за месяц — для трех десятилетних постсоветских периода с 1991 по 2021 гг. В целом за тридцать лет наблюдаются положительные тенденции изменения температуры воздуха, что согласуется с докладом Росгидромета за 2022 г. [Доклад об..., 2023]. Однако с 2002 по 2011 гг. линейные тренды изменения температуры воздуха почти на всех метеостанция Республики Алтай отрицательные. Возможно, это говорит о влиянии (наличии) квази-десятилетней осцилляции. Кроме этого, в настоящей статье сделан вывод, что заметно сократилось количество осадков за последнее десятилетие в некоторых высокогорных районах Алтая.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, грант № 23-27-00429.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 23-27-00429).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. Москва: Росгидромет, 2023. 104 с.

Ротанова И. Н., Харламова Н. Ф., Останин О. В. Изменения климата Алтая за период инструментальных исследований. Известия Алтайского государственного университета, 2012. № 3-2(75). С. 105–109.

Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020. V. 146. Iss. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2021. 2391 p. DOI: 10.1017/9781009157896.

IPCC, 2022: *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, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844.

IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* IPCC, Geneva, Switzerland, 184 p. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds B., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Roy J., Dennis J. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996. V. 77. Iss. 3. P. 437–470. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.

REFERENCES

Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020. V. 146. Iss. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2021. 2391 p. DOI: 10.1017/9781009157896.

IPCC, 2022: *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, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844.

IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* IPCC, Geneva, Switzerland, 184 p. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds B., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Roy J., Dennis J. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996. V. 77. Iss. 3. P. 437–470. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.

Report on climate features in the Russian Federation for 2022. Moscow: Rosgidromet, 2023. 104 p. (in Russian).

Rotanova I. N., Kharlamova N. F., Ostanin O. V. Climate changes in Altai during the period of instrumental research. *Izvestiya of Altai State University*, 2012. No. 3-2(75). P. 105–109 (in Russian).

Т. П. Варшанина¹, О. А. Плисенко², Е. П. Свиридова³

ГИС «ПАСПОРТ КЛИМАТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕСПУБЛИКИ АДЫГЕЯ»

АННОТАЦИЯ

Подтверждена актуальность ландшафтно-климатического зонирования геоинформационного регионального пространства для исследования и прогнозирования изменчивости и изменения климата в целях предупреждающей адаптации к погодно-климатическим воздействиям региональной социально-экономической жизнедеятельности. В Адыгее по комплексу физико-географических и гидроклиматических характеристик выделено 9 ландшафтно-климатических мезорайонов и в них 17 районов, соответствующих равнинному, низкогорному и среднегорному высотным поясам. В дальнейшем предполагается микроклиматическое районирование. В базе данных ГИС Адыгеи накапливается и пространственно детализируется информация по климатическим условиям, климатообразующим факторам, основным гидрометеорологическим характеристикам и повторяемости особо опасных явлений. Разработке ГИС-модуля мониторинга тенденций изменчивости и изменения климата предшествовало апробирование соответствующих методов в условиях декларированного детального ландшафтно-климатического зонирования территории. Сравнение результатов исследования тенденций изменчивости и изменений климата, произведенного авторами по данным инструментальных наблюдений и методом реанализа, свидетельствует о низком пространственно-временном разрешении метода реанализа. Реанализ не показал существенного различия выявленных ландшафтно-климатических мезорайонов по величине трендов метеовеличин как в многолетнем, так и во внутригодовом ходе, а также своевременно не выявил резкого изменения в них многолетнего хода среднемесячной температуры воздуха. Полученные результаты убеждают в необходимости включения в ГИС «Паспорт климатической безопасности Адыгеи» модуля мониторинга тенденций изменчивости и изменения климата на основе инструментальных данных с прогнозированием на периодах, соответствующих естественной 20-летней периодичности изменчивости климата.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геоинформационное ландшафтно-климатическое зонирование, межгодовая и внутригодовая изменчивость климата, тренды изменения и изменчивости климата

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

² Адыгейский государственный университет, НИИ комплексных проблем АГУ, Центр интеллектуальных геоинформационных технологий, ул. Гагарина, 13, Майкоп, Россия, 385000, *e-mail: olg.plisenko2017@yandex.ru*

³ Адыгейский государственный университет, НИИ комплексных проблем АГУ, Центр интеллектуальных геоинформационных технологий, ул. Гагарина, 13, Майкоп, Россия, 385000, *e-mail: lenor-agy@yandex.ru*

Tatyana P. Varshanina¹, Olga A. Plisenko², Elena P. Sviridova³

GIS “PASSPORT OF CLIMATIC SAFETY OF THE REPUBLIC OF ADYGEA”

ABSTRACT

The relevance of landscape-climatic zoning of geoinformation regional space for research and forecasting of climate variability and change for preventive adaptation to weather-climatic impacts of regional socio-economic life activity is confirmed. In Adygea, based on the complex of physiographic and hydroclimatic characteristics 9 landscape-climatic meso-districts and, within them, 17 districts corresponding to plain, low-altitude and middle-altitude belts are identified. Further microclimatic zoning is envisaged. The GIS database of Adygea accumulates and spatially details information on climatic conditions, climate-forming factors, main hydrometeorological characteristics and recurrence of especially dangerous phenomena. The development of GIS-module for monitoring trends in climate variability and change was preceded by testing of appropriate methods in the conditions of the declared detailed landscape-climatic zoning of the territory. Comparison of the results of the study of trends in climate variability and change made by the authors using instrumental observations and the reanalysis method shows the low spatial and temporal resolution of the reanalysis method. The reanalysis did not show any significant difference between the identified landscape-climatic meso-districts in terms of the magnitude of trends in meteorological values both in the multiyear and intra-annual course, it also did not reveal any sharp changes in the multiyear course of mean monthly air temperature in them. The obtained results confirm that the module for monitoring of tendencies of climate variability and change, on the basis of instrumental data with forecasting on periods corresponding to natural 20-year periodicity of climate variability, is required in GIS “Passport of climate safety of Adygea”.

KEYWORDS: geoinformation landscape-climatic zoning, inter-annual and intra-annual climate variability, trends of climate change and variability

ВВЕДЕНИЕ

Декларируемый унифицированный подход⁴ к обоснованию и разработке региональных стратегий адаптации к изменчивости и изменениям климата секторов экономики и социальной сферы с оценкой возможных негативных последствий погодно-климатических воздействий в физико-географических и социально-экономических условиях субъектов Российской Федерации предполагает мониторинг и аналитическую обработку больших массивов разнородной пространственно-временной информации средствами геоинформационных систем и баз данных. Этот масштабный проект нуждается в согласованном взаимодействии множества административных и ведомственных структур регионов и формировании методологического базиса для его реализации. В соответствии с поставленными в проекте задачами, на первом этапе в ГИС Адыгеи произведено накопление в базе данных и картографическая визуализация информации по

¹ Adyghe State University, Research Institute of Complex Problems of ASU, Center for Intelligent Geoinformation Technologies, 13, Gagarina str., Maykop, Russia, 385000, *e-mail*: vtp01@mail.ru

² Adyghe State University, Research Institute of Complex Problems of ASU, Center for Intelligent Geoinformation Technologies, 13, Gagarina str., Maykop, 385000, Russia, *e-mail*: olg.plisenko2017@yandex.ru

³ Adyghe State University, Research Institute of Complex Problems of ASU, Center for Intelligent Geoinformation Technologies, 13, Gagarina str., Maykop, 385000, Russia, *e-mail*: lenor-agy@yandex.ru

⁴ Распоряжение Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 19 мая 2021 г. № 6-р «Об утверждении Типового паспорта климатической безопасности территории субъекта Российской Федерации»

климатическим условиям, климатообразующим факторам, основным гидро-метеорологическим характеристикам и повторяемости опасных и особо опасных явлений [Атлас Республики Адыгея, 2005; *Варшанина, Митусов*, 2005]. Выполнено детальное ландшафтно-климатическое зонирование территории. По комплексу характеристик, интерпретирующих средоформирующие климатические параметры, определено 9 ландшафтно-климатических мезорайонов и 17 районов. Дальнейшим шагом дискретизации предлагается микроклиматическое районирование. В горно-равнинной Адыгее данными инструментальных наблюдений обеспечены три мезорайона, соответствующие равнинному, низкогорному и среднегорному высотным поясам. Тенденции изменчивости макроклимата по инструментальным данным исследовались за период с 1906 по 1999 гг. по результатам вычисления трендов климатических величин, отражающих изменения режима циркуляции на Западном Кавказе, а также методом реанализа за период с 1900 по 2015 гг.

В процессе разработки ГИС-модуля мониторинга изменения климата в ландшафтно-климатических мезорайонах горно-равнинного региона поставлена задача сравнительного анализа эффективности пространственно-временного разрешения оценки изменения и изменчивости климата по результатам реанализа и непосредственного вычисления по инструментальным данным на примере поля температуры приземной атмосферы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использованы данные гидрометеорологических наблюдений в трех пунктах Республики Адыгея за период с 1982 по 2020 гг., предоставленные ФГБУ «Северо-Кавказское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». Пространственные закономерности сезонной и межгодовой изменчивости температуры по инструментальным данным выявлялись с применением линейного тренда, оцениваемого методом наименьших квадратов с помощью пакета STATISTICA.

Метод реанализа, или повторного анализа, ассимилирует/усваивает данные наблюдений в приземной и свободной атмосфере, полученные с помощью станционных, аэрологических и спутниковых наблюдений, и повторяет прошлые краткосрочные прогнозы погоды с использованием современных моделей прогнозирования. Методом реанализа [Solomon et al., 2007] в Адыгее исследовались данные за период с 1900 по 2015 гг. [Kostianoy et al., 2020]. Источником информации в этом исследовании служили открыто предоставляемые среднемесячные и среднесуточные данные, рассчитанные по регулярной сетке $1 \times 1^\circ$ [Compo et al., 2011; Giese et al., 2016; Slivinski et al., 2019]. В каждой точке сетки для среднемесячных и суточных данных рассчитывалась среднегодовая вариация за рассматриваемый период, которая затем вычиталась из соответствующих данных для получения аномалий относительно среднегодовой вариации. Данные и их аномалии были усреднены для узлов сетки, включенных в регион Адыгея ($43,5\text{--}45,5^\circ$ с. ш.; $39\text{--}41^\circ$ в. д.). Линейные тренды полученных временных рядов рассчитаны методом наименьших квадратов. Фильтрация временных рядов проводилась фильтром Баттерворта. Спектры временных рядов оценивались с использованием преобразования Фурье. Вейвлет-преобразования произведены с использованием вейвлет-функции Морле [Torrence, Compo, 1998].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследованию процессов изменчивости и изменения климата уделяется все большее внимание [Борзенкова, 1992; Груза, Ранькова, 2012; Панов, Спиридонова, 2019].

¹ Список/расположение одноуровневых переменных, доступных в 20CRV3. Электронный ресурс: https://psl.noaa.gov/data/20thC_Rean/table.all.html (дата обращения 03.02.2023)

В Адыгее впервые такие исследования произведены по данным инструментальных наблюдений за период с 1961 по 1999 гг. [Варшанина, Митусов, 2005]. В регионе было выявлено повышение среднегодовой температуры воздуха, связанное в основном с возрастанием температуры холодного периода, особенно в месяцы с переходом через 0 °С. Возрастание температуры воздуха в теплый период происходило только в равнинной части и было выражено слабее. По высотным ступеням, от равнины к горам нарастала тенденция к понижению температуры теплого и возрастанию температуры холодных периодов. В месяцы, переходные от лета к осени и от осени к зиме, в том же направлении отмечалось понижение среднемесячной температуры воздуха. Таким образом, были выявлены различия в многолетнем и годовом ходе изменений климата в равнинной и горной части республики [Атлас Республики Адыгея, 2005].

Изменение климата в Республике Адыгее исследовано также методом реанализа за период с 1900 по 2015 гг. [Kostianoy et al., 2020]. Отмечено, что изменение климата в Адыгее характеризовалось устойчивым медленным потеплением с 1900 по 1998 гг. с линейным трендом 0,020 °С/10 лет и интенсивным потеплением в последующий период до 2015 г. (1,2 °С/10 лет). Результаты реанализа в целом для территории Адыгеи подтвердили сделанный ранее на основе непосредственных инструментальных наблюдений за период с 1961 по 1999 гг. вывод о том, что потепление в Адыгее обусловлено повышением температуры в холодную половину года при слабом изменении температуры теплого периода.

Выявленный в результате реанализа тренд резкого повышения температуры воздуха за последние два десятилетия выдвигает на первый план проблему современных тенденций изменения климата на уровне ландшафтно-климатических мезорайонов, которым, по сути, соответствуют природно-экономические зоны хозяйственного освоения республики (рис. 1).

В настоящей работе исследование трендов климатических величин произведено по трем пунктам республики, имеющим достаточно длительные ряды инструментальных данных: Майкоп, Даховская, Гузерипль.

Пункт «г. Майкоп» располагается в Ханско-Майкопском районе Майкопско-Лабинского ландшафтно-климатического мезорайона. Климат этого мезорайона 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.

Пункт «станция Даховская» располагается в Даховском районе Даховско-Гузерипльского ландшафтно-климатического мезорайона в среднегорном высотном поясе. Здесь усиливается влияние восхождения воздушных масс, обострения фронтов, прослеживается контрастность климатов противоположных экспозиций, но заметным оказывается и воздействие циркуляционных процессов на прилегающие равнины.

Пункт «поселок Гузерипль» располагается на северном склоне Главного хребта Кавказа. В нем процесс динамической трансформации воздушных масс становится основным. Циркуляция атмосферы над равнинами на его климат существенного влияния не оказывает.

Вычисленные линейные тренды основных метеорологических элементов по указанным пунктам показали низкое разрешение метода реанализа не только в пространственном, но и временном аспектах: определена резкая смена режима годового хода температуры.

Так, в равнинной части Адыгеи отмечено не выявленное реанализом высокое значение положительного тренда температуры за счет увеличения максимальных температур летне-осеннего периода (табл. 1). В многолетнем ходе повторяемости аномальных и экстремальных температур здесь проявляется 10–12-летняя периодичность (рис. 1).

В общей тенденции изменения климата в пункте «ст. Даховская» прослеживается аналогия с пунктом «г. Майкоп»: в многолетнем ходе высокое значение положительного тренда температуры происходит за счет повышения температур летне-осеннего периода. В многолетнем ходе прослеживается увеличение межгодовой изменчивости как аномальных, так и экстремальных среднемесячных температур воздуха, с аналогичным для равнинной части территории ритмом (табл. 1, рис. 2).

Общая тенденция изменения климата в пункте «пос. Гузерипль» за период с 2002 по 2020 гг. отличается от равнинного аналога. Тренды многолетнего хода среднемесячной и минимальной температур характеризуются малыми величинами. При тенденции к некоторому увеличению изменчивости положительной среднемесячной температуры воздуха, изменчивость отрицательной среднемесячной температуры с 2017 г. нивелируется (табл. 1, рис. 3).

Табл. 1. Линейный тренд многолетнего хода температуры воздуха, °C/10 лет
Table 1. Linear trend of multiyear variations of air temperature, °C/10 years

Тренд температуры воздуха, °C/10 лет	Майкоп	Даховская	Гузерипль
среднемесячная	0,83	0,66	0,05
максимальная месячная	0,96	1,16	0,10
минимальная месячная	0,46	0,50	0,01

Рис. 1. Майкоп. Ход повторяемости аномальных и экстремальных значений среднемесячных температур воздуха, 1982–2020 гг.

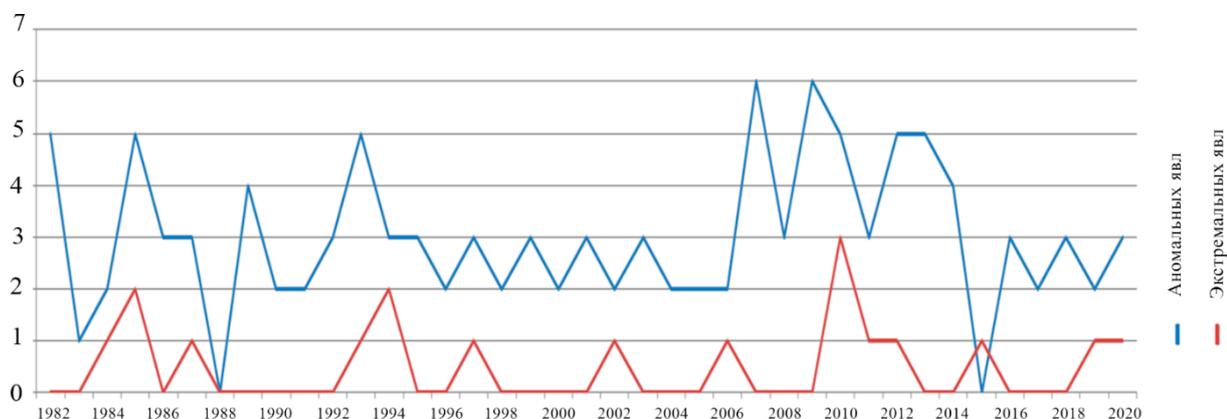


Fig. 1. Maikop. Course of recurrence of abnormal and extreme values of average monthly air temperatures, 1982–2020

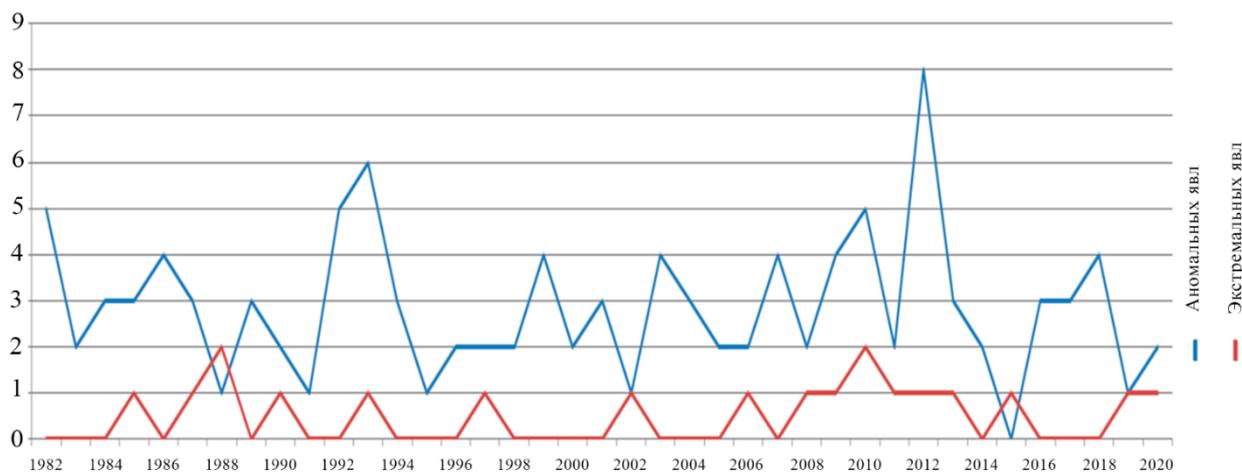


Рис. 2. Даховская. Ход повторяемости аномальных и экстремальных значений среднемесячных температур воздуха, 1982–2020 гг.

Fig. 2. Dakhovskaya. Course of recurrence of abnormal and extreme values of average monthly air temperatures, 1982–2020

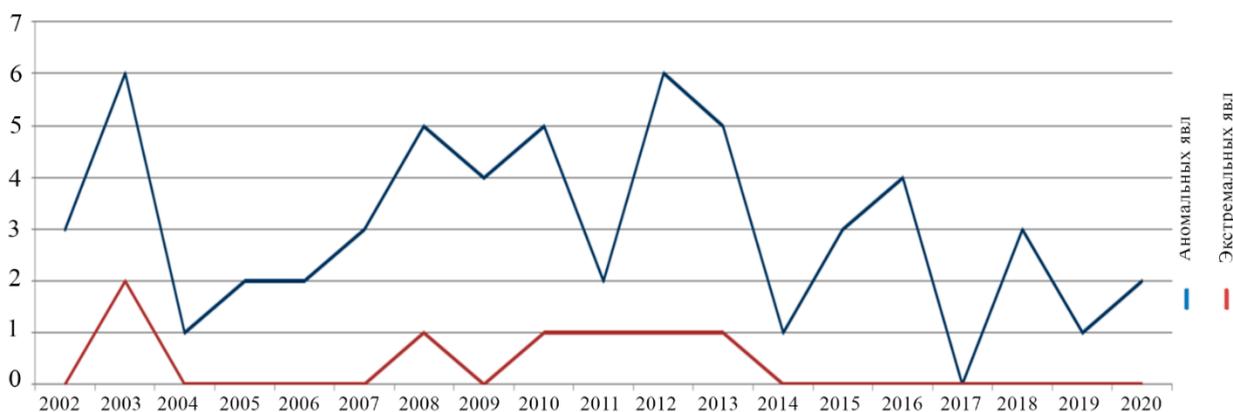


Рис. 3. Гузерипль. Ход повторяемости аномальных и экстремальных среднемесячных температур воздуха, 1982–2020 гг.

Fig. 3. Guzeripli. Course of recurrence of abnormal and extreme values of average monthly air temperatures, 1918–2020

Обращает на себя внимание хорошо выраженный сдвиг высоких значений положительного тренда среднемесячной температуры воздуха на осеннее время в равнинной части Адыгеи. В менее выраженном варианте этот сдвиг отмечен и в среднегорье. На северном склоне Главного хребта Кавказа, в пос. Гузерипль, тренд изменчивости зимних температур практически равен нулю, высок он в переходные периоды и очень высок в летние месяцы (табл. 2).

Полученные результаты радикально отличаются от отмечаемых ранее тенденций [Варшанина, Митусов, 2005; Kostianou et al., 2020] потепления климата за счет выраженного повышения зимних температур при слабом повышении температуры в летнее время.

Из изложенного следует, что для успешной упреждающей адаптации к изменениям климата социально-экономической деятельности в природно-экономических зонах хозяйственного освоения республики необходим мониторинг трендов критичных для

хозяйственной деятельности метеоэлементов и метеопроцессов, соответствующее прогнозирование и на этой основе расчет предполагаемых экономических потерь.

Для обеспечения оперативного реагирования социально-экономической деятельности в Адыгее на климатические изменения разработан модуль актуализации значения искомых трендов относительно ландшафтно-климатических мезорайонов (рис. 2).

Табл. 2. Тренды внутригодового хода среднемесячной температуры воздуха за период с 1982 по 2020 гг.

Table 2. Trends of intra-annual variations of mean monthly air temperature for the period from 1982 no 2020

Месяц	Пункт			Месяц	Пункт		
	Майкоп	Даховская	Гузерибль		Майкоп	Даховская	Гузерибль
I	0,10	0,16	0	VII	0,80	0,20	3,45
II	0,70	0,90	-0,10	VIII	1,03	0,96	0,45
III	0,40	0,80	1,80	IX	0,76	0,73	1,10
IV	-0,30	0,13	0,08	X	0,96	1,00	1,10
V	0,50	-0,11	1,05	XI	0,66	0,90	0
VI	1,10	1,06	3,50	XII	0,70	0,93	0

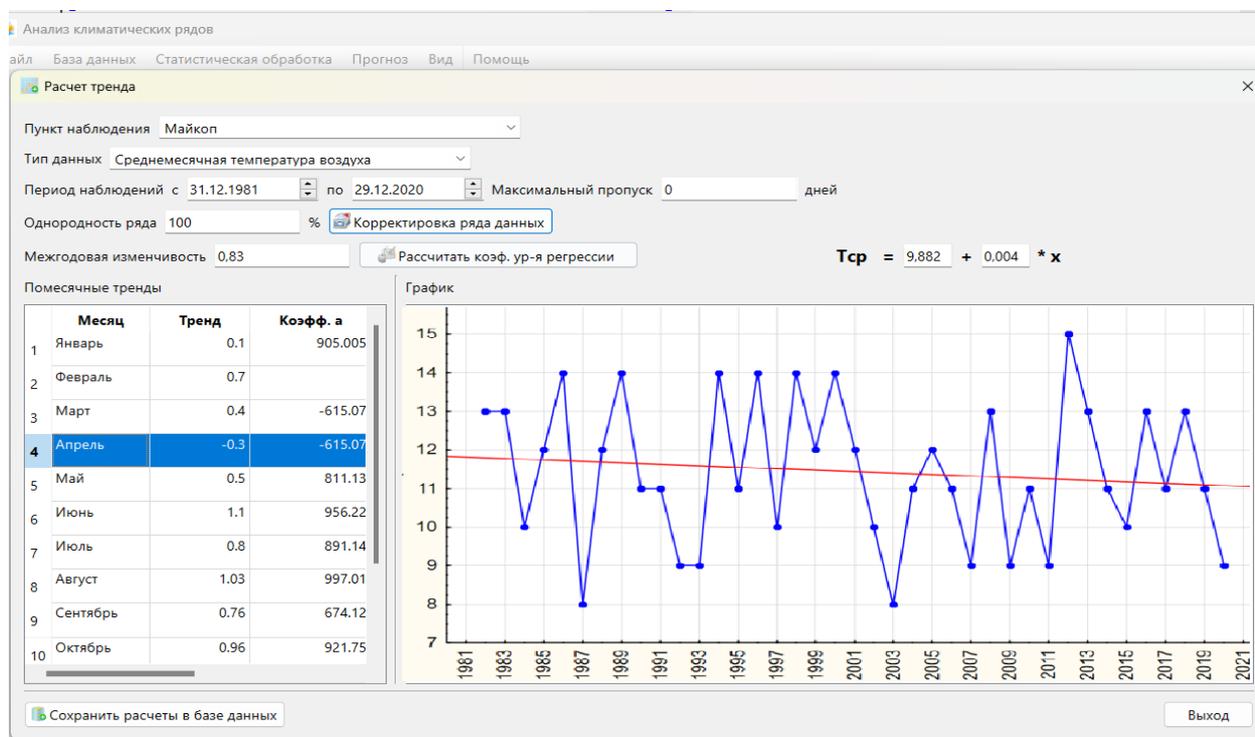


Рис. 2. Окно модуля мониторинга трендов изменения и изменчивости климата по ландшафтно-климатическим мезорайонам

Fig. 2. Window of the module for monitoring trends in climate change and variability by landscape and climate mesoraions

ВЫВОДЫ

В результате системного геоинформационного анализа физико-географических и гидроклиматических характеристик территории произведено детальное ландшафтно-климатическое зонирование горно-равнинной Адыгеи и определены операционные пространственные единицы ГИС «Паспорт климатической безопасности Республики Адыгея», характеризующиеся индивидуальным режимом изменчивости и изменения климата.

Сравнение оценки изменений климата на примере линейного тренда сезонной и межгодовой изменчивости температуры, вычисляемого, с одной стороны, по данным, ассимилируемым реанализом в узлах регулярной сетки, с другой стороны, по инструментальным стационарным данным, выявило низкое пространственно-временное разрешение системы реанализа.

По инструментальным данным за период с 1906 по 1999 гг. при общей для территории тенденции возрастания среднегодовой температуры, связанной в основном с возрастанием температуры холодного периода; слабо выраженное возрастание температуры воздуха в теплый период отмечено только на равнине.

Результатами реанализа в целом для территории Адыгеи за период с 1900 по 2015 гг. определено, что при общем тренде возрастания температуры, наиболее интенсивное потепление за последние 20 лет обусловлено повышением температуры в холодную половину года при слабом изменении температуры теплого периода.

В то же время анализ инструментальных данных за период с 1982 по 2020 гг. показал не только существенные отличия по высотным ландшафтно-климатическим мезорайонам трендов межгодового и внутригодового хода среднемесячной температуры, но и резкую смену их знака. В этом временном интервале потепление происходит за счет возрастания температуры в летне-осенний период, при слабом или нулевом тренде (в горах) — в холодный период.

Полученные данные свидетельствуют об актуальности формирования системы инструментального мониторинга и адресного относительно ландшафтно-климатических мезорайонов прогнозирования климатических изменений для обеспечения климатической безопасности региона, обоснования и разработки региональной стратегии адаптации к изменчивости и изменениям климата секторов экономики и социальной сферы Адыгеи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас Республики Адыгея. Майкоп: Центр геоинформационных технологий АГУ, 2005. 79 с.
- Борзенкова И. И.* Изменение климата в кайнозое. СПб: Гидрометеоздат, 1992. 247 с.
- Варшанина Т. П., Митусов Д. В.* Климатические ресурсы ландшафтов Республики Адыгея. Майкоп: Издательство Адыгейского госуниверситета, 2005. 237 с.
- Груза Г. В., Ранькова Э. Я.* Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2012. 194 с.
- Панов Б. Н., Спиридонова Е. О.* Климатические изменения поля приземного атмосферного давления в Азово-Черноморском регионе (1960–2017 гг.). Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки, 2019. № 2 (202). С. 66–73. DOI: 10.23683/0321-3005-2019-2-66-73.
- Compo G. P., Whitaker I. 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 D., Ross T. F., Trigo R. M., Wang X. L., Woodruff S. D., Worley S. J.* The

twentieth century reanalysis project. Q J R Meteorol. Soc., 2011. No. 137. P. 1–28. DOI: 10.1002/qj.776.

Giese B. S., Seidel H. F., Compo G. P., Sardeshmukh P. D. An ensemble of ocean reanalyses for 1815–2013 with sparse observational input. J Geophys. Res. Oceans, 2016. No. 121. P. 6891–6910. DOI: 10.1002/2016JC012079.

Kostianoy A. G., Serykh I. V., Lebedev S. A., Kostianaia E A., Varshanina T. P. Regional climate change in the Republic of Adygea. Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland, 2020. P. 311–358. DOI: 10.1007/698_2021_734.

Slivinski L. C., Compo G. P., Whitaker J. S., Sardeshmukh P. D., Giese B. S., McColl C., Allan R., Yin X., Vose R., Titchner H., Kennedy J., Spencer L. J., Ashcroft L., Brönnimann S., Brunet M., Camuffo D., Cornes R., Cram T. A., Crouthamel R., Domínguez-Castro F., Freeman J. E., Gergis J., Hawkins E., Jones P. D., Jourdain S., Kaplan A., Kubota H., Le Blancq F., Lee T., Lorrey A., Luterbacher J., Maugeri M., Mock C. J., Moore G. K., Przybylak R., Pudmenzky C., Reason C., Slonosky VC, Smith C, Tinz B, Trewin B., Valente M. A., Wang X. L., Wilkinson C., Wood K., Wyszyński P. Towards a more reliable historical reanalysis: improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system. Q J R Meteorol Soc., 2019. DOI: 10.1002/qj.3598.

Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L. Technical Summary. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom; New York, USA: Cambridge Univ. Press, 2007. 91 p.

Torrence D. C., Compo G. P. A practical guide to wavelet analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998. V. 79. Iss. 1. P. 61–78. DOI: 10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2.

REFERENCES

Atlas of the Republic of Adygeya. Maikop: Center for geoinformation technologies of ASU, 2005. 79 p. (in Russian).

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

Compo G. P., Whitaker I. 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 D., Ross T. F., Trigo R. M., Wang X. L., Woodruff S. D., Worley S. J. The twentieth century reanalysis project. Q J R Meteorol. Soc., 2011. No. 137. P. 1–28. DOI: 10.1002/qj.776.

Giese B. S., Seidel H. F., Compo G. P., Sardeshmukh P. D. An ensemble of ocean reanalyses for 1815–2013 with sparse observational input. J Geophys. Res. Oceans, 2016. No. 121. P. 6891–6910. DOI: 10.1002/2016JC012079.

Gruza G. V., Rankova E. Y. Observed and Expected Climate Changes in Russia: Air Temperature. Obninsk: Federal state educational institution All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information, World Data Center, 2012. 194 p. (in Russian).

Kostianoy A. G., Serykh I. V., Lebedev S. A., Kostianaia E A., Varshanina T. P. Regional climate change in the Republic of Adygea. Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland, 2020. P. 311–358. DOI: 10.1007/698_2021_734.

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. No. 2(202). P. 66–73 (in Russian). DOI: 10.23683/0321-3005-2019-2-66-73.

Slivinski L. C., Compo G. P., Whitaker J. S., Sardeshmukh P. D., Giese B. S., McColl C., Allan R., Yin X., Vose R., Titchner H., Kennedy J., Spencer L. J., Ashcroft L., Brönnimann S., Brunet M., Camuffo D., Cornes R., Cram T. A., Crouthamel R., Domínguez-Castro F., Freeman J. E., Gergis J., Hawkins E., Jones P. D., Jourdain S., Kaplan A., Kubota H., Le Blancq F., Lee T., Lorrey A., Luterbacher J., Maugeri M., Mock C. J., Moore G. K., Przybylak R., Pudmenzky C., Reason C., Slonosky V. C., Smith C., Tinz B., Trewin B., Valente M. A., Wang X. L., Wilkinson C., Wood K., Wyszyński P. Towards a more reliable historical reanalysis: improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system. *Q J R Meteorol. Soc.*, 2019. DOI: 10.1002/qj.3598.

Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L. Technical Summary. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, United Kingdom; New York, USA: Cambridge Univ. Press, 2007. 91 p.

Torrence D. C., Compo G. P. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998. V. 79. Iss. 1. P. 61–78. DOI: 10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2.

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).

А. Н. Гуня¹, Р. А. Гакаев²

ЛАНДШАФТНО-ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕЙ НА ТЕРРИТОРИИ ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

АННОТАЦИЯ

В работе анализируются оползневые процессы, распространенные в горной части Чеченской Республики и активизирующиеся в связи природными и природно-антропогенными процессами. За основу взята созданная авторами геоинформационная система и база данных с 1 800 оползнями, включающая номер оползня, его географические координаты, описание размеров, степени активности, характер встроенности во вмещающий ландшафт, катастрофические подвижки и др. Методологическими рамками послужила ландшафтная концепция, рассматривающая оползни как ландшафтно-оползневые комплексы. Целью данной работы является разработка ландшафтно-геоэкологического подхода к картографированию оползней на региональном и локальном уровнях, в котором сочетаются традиционные методы предполевого и полевого ландшафтного профилирования и картографирования, сопровождающиеся дешифрированием материалов дистанционного зондирования Земли, составлением ландшафтно-геоморфологических профилей и картографированием конкретных оползневых ареалов с использованием ГИС-технологий. Для реализации этой цели были использованы два уровня детальности картографирования: 1) мезомасштабное картографирование оползней на горной части территории Чеченской Республики; 2) крупномасштабное картографирование на ключевом участке в низкогорной зоне. Выявлены закономерности распространения оползней в зависимости от абсолютной высоты, экспозиции, крутизны склонов, хозяйственного использования вмещающего ландшафта. Продемонстрировано, что ландшафтно-геоморфологическое крупномасштабное профилирование и картографирование оползневых ареалов с использованием ГИС-технологий является эффективным методом для анализа механизмов оползнепроявления в конкретных природных и хозяйственных условиях. Крупномасштабное ландшафтно-геоморфологическое картографирование позволило выявить главные особенности динамики оползнепроявления. Различия в динамике выражены как в морфометрических показателях (длина и ширина оползневого тела, площадь поражения и др.), так и в системных особенностях: встроенности ландшафтно-оползневых комплексов в ландшафт, контрастности ландшафтной структуры по сравнению с фоновыми ландшафтами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оползни, ландшафтно-оползневые комплексы, Чеченская Республика, ландшафтная структура, ландшафтное картографирование

¹ Институт географии Российской академии наук (ИГ РАН), Старомонетный пер., д. 29, стр. 4, Москва, Россия, 119017, *e-mail*: a.n.gunya@igras.ru

² Чеченский государственный университет имени А. А. Кадырова, ул. А. Шерипова, д. 32, Грозный, Россия, 364024, *e-mail*: rustam.geofak@yandex.ru

Alexey N. Gunya¹, Rustam A. Gakaev²

LANDSCAPE AND GEOECOLOGICAL MAPPING OF LANDSLADES ON THE TERRITORY OF THE CHECHEN REPUBLIC

ABSTRACT

The work analyzes landslide processes that are common in the mountainous part of the Chechen Republic and are activated in connection with natural and natural-anthropogenic processes. The basis is the geographic information system created by the authors and a database with 1 800 landslides, including the individual landslide number, its geographical coordinates, description of the size, degree of activity, nature of its integration into the surrounding landscape, etc. The purpose of this work is to develop a landscape-geoecological approach to mapping landslides at the regional and local levels, which combines traditional methods of pre-field and field landscape profiling and mapping, accompanied by interpretation of Earth remote sensing materials, landscape-geomorphological profiling and mapping of specific landslide areas and landslides using GIS technologies. To achieve this goal, two levels of mapping detail were taken: 1) mesoscale mapping of landslides in the mountainous part of the territory of the Chechen Republic; 2) large-scale mapping in a key area in the low-mountain zone. The selection of the site was based on an assessment of its comprehensive landscape representativeness. Relationships between the spread of landslides depending on absolute height, exposure, slope steepness, and land use have been identified. It has been demonstrated that landscape-geomorphological large-scale profiling and mapping of specific landslide areas using GIS technologies is an effective method for analyzing the mechanisms of landslide occurrence in specific natural and economic conditions. Large-scale landscape-geomorphological mapping made it possible to identify the main features of the dynamics of landslide occurrence. Differences in dynamics are expressed both in morphometric indicators (length, affected area, etc.), as well as in systemic features: the embeddedness of landscape-landslide complexes in the landscape, the contrast of its landscape structure compared with background landscapes.

KEYWORDS: landslides, landscape-landslide complexes, Chechen Republic, landscape structure, landscape mapping

ВВЕДЕНИЕ

Оползневые процессы широко распространены в горах, они являются следствием сложного сочетания экзогенных и эндогенных процессов, на которые накладывается также и хозяйственная деятельность [Dai et al., 2002; Carla et al., 2009]. Изучение оползней является актуальным в связи с повышением рисков при реализации проектов по рекреационному освоению гор, прокладке дорог, линий связи [Jawad et al., 2017; Davies et al., 2020; Alcántara-Ayala, Geertsema, 2023]. Долгое время исследование оползневых процессов было прерогативой отраслевых специалистов, в основном инженерных геологов и геоморфологов. Развитие направления привлекло специалистов, изучающих не только геологию и рельеф, но и растительность, климат, социально-экономические процессы на территории с оползневыми процессами. В настоящее время картографирование оползней не обходится без отражения на картах связей между природными компонентами (рельефом, литологией, климатом, растительностью) с одной стороны, и природно-антропогенными с другой. Такая постановка

¹ Institute of Geography, RAS, 29, build. 4, Staromonetny ln., Moscow, 119017, Russia,
e-mail: a.n.gunya@igras.ru

² The Chechen State University, 32, A. Sheripova str., Grozny, 364024, Russia,
e-mail: rustam.geofak@yandex.ru

задач укладывается в комплексное направление изучения горных территорий [Sarmiento et al., 2023]. Развитию комплексного геоэкологического направления картографирования оползней способствуют современные методы геоинформационного картографирования с использованием материалов дистанционного зондирования высокого разрешения, получаемых с определенной периодичностью [Колбовский, 2022].

Оползневые процессы являются типичными для территории Чеченской Республики. Рыхлый делювиальный материал на склонах создавал благоприятные условия для развития плодородных почв и горного земледелия в основных ареалах проживания чеченцев в низкогорной и среднегорной частях региона. Рост населения и применение новых технологий обработки земель, орошения, прокладки дорог — все это привело к увеличению нагрузки на склоны и, как следствие, активизации оползневой активности. Массовые разрушения домов и дорог, нередко сопровождавшиеся человеческими жертвами, привели к оттоку населения с гор на равнину, плановым переселениям из очагов повышенной оползневой опасности. Все это могло стать одним из факторов повышения социальной напряженности в регионе в конце 1980-х гг. В настоящее время проблема снижения рисков оползневой опасности в регионе не решена, хотя имеются детальные исследования [Разумов и др., 2019].

Целью данной работы является разработка комплексного геоэкологического подхода по картографированию оползней с использованием ландшафтной концепции. Для реализации этой цели были использованы два уровня детальности картографирования:

- 1) мезомасштабное картографирование оползней в горной части территории Чеченской Республики;
- 2) крупномасштабное картографирование на ключевом участке в низкогорной зоне.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу работы положены материалы полевых исследований в сочетании с дешифрированием снимков. Основой к выявлению оползней стали изображения, предоставляемые сервисом Google Earth. Именно детальный анализ изображений разных лет вместе с полевыми обследованиями лег в основу создания базы данных. Алгоритм выявления и анализа динамики оползней включает детальный просмотр территории Чеченской Республики по снимкам разных масштабов, нанесения выявленных оползневых процессов на карты в среде ГИС, верификация установленных оползневых ареалов по снимкам разных лет и полевые обследования для установления характера оползневой динамики (рис. 1).

В результате были выявлены около 2 400 оползневых ареалов, после уточнения и генерализации в базу данных занесены 1 800 оползней на территории Чеченской Республики. На региональном уровне картографирование оползней опиралось на установление мест проявления оползня, его приуроченность к склонам разной экспозиции и уклонам, а также к тем или иным ландшафтам. Для этого использовались полученные с помощью геоинформационного моделирования карты уклонов и экспозиций, а также ландшафтная карта, созданная ранее в полевых условиях.

Для более детальной оценки комплекса природных и природно-антропогенных связей, лежащих в основе оползнепроявлений, было приведено ландшафтное картографирование типичного оползня в низкогорной зоне Чеченской Республики (Белгатойский оползень). Для этого использовалось сочетание полевого и камерального дешифрирования крупномасштабных снимков разных лет с выделением контуров ландшафтов и элементов оползневого тела.

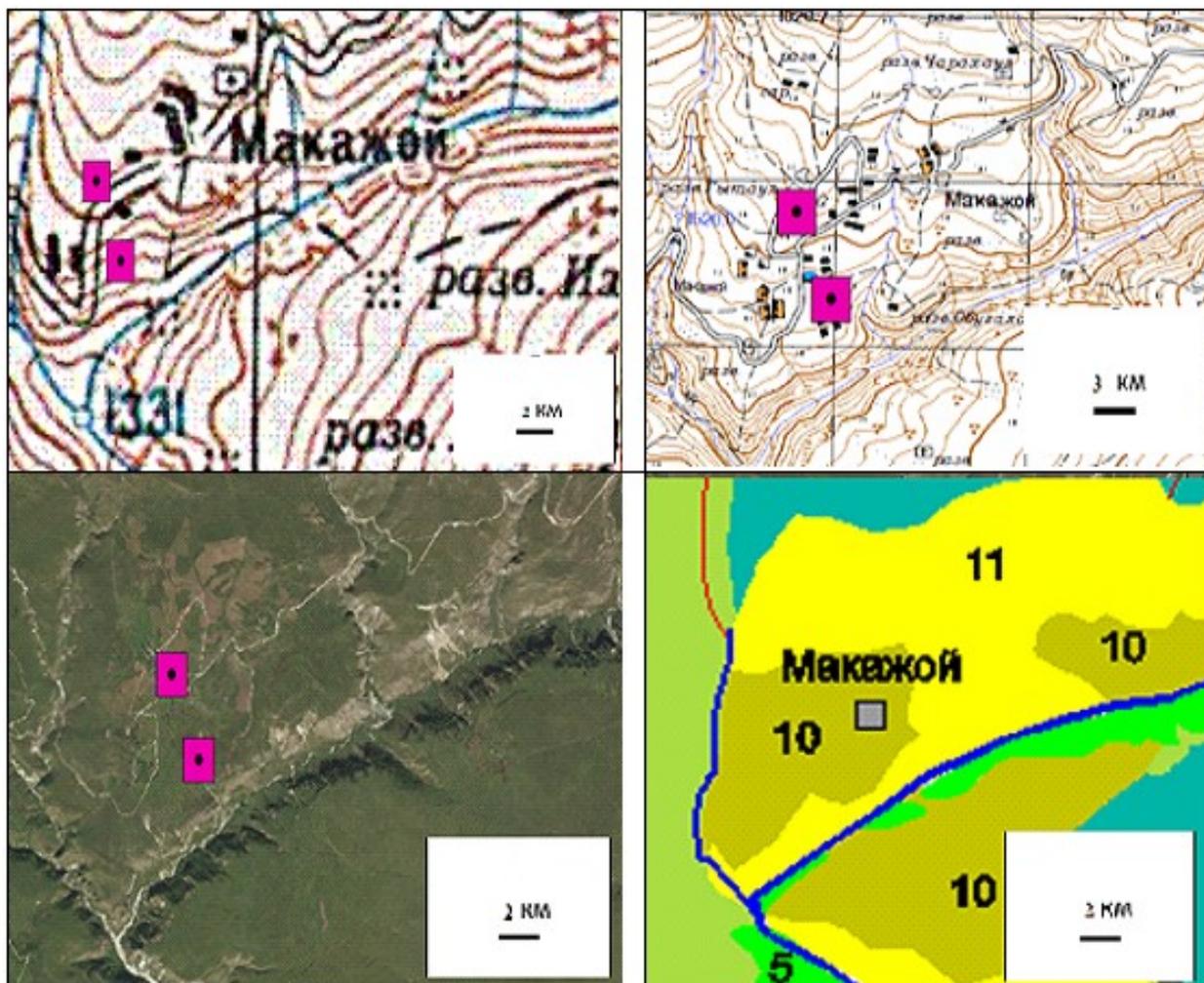


Рис. 1. Фрагменты слоев ГИС — оползни Чеченской Республики: топокарты разных масштабов (сверху), снимки разных лет (внизу слева — фрагмент снимка 2022 г. (использован сервис Google Earth)), фрагмент ландшафтной карты (внизу справа).

Цифрами на карте показаны ландшафты: 5 — горно-лесные, 10 — горно-луговостепные, 11 — горно-степные

Fig. 1. Fragments of GIS layers — landslides of the Chchen Republic: topographic maps of different scales (top), pictures of different years (bottom left — fragment of a 2022 image from Google Earth), fragment of a landscape map (bottom right).

The numbers on the map indicate landscapes: 5 — mountain-forest, 10 — mountain-meadow-steppe, 11 — mountain-steppe

Особенности современных подходов к картографированию оползней

Картографирование оползневых процессов различается в отраслевых и комплексных научных направлениях. Изучение оползневых явлений долгое время было прерогативой геологов и геоморфологов. В литературе распространено более 140 определений оползней, которые в большинстве своем опираются на геолого-геоморфологические классификационные признаки. За последние десятилетия опубликовано немало фундаментальных трудов, рассматривающих оползни как геологические тела и сложные склоновые процессы [Тихвинский и др., 1988; Петров, 2006]. Как правило, классическая карта оползня включала графические средства и знаки, которые показывали геологические и геоморфологические особенности оползня: стенка отрыва, напорный вал, границы и состав горных пород, грунтовые

воды и др. Большое внимание уделялось профилированию, чтобы показать углы наклона и перегибы, соотношение геологических пород в строении оползней. В редких случаях в качестве дополнительных обозначений использовались сведения о растительности.

Картографирование оползней с геоэкологических позиций смещает акцент на весь вмещающий ландшафт, а в основе картографирования лежат не сами оползневые тела, а т. н. ландшафтно-оползневые комплексы [Гуля и др., 2024]. Комплексное изучение оползневых явлений в рамках ландшафтной концепции учитывает иерархическую структуру природной дифференциации, которая подразумевает, что помимо изучения отдельных оползневых тел, необходимо изучение структуры природных комплексов от локального до региональных уровней ландшафтной дифференциации. На региональном уровне изучение оползней подразумевает учет высотно-зональной структуры ландшафтов. На локальном уровне картографирование имеет целью отражения именно ландшафтно-оползневых комплексов: помимо оползневого тела в картографирование входят элементы ландшафтной структуры и использования земель.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение оползней по разным формам рельефа

Горная часть Чеченской Республики характеризуется сложным рельефом, преобладанием осадочных пород разного возраста (от неоген-палеогеновых отложений в предгорье до меловых и юрских в предгорье и высокогорье), подверженных экзогенным процессам. Орографические особенности хребтов и состав слагающих их осадочных пород, в той или иной мере метаморфизованных, отражают последовательный переход от низкогорных хребтов (Лесистый, Пастбищный) к среднегорьям и среднегорным котловинам (Скалистый хребет) вплоть до высокогорий Бокового хребта.

Картина распределения оползней показывает их концентрацию в низкогорной и среднегорной зонах (рис. 2). Для изучения связи распространения оползней с морфометрическими особенностями рельефа, прежде всего, с абсолютной высотой, крутизной склонов, экспозиции склонов использовалось наложение слоя оползней на цифровую модель рельефа (Global Digital Surface Model “AW3D30 DSM data”¹ (30 м/px)).

Послойная, с упором на ту или иную характеристику рельефа, визуализация дает возможность с разных сторон подойти к анализу распространения оползней. Максимальная высота выявленных на территории Чеченской Республики оползней достигает 2 700–2 800 м на северных склонах Снегового хребта (на границе с Дагестаном). Как будет показано ниже, эти территории и ландшафты характеризуются сильной деградацией почвенно-растительного покрова в результате долговременного выпаса. Наименьшие абсолютные высоты (около 100 м), к которым приурочены оползни, характерны для склонов Гудермесского хребта. Здесь стимулирование оползней связано с ареалами нефтедобычи. Больше всего оползней приурочено к высотной ступени от 500 до 600 м (193 оползня). Второй максимум (146 оползней) тяготеет к высотам 1 700–1 800 м (рис. 3).

Выше 2 000 м количество оползней резко падает вследствие ухудшения условий для оползнеобразования: каменистые склоны и уменьшение мощности рыхлого чехла, снижение антропогенной деятельности и др. Уклон поверхности (рис. 4, 5) определяет потенциальную энергию рельефа и интенсивность протекания процессов экзогенной геодинамики, в т. ч. оползней различного типа. Уклоны также растут с севера на юг вместе с ростом абсолютной высоты.

¹ Электронный ресурс: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm> (дата обращения 19.10.2024)

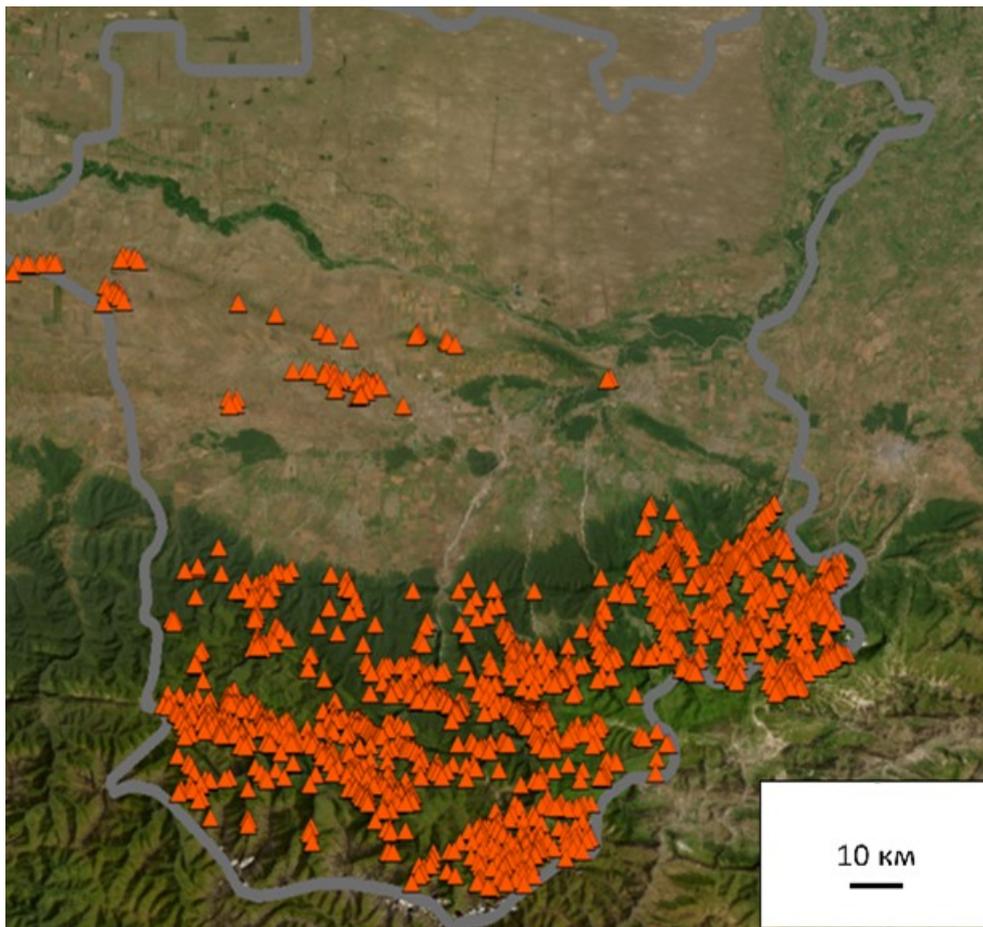


Рис. 2. Распределение оползней на территории Чеченской Республики
Fig. 2. Distribution of landslides on the territory of the Chechen Republic

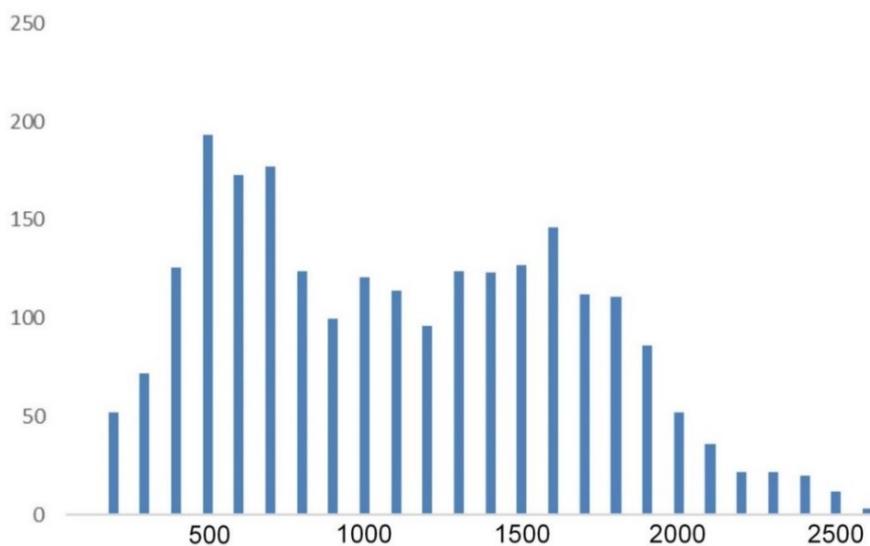


Рис. 3. Распределение количества оползней (ось y) по высотным интервалам через каждые 100 м. На оси x отложены абсолютные высоты
Fig. 3. Distribution of the number of landslides (y-axis) by altitude intervals every 100 m. Absolute heights are plotted on the x-axis

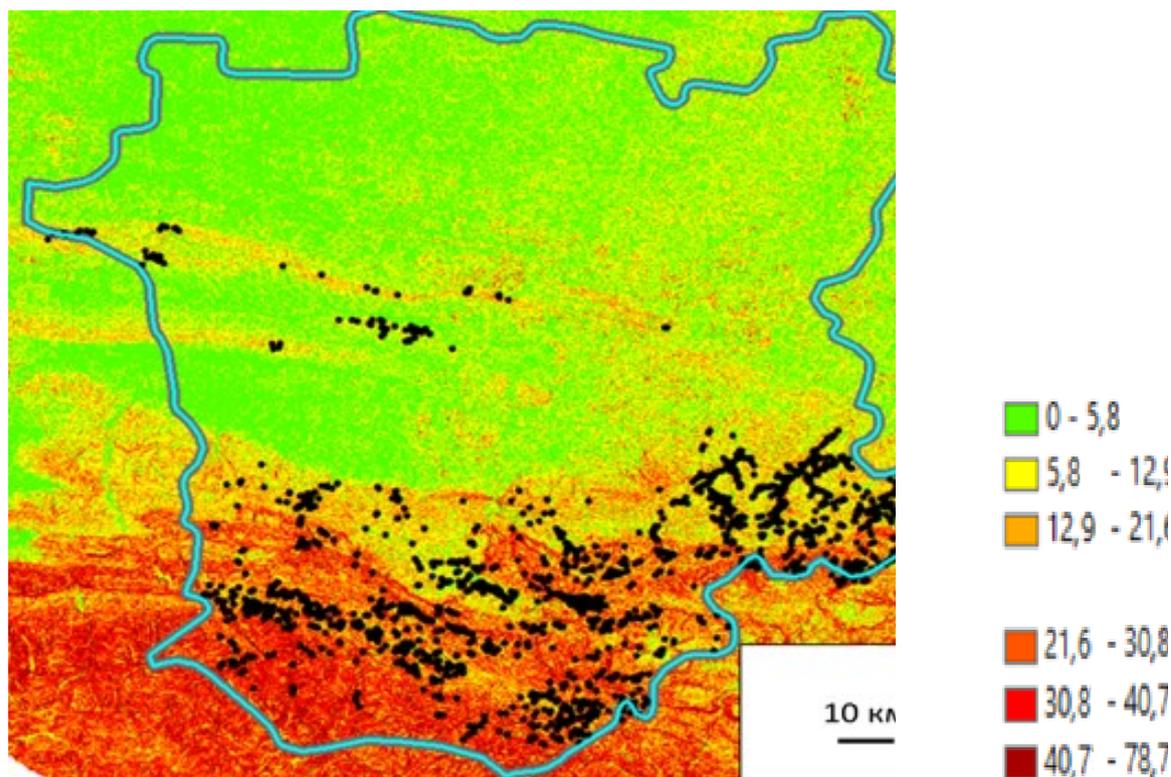


Рис. 4. Распределение оползней на склонах различной крутизны
Fig. 4. Distribution of landslides on slopes of varying steepness

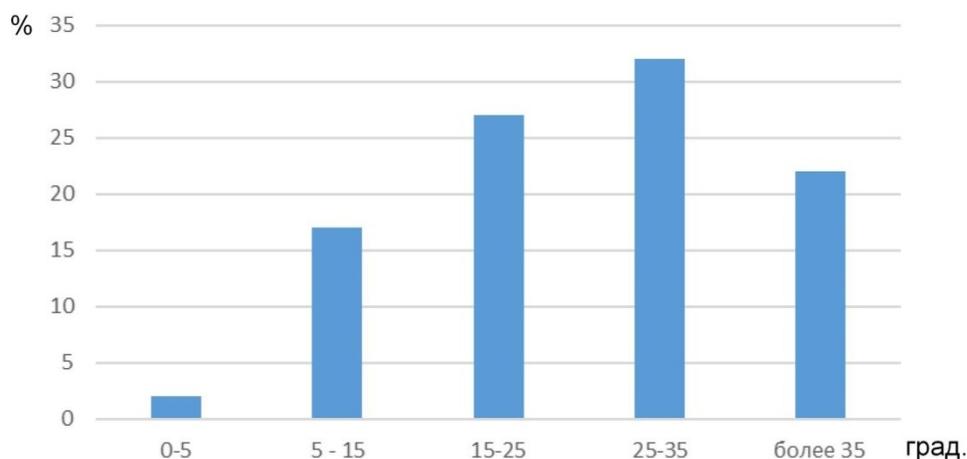


Рис. 5. Распределение оползней в зависимости от крутизны склонов
Fig. 5. Distribution of landslides depending on the steepness of the slopes

Наибольшее количество оползней приурочено к склонам крутизной 25–35°. Это подтверждают выводы А. И. Клименко [1972] и позднее расчеты Ш. Ш. Заурбекова и А. А. Батукаева [2013]. Количество оползней на крутых склонах (более 35°) снижается, но все-таки остается сравнительно большим.

Экспозиция — важнейший фактор ландшафтной дифференциации в горных регионах, определяющий разделение на «теплые» и «холодные» и (в условиях выраженного направления переноса воздушных масс) на увлажняемые и относительно сухие склоны.

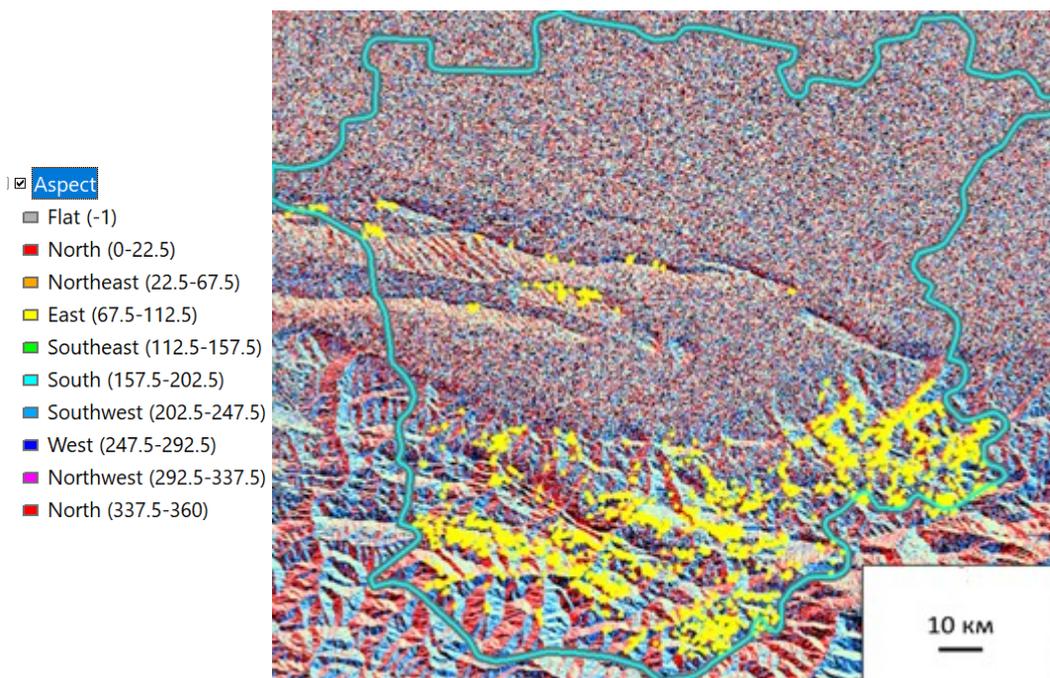


Рис. 6. Распределение оползней на склонах разных экспозиций (в градусах)
 Fig. 6. Distribution of landslides by slope aspect (in degrees)

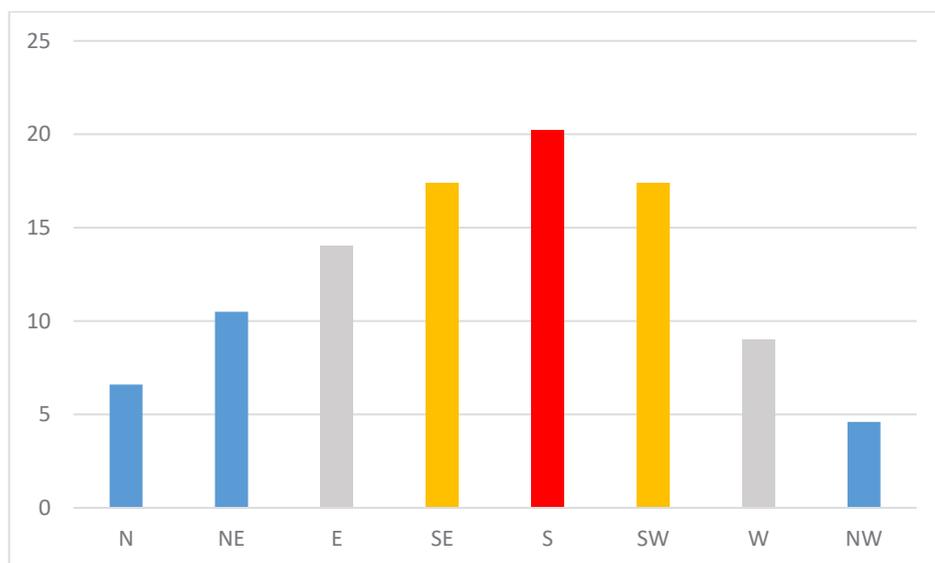


Рис. 7. Распределение числа оползней на склонах разных экспозиций. На оси y отложено количество оползней в % от общего количества. По оси x — экспозиции склонов

Fig. 7. Distribution of the number of landslides on slopes of different exposures. The y-axis shows the number of landslides as a percentage of the total. Along the x-axis — slope exposures

Соотношение площадей склонов северных и южных экспозиций примерно одинаковое за счет субширотных изгибов речных долин и простираения хребтов. Распределение оползней также примерно одинаковое, что говорит о слабом влиянии экспозиции склонов на процессы оползнеобразования; оползни почти одинаково образуются на склонах разных экспозиций, хотя имеются и некоторые отклонения. Как видно из рис. 6 и 7, наибольшее число оползней (55 %) приурочены к склонам теплых экспозиций (южной, юго-западной и юго-восточной),

хотя по площади в регионе преобладают склоны северной ориентации, относящиеся к северному макросклону хребтов Северного Кавказа. Все это подчеркивает сложную природу приуроченности оползней к склонам тех или иных экспозиций и разной крутизны. Выявленные закономерности могут быть объяснены следующими гипотезами:

- 1) склоны южных экспозиций являются менее залесенными, а значит менее устойчивы к оползнеобразованию;
- 2) склоны южных экспозиций являлись более освоенными, а значит здесь был изменен почвенно-растительный покров, что могло также привести к неустойчивости склонов к оползнеобразованию.

Сочетание высоты местности, уклона и экспозиции склонов дает в целом тот набор условий, которые присущи для оползнеобразования. Уклон, высота и экспозиция склонов — три переменные, комбинирование которых позволяет оценить характер сочетания факторов и оттенить роль каждого из них в оползнеобразовании. Экспозиционные различия не играют большой роли в приуроченности оползней к малым углам наклона (до 15°). Это в целом согласуется с известными геоэкологическими закономерностями: дифференцирующая роль экспозиции слабая для склонов малой крутизны. С увеличением крутизны увеличивается роль «теплых» экспозиций, на которых происходит большинство случаев оползнепроявления. Дифференциация распределения оползней по экспозиции наиболее заметна в высотных пределах 500–2 000 м. Здесь особенно заметна разница в интенсивности оползнепроявления на склонах южных (часто) и северных (сравнительно меньше) экспозиций. С увеличением абсолютной высоты (более 2 000 м н. у. м.) эта закономерность не проявляется.

Картографирование оползней на локальном уровне: Белгатойский оползень

Ареал низкогорно-лесостепных ландшафтов, затронутых оползнепроявлением, заслуживает особого внимания вследствие высокой плотности распространения оползней и широкомасштабных разрушений с выселением целых населенных пунктов. В литературе [Клименко и др., 1972] этот ареал известен как Бенойский инженерно-геологический оползневой район. Здесь горно-лесные ландшафты с широколиственными лесами местами преобразованы долговременной деятельностью человека в горно-лесостепные.

Оползни часто начинаются на платообразных участках и местных водоразделах, по которым проходят основные дороги и расположены кварталы селений. Участок Белгатой расположен на водоразделе рр. Аксай и Ашеин и приурочен к старым кварталам селения Белгатой, откуда большинство жителей были выселены на равнину в 1989 г. (там расположен одноименный населенный пункт Белгатой в Шалинском районе с населением более 5 тыс. чел.).

Оползни начинаются практически на водоразделе, где имеется множество мочажин. Белгатойский оползень начинается ниже старой мечети на высоте около 766 м и заканчивается на конусе выноса, наложенном на речную террасу, круто обрывающуюся к руслу реки (урез воды около 608 м н. у. м.) (рис. 8, 9). Протяженность оползня около 800 м. Собственно оползневые процессы активны в верхней части (выше 700 м), в зоне транзита оползневые процессы сочетаются с эрозионными, а в зоне разгрузки преобладает аккумуляция как оползневого, так и эрозионного материала. На южных безлесных участках в нижней части эрозионно-оползневого цирка распространены осыпи.

Оползнеобразованию способствует литологическое строение слагающих склоны пород: глины Сармата, Караган-Чокрака и Майкопа, а также связанные с ними четвертичные отложения со множеством водоносных горизонтов. Они вскрываются по мере углубления оползня, питая водоток в тальвеговой части эрозионно-оползневого цирка, который, проходя конус выноса в нижней части, врывается на глубину до 5 м (рис. 8).

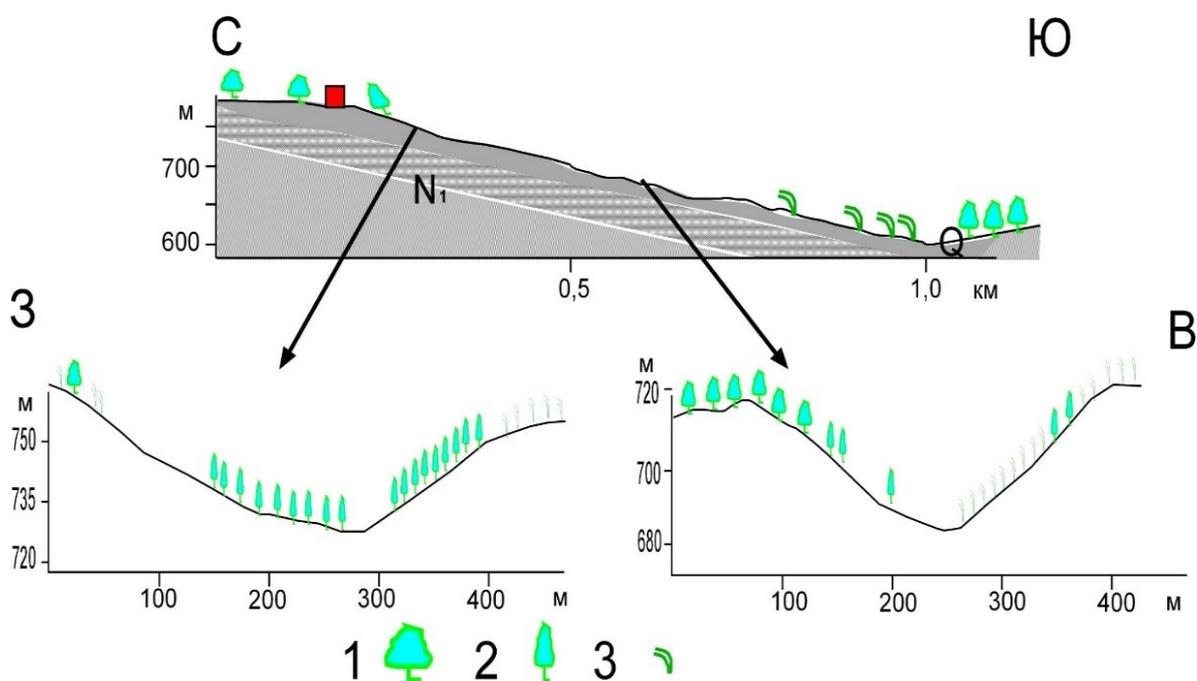


Рис. 8. Профиль через Белгатойский оползень. Вверху — продольный, внизу — поперечные (слева — в верхней части оползня, справа — в средней части оползня). Цифрами показаны: 1 — широколиственные леса из дуба с примесью груши, дикой алычи, мушмулы; 2 — мелколесье из акации, косточковых и др.; 3 — разнотравно-злаковые лугостепные сообщества

Fig. 8. Profile through the Belgatoy landslide. Above — longitudinal, below — transverse (on the left — in the upper part of the landslide, on the right — in the middle part of the landslide). The numbers show: 1 — broad-leaved forests of oak with an admixture of pear, wild cherry plum, medlar; 2 — small forests of acacia, stone fruits, etc.; 3 — forb-grass meadow-steppe communities

Оползень Белгатойского участка отличается своей встроенностью в высотнo-зональную и локальную структуру ландшафтов (рис. 10). Фоновыми ландшафтами, куда «вписывается» ареал оползнеобразования, являются низкогорно-широколиственные леса, находящиеся на экотоне с горно-лесолугостепными окультуренными ландшафтами [Гуля и др., 2023]. В результате долговременной хозяйственной деятельности от них остались лишь небольшие ареалы, представленные редко- и мелколесьями из дуба, акации, груши, алычи, боярышника (рис. 10, ландшафты 2–4). На выположенных террасовидных склонах развиты остатки культурных ландшафтов пашен и садов с плодово-ягодными и ореховыми насаждениями (1). Эрозионно-оползневой цирк затронул именно эти ландшафтные комплексы, которые ныне представлены незадернованными или полужадернованными крутыми склонами с пионерной травянистой растительностью (хвощ, мать-и-мачеха) и куртинами ивы, боярышника и др. (8). Склоны южной экспозиции безлесны. На пологих участках формируются луговые степи, используемые под пастбища (5). На крутых — эрозионно-осыпные незадернованные участки, на шлейфах занятые вейником и камышом (6, 7).



Рис. 9. Вторичный эрозионный врез в оползневую массу на конусе выноса. Белгатой, апрель 2022 г. (фото Р. А. Гакаева)
Fig. 9. Secondary erosion incision into the landslide mass on the alluvial fan. Belgatoy, April 2022 (photo by R. A. Gakaev)

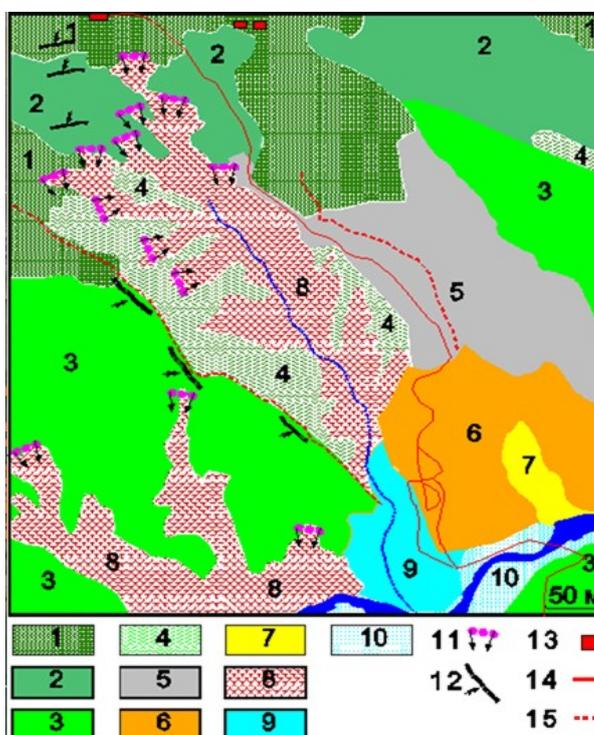


Рис. 10. Ландшафтно-оползневой комплекс Белгатойского участка
Fig. 10. Landscape-landslide complex of the Belgatoy site

Условные обозначения:

1 — террасированные склоны под бывшими огородами и садами с плодово-ягодными и ореховыми насаждениями; 2 — склоны, относительно пологие, с выходом грунтовых вод, под редко- и мелколесьем из дуба, акации, груши, алычи, боярышника; 3 — склоны, относительно крутые с мелколесьем из груши, мушмулы, боярышника; 4 — склоны, затронутые оползневыми процессами, под редколесными мелколесно-кустарниковыми сообществами из алычи, боярышника; 5 — склоны, относительно пологие, под лесолуговостепными сообществами, деградированные, под пастбищами; 6 — склоны, крутые, луговостепные, деградированные, под пастбищами; 7 — склоны, крутые, эрозионно-осыпные,

слабо задернованные; 8 — склоны эрозионно-оползневого цирка, ступенчатого и бугристого, с серией площадок оползневых террас, с выходом подземных вод, под пионерной (хвощ, мать-мачеха) травянистой растительностью и куртинами ивы; 9 — конус выноса эрозионно-оползневого цирка, наложенный на речную террасу, под луговыми степями, с пастбищным использованием; 10 — пойма р. Аксай под злаково-разнотравными лугами; 11 — стенка отрыва оползня; 12 — трещины отседания; 13 — кварталы домов и построек; 14 — дороги действующие; 15 — дороги заброшенные.

Динамика оползневого процесса, рассмотренного за последние 10 лет (2011–2021 гг.), показывает, что оползневые и эрозионно-оползневые процессы сохраняют свою активность. Это заметно, прежде всего, по остающимся незадернованными участкам в эрозионно-оползневом цирке (рис. 11).

В целом встроенность Белгатойского оползневого комплекса в ландшафтную структуру зависит от геоморфологических особенностей и условий увлажнения. Долговременная антропогенная деятельность существенно трансформировала как рельеф, так и условия увлажнения почв и грунтов. Строительство «тяжелых» домов и дорог в 1960-е гг., интенсификация сельского хозяйства привели к активизации оползневых явлений, апогеем которой стали катастрофические оползни 1989 г.

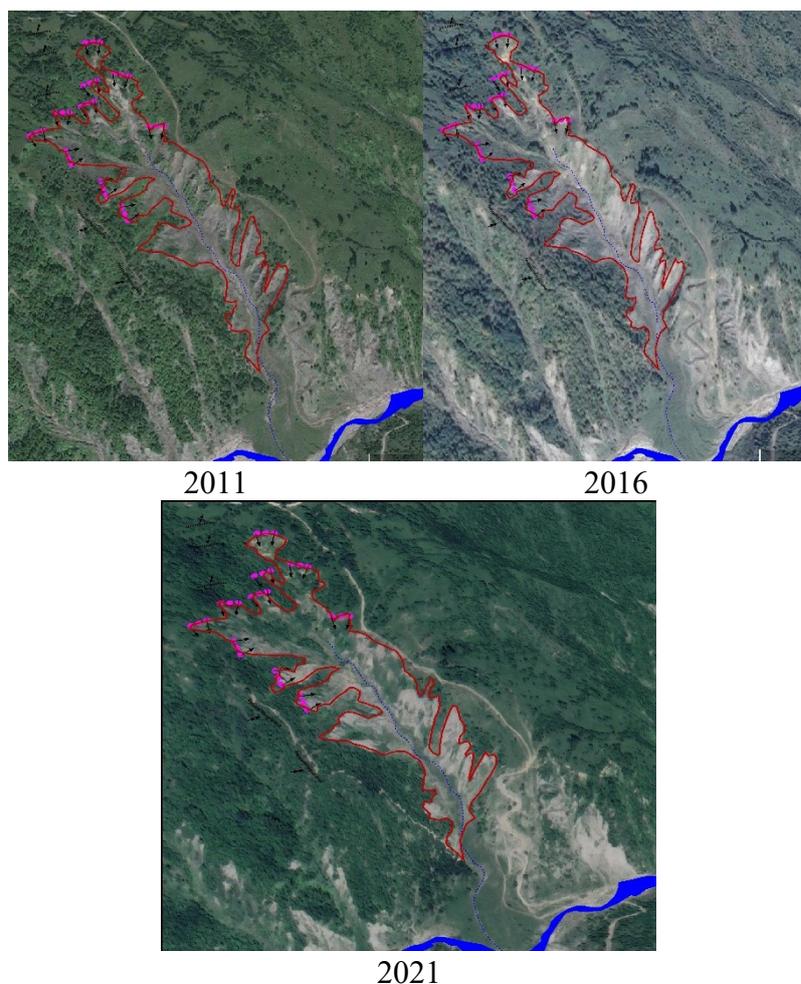


Рис. 11. Динамика оползнеобразования на Белгатойском участке (2011–2021 гг.).

Красная линия — границы оползня, синяя линия — река

Fig. 11. Dynamics of landslide formation in the Belgatoy area (2011–2021).

The boundaries of the landslide are shown in red, the river in blue

ВЫВОДЫ

Анализ распространения оползней в горной части Чеченской Республики показал, что максимальная высота выявленных оползней достигает 2 700–2 800 м на северных склонах Снегового хребта. Наименьшие абсолютные высоты (около 100 м), к которым приурочены оползни, наблюдаются на склонах Гудермесского хребта, что связано с нефтедобычей. Больше всего оползней (из обнаруженных 1 800) приурочено к высотному интервалу от 500 до 600 м (193 оползня). Второй максимум (146 оползней) тяготеет к высотам 1 700–1 800 м.

Наибольшее количество оползней приурочено к склонам крутизной 25–35°. Количество оползней на крутых склонах (более 35°) снижается, но все-таки остается сравнительно большим. Наибольшее число оползней (55 %) приурочены к склонам теплых экспозиций (южной, юго-западной и юго-восточной). Это связано со сведением лесов на склонах южных экспозиций и антропогенной деятельностью.

Крупномасштабное картографирование Белгатойского оползня позволило выделить основные элементы ландшафтной структуры, находящиеся в разной стадии сукцессии растительности и испытывающие различную антропогенную нагрузку. Важное значение для динамики Белгатойского ландшафтно-оползневого комплекса играет экотонное положение между двумя типами ландшафтов (горно-лесным и горно-лесолуговостепным). Динамика процессов оползнепроявления на данном участке во многом обусловлена фрагментацией лесных природных комплексов вследствие выборочного сведения лесов, конструирования напашных террас и серпантина дороги.

Ландшафтно-геоморфологическое крупномасштабное профилирование и картографирование конкретных оползневых ареалов и оползней с использованием GPS и ГИС-технологий (в первую очередь, наложение слоев геологии, четвертичных отложений, растительности на цифровую модель рельефа) является эффективным методом анализа механизмов оползнепроявления в конкретных природных и хозяйственных условиях. ГИС-моделирование позволяет установить ряд закономерностей распространения оползней. Однако полностью объяснить распространение оползней и их природу формальные инструменты морфометрического анализа не могут. Для этого нужны полевые данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гуля А. Н., Гакаев Р. А. Характер оползнепроявления в низкогорно-лесостепных ландшафтах Чеченской Республики. Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии. VII Мильковские чтения: Материалы XIV Международной ландшафтной конференции. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2023. Т. 1. С. 103–104. DOI: 10.17308/978-5-9273-3692-0-2023-103-104.

Гуля А. Н., Гакаев Р. А. Ландшафтный подход к изучению оползней (на примере горной территории Чеченской Республики). Проблемы региональной экологии, 2024. № 1. С. 64–73.

Заурбеков Ш. Ш., Батукаев А. А. Некоторые закономерности распределения оползневых объектов на территории Чеченской республики. Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки, 2013. № 2. С. 104–108.

Клименко А. И. Типы оползней Терско-Сунженской нефтегазоносной области. Труды производственного и научно-исследовательского института по инженерным изысканиям в строительстве. Т. XII. М., 1972.

Колбовский Е. Ю. Геоинформационное моделирование и картографирование ландшафтных местоположений. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2016. Т. 60. № 5. С. 20–24.

Петров Н. Ф. Прикладные проблемы таксономии оползней. Вестник Чувашского университета, 2006. № 2. С. 152–163.

Разумов В. В., Богданов М. И., Богданова Н. Д., Разумова Н. В. Масштабы распространения и активность проявления оползневых процессов в Чеченской Республике. ГеоРиск, 2019. Т. XIII. № 2. С. 34–51. DOI: 10.25296/1997-8669-2019-13-2-34-51.

Тихвинский И. О. Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов. М.: Наука, 1988. 144 с.

Alcántara-Ayala I., Geertsema M. Construction of disaster risk in mountain systems and its integrated management. In *montology palimpsest: a primer of mountain geographies*. Cham: Springer, 2023. P. 335–355.

Carla R., Walker L. R., Shiels A. B., Bussmann R., Claessens L., Fisch S., Lozano P., Negi G., Paolini L., Poveda G., Ramos-Scharron C., Richter M., Velazquez E. Landsliding and its multiscale influence on mountainscapes. *BioScience*, 2009. V. 59. Iss. 8. P. 685–698.

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.

Dai F., Lee Ch. F. Landslides on natural terrain. *Mountain research and development*, 2002. V. 22. Iss. 1. P. 40–47.

Davies A., Hooks G., Knox-Hayes J., Liévanos R. S. Risksapes and the socio-spatial challenges of climate change. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 2020. V. 13. Iss. 2. P. 197–213. DOI: 10.1093/cjres/rsaa016.

Jawad A., Nizami A., Hebinck P. Mismanagement of irrigation water and landslips in Yourjogh, Pakistan. *Mountain Research and Development*, 2017. V. 37. Iss. 2. P. 170–178.

Sarmiento F. O., Haller A., Marchant C., Yoshida M., Leigh D., Woosnam K., Porinchu D., Gandhi K. J. K., King E., Pistone M., Kavoori A., Calabria J., Alcántara-Ayala I., Chávez R., Gunya A., Yépez-Noboa A., Lee S., Reap J. 4D Global montology: towards convergent and transdisciplinary mountain sciences across time and space. *Pirineos*, 2023. V. 178. P. 75. DOI: 10.3989/pirineos.2023.178001.

REFERENCES

Alcántara-Ayala I., Geertsema M. Construction of disaster risk in mountain systems and its integrated management. In *montology palimpsest: a primer of mountain geographies*. Cham: Springer, 2023. P. 335–355.

Carla R., Walker L. R., Shiels A. B., Bussmann R., Claessens L., Fisch S., Lozano P., Negi G., Paolini L., Poveda G., Ramos-Scharron C., Richter M., Velazquez E. Landsliding and its multiscale influence on mountainscapes. *BioScience*, 2009. V. 59. Iss. 8. P. 685–698.

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.

Dai F., Lee Ch. F. Landslides on natural terrain. *Mountain research and development*, 2002. V. 22. Iss. 1. P. 40–47.

Davies A., Hooks G., Knox-Hayes J., Liévanos R. S. Risksapes and the socio-spatial challenges of climate change. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 2020. V. 13. Iss. 2. P. 197–213. DOI: 10.1093/cjres/rsaa016.

Gunya A. N., Gakaev R. A. The nature of landslide occurrence in low-mountain forest-steppe landscapes of the Chechen Republic. *Theoretical and applied problems of landscape geography*.

VII Milkov Readings: Proceedings of the XIV International landscape conference. In 2 volumes, Voronezh, May 17–21, 2023. Voronezh: Voronezh State University, 2023. V. 1. P. 103–104 (in Russian). DOI: 10.17308/978-5-9273-3692-0-2023-103-104.

Gunya A. N., Gakaev R. A. Landscape approach to the study of landslides (on the example of the mountainous territory of the Chechen Republic). *Regional Environmental Issues*, 2024. No. 1. P. 64–73 (in Russian).

Jawad A., Nizami A., Hebinck P. Mismanagement of irrigation water and landslips in Yourjogh, Pakistan. *Mountain Research and Development*, 2017. V. 37. Iss. 2. P. 170–178.

Klimenko A. I. Types of landslides in the Terek-Sunzhenskaya oil and gas region. Proceedings of the Industrial and Research Institute for Engineering Surveys in Construction. V. XII. Moscow, 1972 (in Russian).

Kolbovsky E. Yu. Geoinformation modeling and mapping of landscape locations. *Izvestia vuzov "Geodesy and aerophotosurveying"*, 2016. V. 60. No. 5. P. 20–24 (in Russian).

Petrov N. F. Applied problems of landslide taxonomy. *Bulletin of Chuvash University*, 2006. No. 2. P. 152–163 (in Russian).

Razumov V. V., Bogdanov M. I., Bogdanova N. D., Razumova N. V. The scale of distribution and activity of manifestation of landslide processes in the Chechen Republic. *GeoRisk*, 2019. V. XIII. No. 2. P. 34–51 (in Russian). DOI: 10.25296/1997-8669-2019-13-2-34-51.

Sarmiento F. O., Haller A., Marchant C., Yoshida M., Leigh D., Woosnam K., Porinchu D., Gandhi K. J. K., King E., Pistone M., Kavoori A., Calabria J., Alcántara-Ayala I., Chávez R., Gunya A., Yépez-Noboa A., Lee S., Reap J. 4D Global montology: towards convergent and transdisciplinary mountain sciences across time and space. *Pirineos*, 2023. V. 178. P. 75. DOI: 10.3989/pirineos.2023.178001.

Tikhvinsky I. O. Assessment and forecast of stability of landslide slopes. Moscow: Nauka, 1988. 144 p. (in Russian).

Zaurbekov Sh. Sh., Batukaev A. A. Some patterns of distribution of landslide objects on the territory of the Chechen Republic. *Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact Sciences*, 2013. No. 2. P. 104–108 (in Russian).

УДК: 528:004.78

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-257-269

И. Н. Ротанова¹, Е. Н. Важенин², С. Д. Маменов³, В. С. Юнаков⁴

ПОДХОДЫ К ФОРМИРОВАНИЮ РЕГИОНАЛЬНОГО ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО РЕСУРСА В АЛТАЙСКОМ КРАЕ

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена вопросам создания в Алтайском крае регионального геоинформационного ресурса, что отвечает требованиям политики цифровизации Российской Федерации. Создание такого ресурса является актуальным и перспективным практико-ориентированным направлением, отвечающим задаче геоцифровизации и геоинформационного обеспечения субъектов РФ. Цель исследования состоит в обосновании подходов и разработке концептуальных положений для создания регионального геоинформационного ресурса Алтайского края, которое опирается на анализ имеющегося опыта разработок в других субъектах РФ, а также на создание первичной геоинформационной базы данных для края в рамках специального локального контента: природно-ресурсного, аграрного, экологического. Основным методом исследования служит геоинформационно-картографический. Основные результаты заключаются в разработке концептуальной модели региональной ГИС, ее структуры и структуры базы данных. Определены приоритетные направления прототипа региональной ГИС, как для территории края в целом, так и для модельных административных районов: природно-ресурсная ГИС, аграрная ГИС, экологическая ГИС, перспективными также определены социально-экономическая региональная ГИС и международная природоохранная ГИС трансграничного Алтайского региона. Рассмотрен тематический контент разрабатываемых ГИС. Предложен формат региональной ГИС Алтайского края.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровизация, геоинформатика, геоцифровизация, геоинформационная система, региональный геоинформационный ресурс, региональная ГИС

¹ Алтайский государственный университет, Институт географии, пр. Ленина, д. 61, Барнаул, Россия, 656049,

e-mail: rotanova@mail.asu.ru

² Алтайский государственный университет, Институт географии, пр. Ленина, д. 61, Барнаул, Россия, 656049,

e-mail: vazhenin_e@mail.asu.ru

³ Алтайский государственный университет, Институт географии, пр. Ленина, д. 61, Барнаул, Россия, 656049,

e-mail: s.d.mamеноv@mail.ru

⁴ Институт водных и экологических проблем СО РАН, ул. Молодежная, д. 1, Барнаул, Россия, 656038,
e-mail: res.x.s@yandex.ru

Irina N. Rotanova¹, Evgeniy N. Vazhenin², Sergey D. Mamenov³, Vladimir S. Yunakov⁴

APPROACHES TO THE FORMATION OF A REGIONAL GEOINFORMATION RESOURCE IN THE ALTAI KRAI

ABSTRACT

The article is devoted to the creation of a regional geoinformation resource in the Altai Krai, which meets the requirements of the digitalization policy of the Russian Federation. The creation of such a resource is an urgent and promising practice-oriented direction that meets the task of geodigitalization and geoinformation support for the subjects of the Russian Federation. The purpose of the study is to substantiate approaches and develop conceptual provisions for the creation of a regional geoinformation resource of the Altai Krai, which is based on the analysis of existing development experience in other subjects of the Russian Federation, as well as on the creation of a primary geoinformation database for the region within the framework of special local content: natural resource, agricultural, environmental. The main research method is geoinformation and cartographic. The main results are the development of a conceptual model of regional GIS, its structure and database structure. The priority directions of the prototype of the regional GIS have been identified, both for the territory of the region as a whole and for model administrative districts: natural resource GIS, agricultural GIS, ecological GIS, socio-economic regional GIS and international environmental GIS of the transboundary Altai region are also identified as promising. The thematic content of the developed GIS is considered. The format of the regional GIS of the Altai Krai is proposed.

KEYWORDS: digitalization, geoinformatics, geocipherization, geoinformation system, regional geoinformation resource, regional GIS

ВВЕДЕНИЕ

Создание региональных геоинформационных ресурсов является необходимым и перспективным практико-ориентированным направлением геоцифровизации субъектов Российской Федерации. К сожалению, в настоящее время Алтайский край не обладает полноценным геоинформационным обеспечением. На данный момент выполняются минимально требуемые государственными органами управления работы в области цифровизации региона. Инициатива создания полноценного геоинформационного ресурса, в частности региональной ГИС (РГИС) Алтайского края исходит от представителей науки и вузов, работающих в области географии, картографии, создания геоинформационных систем и обработки данных дистанционного зондирования (ДЗЗ).

Функционирующий региональный геоинформационный ресурс в Алтайском крае позволил бы значительно продвинуться в информатизации сфер деятельности, связанных с рациональным использованием природно-ресурсного потенциала, в частности почвенного (земельного), водного и лесного, а также с мониторингом экологического состояния и развитием туристско-рекреационной деятельности. Кроме того, это могло бы сказаться на значительном прогрессе в информатизации аграрного сектора и социально-экономической сферы.

¹ Altai State University, Institute of Geography, 61, Lenina ave., Barnaul, 656049, Russia,
e-mail: rotanova@ mail.asu.ru

² Altai State University, Institute of Geography, 61, Lenina ave., Barnaul, 656049, Russia,
e-mail: vazhenin_e@ mail.asu.ru

³ Altai State University, Institute of Geography, 61, Lenina ave., Barnaul, 656049, Russia,
e-mail: s.d.mamenov@ mail.ru

⁴ Institute of Water and Environmental Problems, SB RAS, 1, Molodyozhnaya str., Barnaul, 656038, Russia,
e-mail: res.x.s@yandex.ru

Под региональным геоинформационным ресурсом понимается совокупность территориально и тематически локальных ГИС, основанных на принципах совместимости и взаимной дополняемости или открытости данных и представляющих собой продукт конечного пользователя¹ [Ворошин и др., 2006].

Создание регионального геоинформационного ресурса, которой может быть региональная ГИС — комплексная и трудозатратная задача. В первую очередь, для формирования ГИС требуются актуальные пространственные данные, определяемые инфраструктурой пространственных данных (ИПД) [Кошкарев, 2000]. Немаловажным аспектом является правильно выстроенная типовая структура будущей ГИС. В большинстве случаев основным «каркасом» региональной ГИС является геопортал. Большинство известных РГИС имеют именно такую концепцию создания [Кошкарев, 2001].

В современных условиях решение задач повышения эффективности регионального управления невозможно без использования достоверной пространственной информации; в связи с этим оптимальным решением для создания, доступа, обработки и хранения пространственных данных в сети Интернет является создание региональной ИПД [Кошкарев, Ротанова, 2013], которая служит стандартом для сбора, хранения и распространения пространственных данных, а также обеспечивает доступ к ним [Кошкарев, 2001]². Основным инструментом доступа к ИПД является геоинформационный портал (геопортал). Согласно определению, данному на главной странице Геопортала ИПД РФ: «Геопортал — это единая точка доступа к пространственной информации Российской Федерации. Геопортал обеспечивает поиск, просмотр, загрузку метаданных, а также скачивание и публикацию пространственных данных и веб-сервисов в соответствии с правами доступа и видом лицензии на использование материалов»³.

Региональные геоинформационные ресурсы субъектов Российской Федерации в настоящее время представлены в виде региональных ГИС-атласов, региональных информационных и геоинформационных систем, региональных геопорталов и ГИС-порталов, региональных интерактивных электронных карт и т. д.

Региональные геоинформационные ресурсы могут иметь различные форматы и модели данных, в частности, быть векторными, растровыми, гибридными.

Типы и виды региональных ГИС по тематике и содержанию также характеризуются значительным разнообразием:

- природно-ресурсные;
- сельскохозяйственные (аграрные);
- экономико-транспортные;
- социально-экономические;
- здравоохранения, образования и культуры;
- экологии и природопользования;
- коммунального хозяйства и строительства;

¹ ГОСТ Р 52155-2003. Национальный стандарт Российской Федерации. Географические информационные системы федеральные, региональные, муниципальные. Общие технические требования: принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 09.12.2003 N 359-ст). Электронный ресурс: <https://docs.cntd.ru/document/1200034761> (дата обращения 20.06.2024)

² Приказ Росреестра от 27 августа 2010 г. № 462 «Об организации работы по разработке и реализации мероприятий по созданию региональной модели ИПД». Электронный ресурс: <http://www.gisa.ru/66952.html>; <http://www.rosreestr.ru/document/legislation/1146422> (дата обращения 15.04.2022)

³ Эйсельт Б. INSPIRE. Первые результаты. Электронный ресурс: <http://www.gisa.ru/78871> (дата обращения 12.08.2024)

- территориального планирования и градостроительной деятельности;
- комплексные (интегральные) ГИС (объединяющие несколько видов) и др.

Каждая разновидность ГИС по тематике включает системно сформированный список компонентов, которые необходимы для полноценного раскрытия содержания ГИС. Так, например, ГИС кадастра природных ресурсов объединяет и включает информацию компонентов ГИС геологии, ГИС лесного хозяйства, ГИС водного хозяйства, а также рыбного хозяйства, заказников, охотничьего хозяйства и др.

Особое значение имеет геоцифровизация для трансграничного сотрудничества в Алтайском международном регионе, называемом Большой Алтай. Для Большого Алтая актуально создание, в первую очередь, геоинформационного ресурса природоохранного, а также экономико-ресурсного и туристско-рекреационного контента.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является формирование концептуальной модели регионального геоинформационного ресурса Алтайского края, в первую очередь его прототипа на примере модельных административных районов. Достижение цели опирается на решение ряда первоочередных задач, обосновывающих подходы к созданию регионального геоинформационного ресурса, в частности, региональной ГИС. Среди первоочередных задач:

- анализ имеющегося опыта создания региональных ГИС, их структуры, контента, функциональных и территориальных особенностей;
- выявление и анализ взаимосвязи региональных ГИС с ИПД и геопорталами;
- обоснование концептуальных положений и подходов к созданию региональной ГИС Алтайского края, формирование логической и информационной моделей ГИС и создание первичного базового геоинформационного ресурса для края в рамках прототипов на модельные административные районы.

В исследовании учитывается, что разрабатываемые и реализуемые региональные ГИС отражают характерные структурные особенности конкретной территории. Структура региональной ГИС определяется на начальном этапе разработки и представляет собой последовательно размещенные атрибутивные таблицы определенной тематики. Создаваемые геоинформационные карты могут быть структурированы по типу, тематике, масштабам и другим признакам.

Структура региональной ГИС может быть определена следующими факторами:

- размерами и географическими особенностями картографируемой территории;
- назначением — кругом лиц, основных пользователей ГИС и техническими условиями для работы с ГИС;
- содержанием — широтой и глубиной информации, заложенной при разработке ГИС, особенностями описания того или иного природного и социально-экономического явления.

Кроме того, при структурировании региональной ГИС выбирается оптимальная модель представления данных, которая должна отвечать следующим требованиям:

- наглядность представления информации;
- удобство поиска информации;
- возможность постоянного обновления ГИС;
- возможность использования информации и программных продуктов для различных целей.

При разработке ГИС также учитывается такой немаловажный момент, как легенды карт. Легенды могут быть следующих видов: элементарные, комбинированные, типологические комбинированные, комплексные и синтетические; все эти виды легенд также могут комбинироваться [Нольфина, 2013].

В ходе исследования рассмотрен наиболее классический вариант структурирования ГИС, состоящий из следующих блоков:

- базовый информационный модуль;
- земельные ресурсы, включая земли населенных пунктов;
- минерально-сырьевые ресурсы;
- водные ресурсы;
- лесные ресурсы;
- природные и историко-культурные рекреационные ресурсы [Светличная, 2012].

Данная структура ГИС может как значительно дополняться, так и исключать некоторые приведенные выше структурные блоки.

Анализ информации о российских региональных ГИС позволяет сделать вывод об отсутствии как единых подходов к созданию целостной базы геоинформационных данных, так и каких-либо закономерностей в их распределении на территории Российской Федерации. Наличие ГИС индивидуально и независимо для каждого региона.^{1,2,3,4,5}

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из возможных направлений разработки региональных ГИС субъектов РФ вытекают концепты возможных геоинформационных разработок региональной ГИС Алтайского края. В частности, это:

- аграрная региональная ГИС;
- природно-ресурсная региональная ГИС;
- экологическая региональная ГИС.

Каждая из ГИС может быть по-своему уникальна и выделена как основная согласно заданному контенту. Но также все эти три концепта могут быть объединены в одну, интегрированную ГИС, с возможностью представления регионального геопортала Алтайского края.

Кроме того, актуально создание еще двух ГИС: региональной социально-экономической и международной природоохранной трансграничного Алтайского региона — Большого Алтая.

Для обоснования предложенных концептов создания региональной ГИС Алтайского края стоит рассмотреть имеющийся опыт создания и проектирования ГИС различных авторских коллективов в Алтайском крае.

Одно из первых упоминаний о разработке геоинформационной системы Алтайского края приходится на 1998 г. в научной статье «О разработке экологической ГИС „Природные

¹ Концепция государственной информационной системы органов исполнительной власти Воронежской области (ГИС-ОИВ). Электронный ресурс: <https://base.garant.ru/18110393/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/> (дата обращения 20.04.2024)

² ГИС Гео. Электронный ресурс: <http://gisgeo.org> (дата обращения 10.04.2024)

³ Енисей-ГИС. Государственная геоинформационная система Красноярского края. Электронный ресурс: <https://24bpd.ru/content/> (дата обращения 10.05.2024)

⁴ ГИС Ростовской области. Электронный ресурс: <https://gisro.donland.ru> (дата обращения 25.05.2022)

⁵ Геопортал Республики Коми. Электронный ресурс: <http://gis.rkomi.ru/> (дата обращения 15.05.2022)

ресурсы Алтайского края» [Винокуров и др., 1998]. Данная ГИС разрабатывалась Институтом водных и экологических проблем (ИВЭП) СО РАН с 1994 г. как интегрированная информационная система для целей выработки и принятия управленческих решений в сфере природопользования и охраны окружающей среды на региональном уровне. Основной задачей разработчиков было создание ГИС, позволяющей собирать, хранить и предоставлять доступ к комплексным данным об основных природных ресурсах Алтайского края. Основные тематические блоки ГИС разделены исходя из типа природных ресурсов; так, ведущими являлись лесные ресурсы, водные ресурсы, атмосферный воздух и земельные ресурсы. Тематические цифровые карты в зависимости от назначения варьируются в масштабах от 1: 200 000 до 1: 1 000 000.

В 2018 г. была представлена разработка эколого-аграрного атласа Алтайского края в формате веб-ГИС, выполненная в Алтайском государственном университете, а в 2019 г. — Эколого-ландшафтная ГИС Алтайского края. На данном этапе разработаны концепция, программа и структура ГИС и реализован ее прототип. В частности, были созданы три тематические карты. «Карта эколого-природного потенциала ландшафтов Алтайского края» посвящена пространственному анализу эколого-природного потенциала (ЭПП), рассматривается потенциал природных компонентов рельефа, почв и растительности с учетом гидрологической составляющей. Для каждого природного компонента ЭПП определялся с помощью балльных шкал. Вторая карта показывает антропогенное воздействие и влияние природных процессов на ландшафты Алтайского края. Рассматривались факторы использования земель сельскохозяйственного и лесохозяйственного назначения. Также учитывалось воздействие на ландшафты: засоление, дефляция, водная эрозия, заболоченность, дороги, ЛЭП и селитьба. Третья карта отображает измененность ландшафтов [Ротанова и др., 2018; Ротанова, Гайда, 2019].

Важный вклад в опыт разработки региональной ГИС Алтайского края внес созданный геопортал¹. По поручению главного управления строительства, транспорта, жилищно-коммунального и дорожного хозяйства Алтайского края командой разработчиков «Лаборатория СОТО» была создана ГИС социально-экономической направленности «Геопортал Министерства строительства, транспорта и ЖКХ Алтайского края». По своей структуре геопортал представляет собой веб-сайт с интерактивной картой. В качестве картоосновы выступает карта сервиса Open Street Map, также имеется возможность переключиться на отображение с помощью спутниковых снимков Bing. Масштаб интерактивной карты динамический, и вся необходимая информация подстраивается исходя из выбранного пользователем масштаба. Наполнение карты представлено списком слоев с возможностью включения необходимых пользователю.

Данный геопортал является хорошим примером реализации предоставления качественной геоинформационной базы, как для работников Министерства ЖКХ, так и для обычных пользователей. Однако геопортал по неизвестным причинам уже достаточно долгое время не функционирует, что лишает заинтересованных пользователей получения необходимой информации.

Исходя из принятых подходов к созданию региональной ГИС Алтайского края, рассмотрим каждый из предложенных концептов наиболее подробно.

Аграрная региональная ГИС

Алтайский край обладает развитым аграрным комплексом. Создание ГИС на аграрную и сельскохозяйственную тематику является одной из ведущих перспектив

¹ Геопортал Министерства строительства, транспорта и ЖКХ Алтайского края. Электронный ресурс: <http://reg22.soto.ru> (дата обращения 20.10.2021)

геоинформационного обеспечения развития региона. В связи с комплексной направленностью сельского хозяйства, наилучшим вариантом представления пространственной информации является электронный ГИС-атлас или электронная карта. Концепт регионального ГИС-атласа Алтайского края включает базовые и тематические слои, а также возможности их комбинирования. Тематика слоев представляется на основе доступной пространственной информации в аграрной сфере, а именно:

- почвенно-земельные ресурсы;
- плодородие почв, эрозия и риски истощения;
- площадь сельскохозяйственных угодий;
- расположение и площадь аграрных хозяйств и др. (рис. 1).

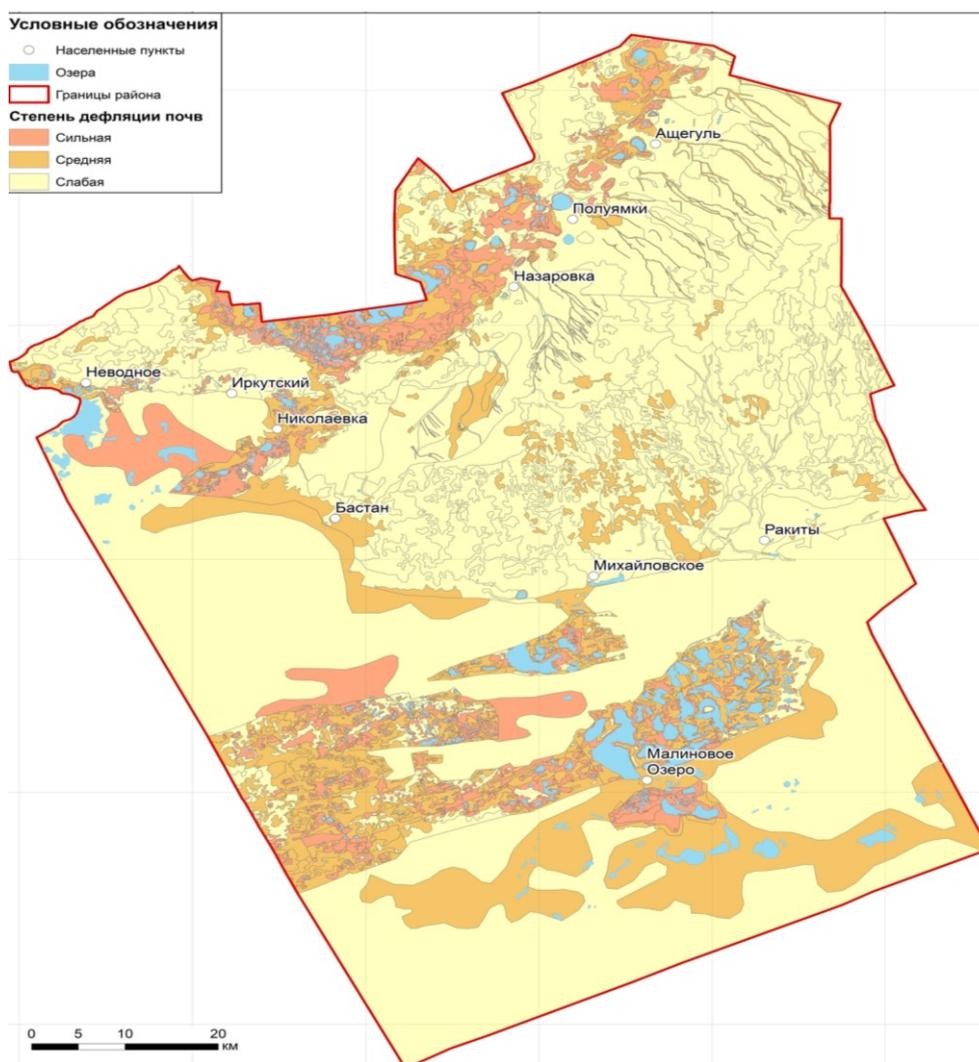


Рис. 1. Карта дефляции почв модельного Михайловского района Алтайского края
Fig. 1. Soil deflation map of the model Mikhailovskiy district of the Altai Krai

Представление слоев и карт разрабатывается в удобных для региона масштабах, а именно — 1: 500 000–1: 50 000. Предлагается также возможность свободного масштабирования для комфортного пользования ГИС-атласом. В качестве слоя-подложки есть возможность использовать как векторную основу, так и растровую, представленную в виде космических снимков территории.

Природно-ресурсная региональная ГИС

Данный концепт представляет полноценно функционирующую ГИС, в основе которой лежат данные о природных объектах и ресурсах Алтайского края. Основные информационные разделы базы данных предлагаются в виде следующих слоев:

- водные ресурсы;
- почвенные ресурсы;
- растительные ресурсы с дополнительным подразделом лесных ресурсов;
- минеральные ресурсы и полезные ископаемые;
- особо охраняемые природные территории;
- рекреационные ресурсы и уникальные природные достопримечательности.

Тематические слои согласуются с масштабами и возможностями ГИС аграрного концепта (рис. 2).

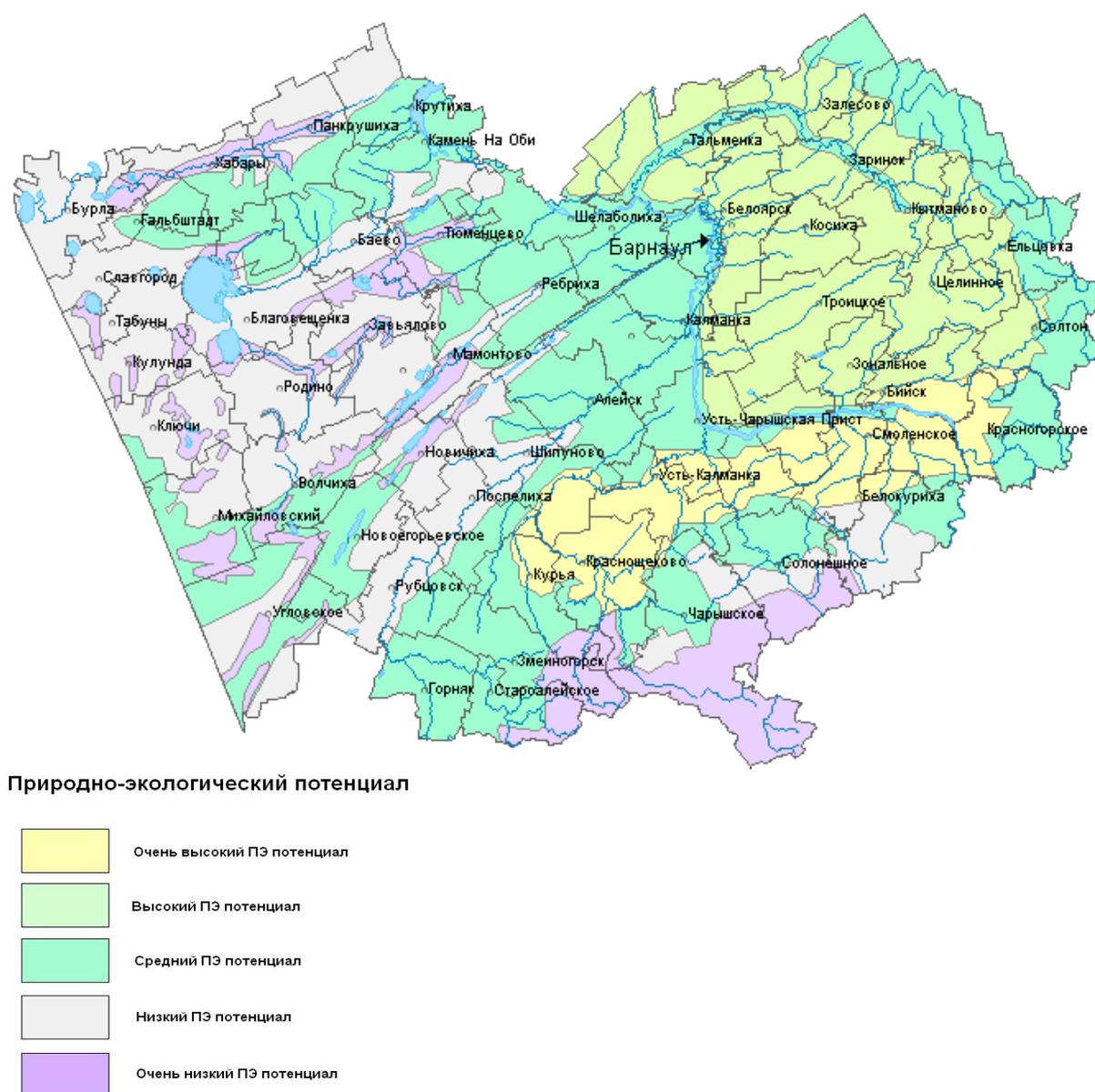


Рис. 2. Природно-экологический потенциал территории Алтайского края
Fig. 2. Natural and ecological potential of the Altai Krai

Экологическая региональная ГИС

Решение проблем экологии в Алтайском крае является не менее важной задачей, чем развитие аграрного комплекса. Своевременно указанные экологические проблемы и очаги критических состояний природы определяют фундамент для их последующего решения. Наиболее удобным для восприятия пространственной информации является электронная карта на основе ГИС.

Концепт экологической электронной ГИС-карты Алтайского края представляет собой набор тематических слоев, представленных в различном масштабном ряде. Каждый слой освещает одну из актуальных проблем экологии в крае, среди которых:

- загрязнение водных ресурсов и почв;
- зоны критического загрязнения атмосферы;
- измененность ландшафтов;
- расположение свалок и их ликвидация;
- экологическое зонирование края и др.

Актуализация данных позволит отследить пути решения прошлых проблем экологии, а также задать направления для решения новых. Данный концепт электронной ГИС-карты является одним из важнейших направлений развития геоинформационных систем в Алтайском крае, наряду с аграрным ГИС-атласом.

Интегрированная модель РГИС Алтайского края включает основные поставленные задачи, первоочередные реализуемые концепты и перспективные направления развития.

Из представленных концептов, наиболее перспективным на данный момент является аграрный ГИС-атлас Алтайского края. В связи с развитием сельского хозяйства наличие региональной ГИС позволит краю выйти на новый уровень геоцифрового обеспечения и экономического развития.

Социально-экономическая ГИС

Для создания социально-экономической ГИС определен набор показателей, необходимых для анализа территории. Так, для анализа условий естественной среды используется показатель природного потенциала естественных природных комплексов региона на основе использования ландшафтной карты Алтайского края в м-бе 1: 1 000 000. Легенда ландшафтной карты представлена в виде информационной базы, содержащей характеристики геолого-геоморфологических условий, растительности и почвенного покрова. В качестве оценочных показателей приняты социально-экономические индексы, используемые для анализа регионов на уровне субъектов Российской Федерации. Индексы отражают восемь групп социально-экономических показателей в пяти уровнях проявления, в баллах. Группы показателей включают, в т. ч.:

- объем внутреннего (регионального) продукта, млн руб. на 1 чел. в год;
- долю сырьевых отраслей в общем объеме промышленного производства субъекта, в %;
- собственные доходы субъектов РФ к среднему уровню доходов по стране, в %;
- собственные расходы субъектов РФ к среднему уровню расходов по стране, в %;
- средние денежные доходы населения по отношению к среднему уровню по стране, тыс. руб. на 1 чел. в год;
- коэффициент оценки здоровья населения по экологически обусловленным заболеваниям.

Также для создания карт применяется используемая в крае «Методика комплексной оценки уровня социально-экономического развития территории Алтайского края».

В качестве основных показателей для оценки использует ряд т. н. «первичных» и «расчетных» индикаторов, разделяемых на блоки: экономика и население. В каждом блоке по значениям показателей-индикаторов рассчитываются частные потенциалы, характеризующие:

- в блоке экономики — производственный, финансовый и инфраструктурный потенциалы;
- в блоке населения — демографический, социальный и трудовой потенциалы.

Источниками первичной информации для показателей-индикаторов являются сведения годовой статистической отчетности и материалы, полученные по запросу от муниципальных образований края. Субъектами исходной экономической информации являются административные районы Алтайского края. К основным учитываемым социально-экономическим показателям относятся:

- объем промышленной продукции в целом и по основным отраслям;
- инвестиции;
- капитальные вложения в строительство по объектам производственного и непроизводственного назначения;
- транспортные услуги: объем перевозок, грузооборот транспорта, пассажирооборот;
- объем сельскохозяйственной продукции;
- объем товарооборота;
- объем платных услуг;
- наличие сельскохозяйственных угодий;
- объем промышленных выбросов;
- среднемесячная заработная плата;
- онкологическая заболеваемость;
- болезни органов дыхания;
- заболевания крови;
- младенческая смертность;
- средняя продолжительность жизни [Владыкина, Ротанова, 2002, 2003].

Международная природоохранная ГИС трансграничного Алтайского региона — Большого Алтая

Имеющийся опыт и ресурсы создают возможности разработки ГИС-проекта для обеспечения природоохранной деятельности в трансграничном Алтайском регионе. Концептуально ГИС представляет собой геоинформационную модель природоохранного каркаса Большого Алтая. Природоохранный каркас, в первую очередь, представлен сетью охраняемых (особо охраняемых) природных территорий (ОПТ или ООПТ) [Ротанова и др., 2022]. База данных ООПТ и других элементов каркаса включает систематизированную информацию о природных особенностях, характерных и редких (уникальных) ландшафтах каждой природоохранной территории, охраняемых видах флоры и фауны, функциональном зонировании, антропогенном воздействии и др. ГИС позволяет не только создавать различные карты природоохранного и экологического содержания, но и будет выполнять функции картографического моделирования для совершенствования сети ООПТ, развития экологического каркаса, определения наиболее перспективных направлений экологически устойчивого социально-экономического развития трансграничного Алтайского региона.

ВЫВОДЫ

Создание регионального геоинформационного ресурса в настоящее время является одним из перспективных направлений в сфере геоинформатики, востребованных с позиции геоцифровизации экономики и решения вопросов экологической безопасности. Региональная ГИС способна дать комплексную оценку всех особенностей региона, показать перспективы развития. Созданные в виде геопорталов или электронных атласов (электронных карт) региональные ГИС направлены на раскрытие потенциала имеющихся информационных пространственных данных, что основано на их структуризации и представлении в удобном пользователю виде. Тематический контент региональной ГИС отражает потенциальную направленность развития региона, такую как аграрный комплекс, туристско-рекреационная сфера или эколого-экономико-социальный императив.

Дальнейшие работы включают создание физического прототипа региональной ГИС Алтайского края, как для территории края в целом, так и для модельных административных районов. Для них разрабатывается первичная база физико-географических данных в виде ГИС, включающей комплексные физико-географические слои цифровых моделей рельефа, водосборных бассейнов и ландшафтов, а также почвенно-земельных ресурсов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FZMW-2023-0015.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FZMW-2023-0015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Винокуров Ю. И., Широкова С. Л., Ловцкая О. В., Воробьев К. В., Яковченко С. Г. О разработке экологической ГИС «Природные ресурсы Алтайского края». Вычислительные технологии, 1998. № 3(5). С. 23–27.

Владыкина А. В., Ротанова И. Н. Эколого-экономическое картографирование с использованием ГИС-технологий. Интеркарто-8: ГИС для устойчивого развития территорий. Санкт-Петербург, 2002. С. 326–328.

Владыкина А. В., Ротанова И. Н. Подходы к картографированию эколого-экономической характеристики Алтайского края. Вестник Томского государственного университета. № 3(V). Приложение. Апрель, 2003. Материалы научной конференции «Проблемы геологии и географии Сибири» (2–4 апреля 2003 г.). Томск: Издательство ТГУ, 2003. С. 52–54.

Ворошин С. В., Зинкевич А. С., Тюкова Е. Э. Региональные геоинформационные системы для геологических исследований: опыт создания и анализа. Тихоокеанская геология, 2006. Т. 25. № 5. С. 22–38.

Кошкарёв А. В. Инфраструктуры пространственных данных. ГИС-Обозрение, 2000. № 3-4. С. 5–10.

Кошкарёв А. В. Инфраструктуры пространственных данных. ГИС-Обозрение, 2001. № 1. С. 28–32.

Кошкарёв А. В. Инфраструктуры пространственных данных и ближайшие задачи картографии. II Всероссийская научная конференция по картографии, посвященная памяти

А. А. Лютого «Картография XXI века: теория, методы, практика»: доклады. М.: Институт географии РАН, 2001. С. 137–144.

Кошкарёв А. В. Инфраструктура пространственных данных: современное состояние и проблемы. Российский и зарубежный опыт. Охрана окружающей среды и природопользование, 2011. № 3. С. 37–47.

Кошкарёв А. В. Нормативная база и стандарты Европейской программы INSPIRE как основа ИПД Российской Федерации. Материалы I Всероссийской конференции с международным участием «Геоинформационные системы в здравоохранении Российской Федерации: данные, аналитика, решения». СПб., 2013. С. 123–130.

Кошкарёв А. В., Ротанова И. Н. Проблемы российских региональных ИПД. Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Геоинформационное картографирование в регионах России» (Воронеж, 19–22 сентября 2013 г.). Воронеж: Цифровая полиграфия, 2013. С. 77–90.

Нольфина М. А. Основные принципы проектирования регионального ГИС-атласа. Интерэкспо Гео-Сибирь: материалы, сборник. Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. Ч. 2. С. 170–173.

Ротанова И. Н., Гайда В. В. Эколого-ландшафтная ГИС Алтайского края. Материалы XIV Международной научно-практической конференции «Аграрная наука — сельскому хозяйству» (7–8 февраля 2019 г.). Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2019. Книга 2. С. 396–398.

Ротанова И. Н., Гайда В. В., Долгачева Л. Е. Аграрному региону необходим региональный эколого-аграрный атлас с веб-ГИС. Материалы XIII Международной научно-практической конференции «Аграрная наука — сельскому хозяйству» (15–16 февраля 2018 г.). Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2018. Книга 2. С. 95–96.

Светличная Д. А. Концепция региональной геоинформационной системы оценки и управления природно-ресурсным потенциалом региона. Региональная экономика, 2012. № 11. С. 111–115.

REFERENCES

Koshkarev A. V. Spatial data infrastructures. GIS-Review, 2000. No. 3-4. P. 5–10 (in Russian).

Koshkarev A. V. Spatial data infrastructures. GIS-Review, 2001. No. 1. P. 28–32 (in Russian).

Koshkarev A. V. Spatial data infrastructures and the immediate tasks of cartography. II All-Russian Scientific Conference on Cartography dedicated to the memory of A. A. Lyuty “Cartography of the XXI century: theory, methods, practice”: reports. Moscow: Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, 2001. P. 137–144 (in Russian).

Koshkarev A. V. Spatial data infrastructure: current state and problems. Russian and foreign experience. Environmental Protection and Nature Management, 2011. No. 3. P. 37–47 (in Russian).

Koshkarev A. V. Regulatory framework and standards of the European INSPIRE Program as the basis of the IPD of the Russian Federation. Proceedings of the I All-Russian Conference with International Participation “Geoinformation systems in healthcare of the Russian Federation: data, analytics, solutions”. St. Petersburg, 2013. P. 123–130 (in Russian).

Koshkarev A. V., Rotanova I. N. Problems of Russian regional IPD. Proceedings of the V All-Russian Scientific and Practical Conference “Geoinformation mapping in the regions of Russia” (Voronezh, September 19–22, 2013). Voronezh: Digital Polygraphy, 2013. P. 77–90 (in Russian).

Nolfina M. A. Basic principles of designing a regional GIS atlas. Interexpo Geo-Siberia: proceedings, collection. Novosibirsk: SGGA, 2013. V. 1. Part 2. P. 170–173 (in Russian).

Rotanova I. N., Gaida V. V. Ecological and landscape GIS of the Altai Krai. Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference “Agrarian science — agriculture” (February 7–8, 2019). Barnaul: Altai State Agrarian University, 2019. Book 2. P. 396–398 (in Russian).

Rotanova I. N., Gaida V. V., Dolgacheva L. E. The agrarian region needs a regional ecological and agricultural atlas with web GIS. Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference “Agrarian science — agriculture” (February 15–16, 2018). Barnaul: Altai State Agrarian University, 2018. Book 2. P. 95–96 (in Russian).

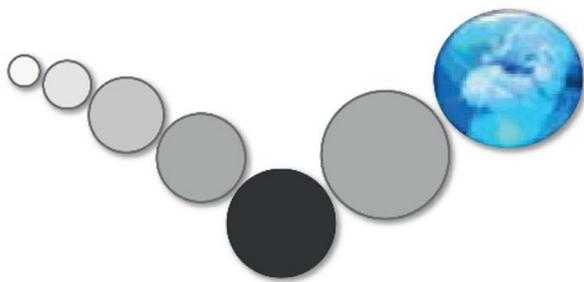
Svetlichnaya D. A. The concept of a regional geoinformation system for assessing and managing the natural resource potential of the region. Regional Economics, 2012. No. 11. P. 111–115 (in Russian).

Vinokurov Yu. I., Shirokova S. L., Lovtskaya O. V., Vorobyov K. V., Yakovchenko S. G. On the development of ecological GIS “Natural resources of the Altai Krai”. Computational Technologies, 1998. No. 3(5). P. 23–27 (in Russian).

Vladykina A. V., Rotanova I. N. Ecological and economic mapping using GIS technologies. Intercarto-8: GIS for sustainable development of territories. St. Petersburg, 2002. P. 326–328 (in Russian).

Vladykina A. V., Rotanova I. N. Approaches to mapping the ecological and economic characteristics of the Altai Krai. Bulletin of Tomsk State University. No. 3(V). Appendix. April, 2003. Proceedings of the Scientific Conference “Problems of geology and geography of Siberia” (April 2–4, 2003). Tomsk, Publishing House of TSU, 2003. P. 52–54 (in Russian).

Voroshin S. V., Zinkevich A. S., Tyukova E. E. Regional geoinformation systems for geological research: the experience of creation and analysis. Russian Journal of Pacific Geology, 2006. V. 25. No. 5. P. 22–38 (in Russian).



Новые методы и подходы в геоинформационном моделировании и анализе данных

New methods and approaches in geoinformation modeling and data analysis

УДК: 528.92

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-270-279

Л. А. Обухов¹, Е. А. Паниди², Д. П. Бляхарский³

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ СОЗДАНИЯ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ АНИМАЦИЙ

АННОТАЦИЯ

Моделирование и отображение динамики объектов и явлений в географическом пространстве является одной из задач в картографии. В настоящее время, благодаря активной цифровизации общества и научно-техническому прогрессу, появилось множество различных средств, технологий и возможностей для создания картографических произведений, отображающих динамику процессов, происходящих на картографируемой территории. На основе подобных технологий выделяется одно из сравнительно новых направлений картографии — мультимедиа картография и, в частности, анимационная картография, рассматривающая общие характеристики, понятия, принципы, технологические схемы создания, оформления и отображения анимированных карт. В настоящий момент большинство картографических произведений с анимацией требует использования разнообразного специализированного программного обеспечения (ПО): географических информационных систем (ГИС), векторных и растровых редакторов, ПО для монтажа видеозаписей и других. Актуальным является исследование функциональных возможностей популярных настольных ГИС-приложений на предмет внедрения полного цикла создания анимированного картографического произведения, без параллельного и последующего применения дополнительного ПО. В рамках исследования был решен ряд задач, включая выполнение обобщения теоретико-методологических основ и выявление основных типов картографических анимаций, выполнение анализа существующих методов создания картографических анимаций объектов, выполнение анализа функциональных возможностей настольного ГИС-приложения QGIS, обеспечивающих создание картографических анимаций объектов. В результате исследования разработаны методы и реализующие их алгоритмы для создания картографических анимаций объектов в среде QGIS, подготовлены описания разработанных алгоритмов на языке UML, а также проанализировано и определено место разработанных методов в системе знаний картографии и геоинформатики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: картография, мультимедиа, динамические карты, географические информационные системы (ГИС), геоинформационное картографирование

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра картографии и геоинформатики, 10 линия ВО, д. 33, Санкт-Петербург, Россия, 199178, *e-mail*: st068972@student.spbu.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра картографии и геоинформатики, 10 линия ВО, д. 33, Санкт-Петербург, Россия, 199178, *e-mail*: panidi@ya.ru, e.panidi@spbu.ru

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра картографии и геоинформатики, 10 линия ВО, д. 33, Санкт-Петербург, Россия, 199178, *e-mail*: d.blyakharskiy@spbu.ru

IMPROVING THE METHODS OF CREATING CARTOGRAPHIC ANIMATIONS

ABSTRACT

Modeling and presentation of objects' and phenomena dynamics in geographic space is one of the tasks in cartography. Currently, due to the active society digitalization and scientific and technological progress, many different tools, technologies and opportunities have appeared that can be used for creating maps that would reflect dynamics of processes occurred in the mapped territory. Multimedia cartography and, in particular, animation cartography is relatively new direction in cartography developed based on such new technologies. The animation cartography considers general characteristics, concepts, principles, technological schemes for creating, designing and presenting animated maps. Currently, most of the animated maps require using a variety of specialized software, like geographic information systems (GIS), vector and raster graphic editors, video effects editing software, etc. Consequently, it is important to study functionality of the popular desktop GIS applications in view of the implementation of a full cycle of animated maps preparation, without parallel or subsequent use of any additional software. Within the framework of our study, we have solved a number of tasks, including generalizing the theoretical and methodological foundations and identifying the main types of cartographic animations; analyzing existing methods for cartographic animating of objects; analyzing the functionality of the QGIS application ensuring creation of cartographic animations of objects. As a result of the study, methods and their algorithm implementations have been developed to create cartographic animations of objects in the QGIS environment; descriptions of the developed algorithms in UML (Unified Modeling Language) have been prepared; and the role of the developed methods in the knowledge system of cartography and geoinformatics has been analyzed and determined.

KEYWORDS: cartography, multimedia, dynamic maps, geographic information systems (GIS), GIS-based mapping

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование и отображение динамики объектов и явлений в географическом пространстве является одной из задач в картографии. В настоящее время, благодаря активной цифровизации общества и научно-техническому прогрессу, появилось множество различных средств, технологий и возможностей для создания картографических произведений, отображающих динамику процессов, происходящих на картографируемой территории. На основе подобных технологий выделяется одно из сравнительно новых направлений картографии — мультимедиа картография [Cartwright et al., 2007], и как ее раздел — анимационная картография [Лисицкий и др., 2014а], рассматривающая общие характеристики, понятия, принципы, технологические схемы создания, оформления и отображения анимированных карт.

¹ Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, 33, 10th line VO, St. Petersburg, 199178, Russia, *e-mail*: st068972@student.spbu.ru

² Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, 33, 10th line VO, St. Petersburg, 199178, Russia, *e-mail*: panidi@ya.ru, e.panidi@spbu.ru

³ Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, 33, 10th line VO, St. Petersburg, 199178, Russia, *e-mail*: d.blyakharskiy@spbu.ru

К настоящему времени сформированы базовые представления о теоретической и методологической составляющих анимационной картографии, а также общие схемы составления анимированных карт, однако непроработанность технологической составляющей данного направления, ввиду обилия современных средств, которые могут быть использованы при составлении анимированных картографических произведений, делают направление актуальным для исследования, с целью рассмотрения и совершенствования различных методов создания анимаций.

В настоящий момент большинство картографических произведений с анимацией требует использования разнообразного специализированного программного обеспечения (ПО): географических информационных систем (ГИС), векторных и растровых редакторов, ПО для монтажа видеоэффектов и других. Актуальным является исследование функциональных возможностей популярных настольных ГИС-приложений на предмет внедрения полного цикла создания анимированного картографического произведения, без параллельного и последующего применения дополнительного ПО.

Настоящее исследование посвящено обобщению и дополнению теоретико-методологических основ анимационной картографии, а также анализу существующих методов создания картографических анимаций объектов. В рамках исследования выполнен анализ функциональных возможностей настольной ГИС QGIS, которые могут быть использованы для создания картографических анимаций объектов. В составе результатов исследования предложен ряд методов и реализующие их алгоритмы для создания картографических анимаций объектов с использованием QGIS, которые частично освещены в настоящей статье.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках анализа существующих методов и классификаций картографических анимаций объектов были выделены конкретные виды анимаций с разделением их на основе анализа функциональных возможностей QGIS. Определено, для каких видов анимаций пользователю достаточно имеющихся основных функций ГИС, а для каких необходимо создавать дополнительные пользовательские функции.

К первой группе анимаций, которые возможно создать, используя базовые возможности QGIS, относятся:

1. Масштабирование объекта.
2. Изменение положения объекта на основе базы данных состояний пространственных объектов.
3. Отображение динамических подписей.
4. Изменение цвета и прозрачности объектов.

Ко второй группе анимаций, для создания которых необходимо создавать дополнительные пользовательские алгоритмы на языке программирования Python, относятся:

5. Изменение положения объекта на основе данных о траектории его движения.
6. Изменение положения объекта на основе моделирующей функции, используемой для описания траектории движения.
7. Изменение геометрии объекта на основе базы данных состояний пространственных объектов.
8. Изменение геометрии объекта на основе данных, генерируемых с использованием моделирующей функции.

В рамках настоящего исследования разработаны примеры алгоритмов для создания данных видов анимаций в ГИС. Для каждого были созданы описания на языке UML (Unified Modeling Language — унифицированный язык моделирования) в виде диаграмм классов (рис. 1).

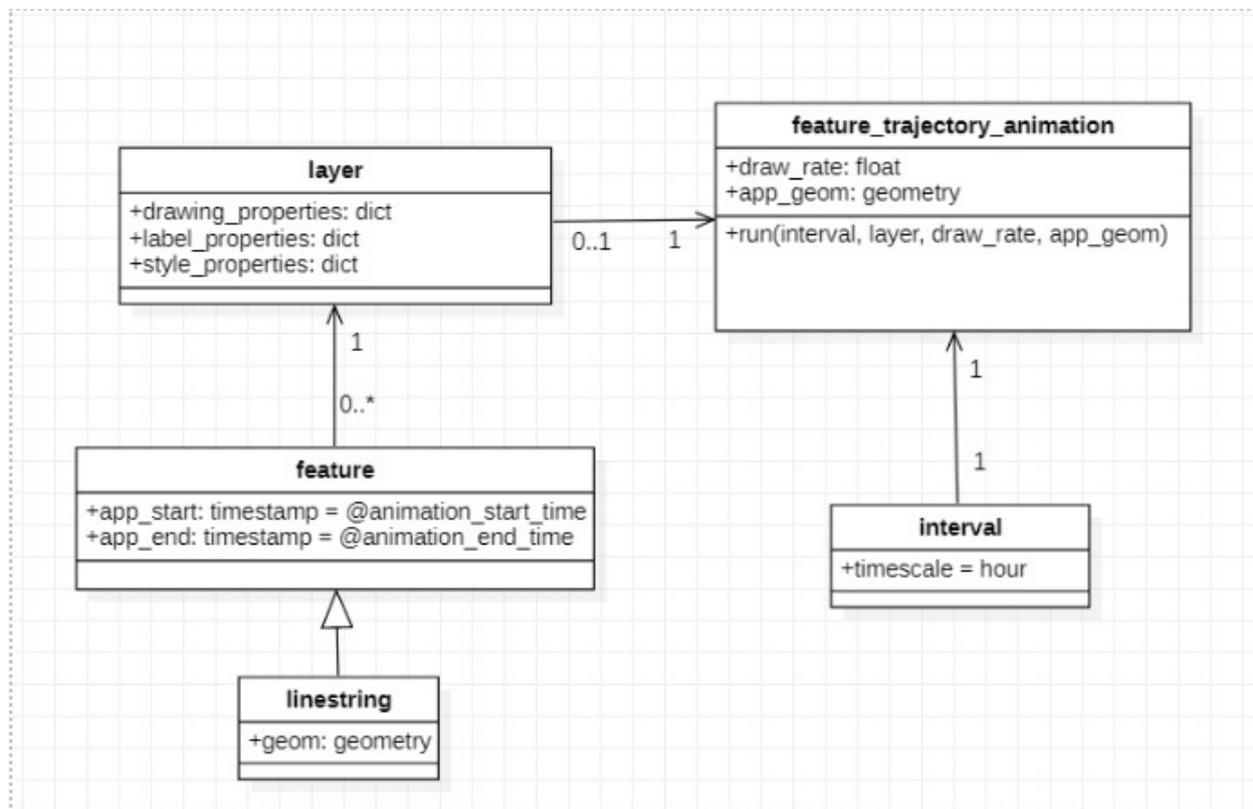


Рис. 1. Диаграмма классов для алгоритма создания анимации движения по траектории
Fig. 1. Class diagram for the algorithm of the along-trajectory motion animation

Диаграмма классов UML представляет собой набор, собственно, классов, которые отображаются в виде ячеек диаграммы. Класс может содержать набор атрибутов определенного типа, набор методов класса, требующих необходимое количество параметров для выполнения. Между классами могут существовать связи различных типов. Связь, аналогичная связи в реляционной алгебре, типов «один к одному» и «многие к одному» («один ко многим»). В UML также могут быть описаны расширенные типы данных связей, например, «либо ничего, либо один к одному» (0..1 – 1) и другие, например связь-наследование, определяющая использование «дочерними» классами атрибутов и методов «родительского» класса. Для каждого из алгоритмов была составлена блок-диаграмма последовательности; пример такой диаграммы представлен на рис. 2.

Блок-диаграмма представляет собой последовательный набор блоков различного типа в заданной последовательности, определяемой стрелками. В данной диаграмме (рис. 2), а также диаграммах для остальных алгоритмов представлены следующие типы блоков: ограничители (определяют начало и конец алгоритма (обозначен номером 1 на рисунке)), блок ввода данных в алгоритм (обозначен номером 2 на рисунке), блок процесса (обозначен номером 3 на рисунке) и блок условия (обозначен номером 4 на рисунке).

На рис. 1 представлен пример UML-диаграммы классов для алгоритма создания анимации движения по предопределенной траектории. Данный алгоритм может быть

использован, например, для создания анимации пролета беспилотного воздушного судна (БВС) после выполнения полета (кадр из анимации пролета БВС представлен на рис. 3), как одно из приложений для отчетных материалов к выполненным аэрофотосъемочным работам, т. к. большинство БВС после выполнения полета формируют пространственный файл в векторном формате с его истинной траекторией движения, а разработанный алгоритм позволяет установить временное разрешение анимации с привязкой к реальному времени полета.

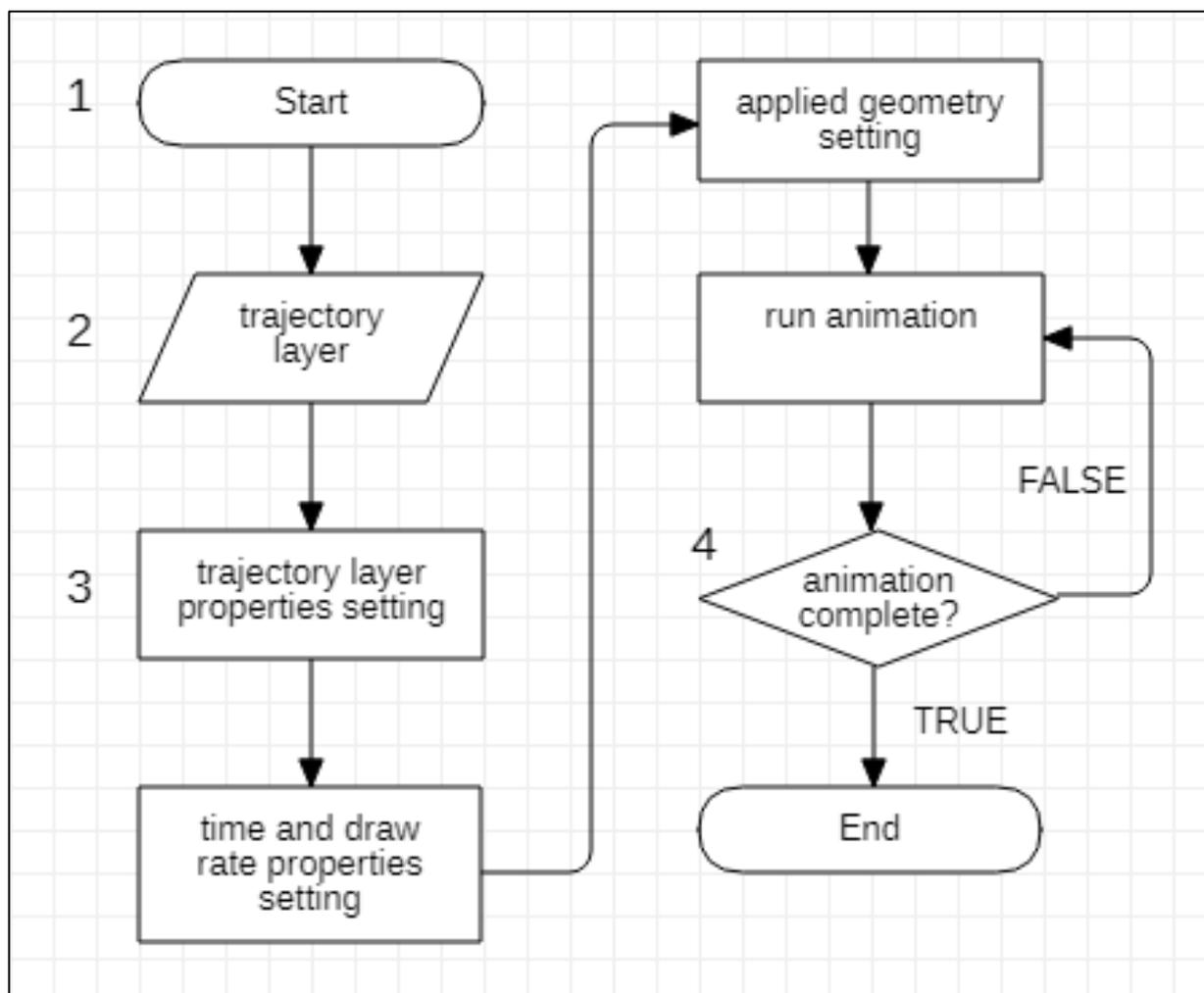


Рис. 2. Блок-диаграмма алгоритма создания анимации движения по траектории
Fig. 2. Block diagram for the algorithm of the along-trajectory motion animation

Для каждого из алгоритмов для создания вышеперечисленных видов анимаций была составлена UML-диаграмма классов, а также дополнительно сформирован класс *feature*, определяющий объект, к которому будет применена анимация. Данный класс используется для обобщения всех типов геометрических примитивов (точка, линия, полигон), т. к. большинство видов анимации не зависят от конкретного типа геометрии. Данный класс дополнительно включает в себя атрибуты начала анимации для конкретного объекта и ее окончания, по умолчанию принимаемых за начало и конец всей анимации карты, соответственно. UML-диаграмма класса *feature* представлена на рис. 4.

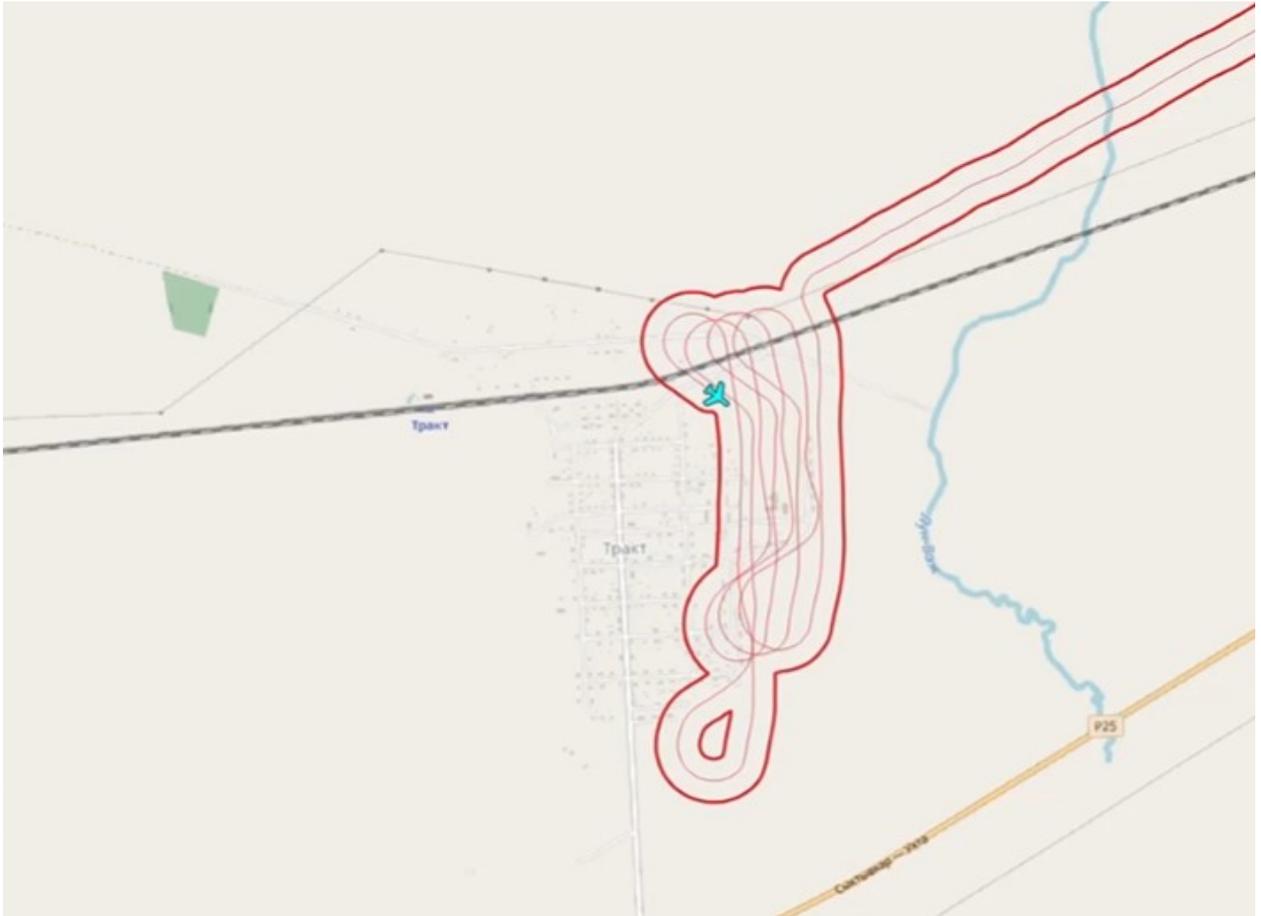


Рис. 3. Кадр анимации пролета БВС над населенным пунктом
Fig. 3. An animation frame of a UAV flight over a human settlement

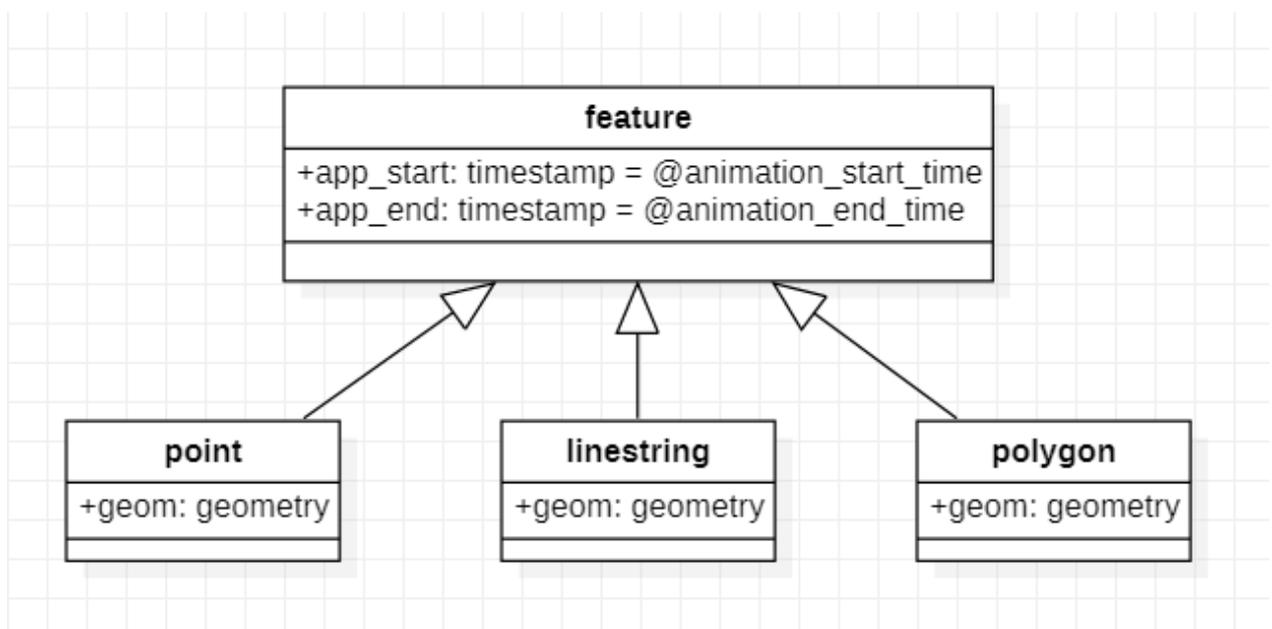


Рис. 4. Класс UML feature
Fig. 4. Feature UML-class

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанные алгоритмы реализуют следующие методы (при этом все используют параметры управления временем в ГИС):

1. Создание анимации на основе исключительно параметров времени — реализуется алгоритмом для создания анимации простого изменения положения на основе базы данных состояний пространственных объектов (см. выше п. 2 перечня видов анимаций).
2. Создание анимации на основе аффинных преобразований — реализуется алгоритмом для создания анимации масштабирования объекта (см. выше п. 1 перечня видов анимаций).
3. Создание анимации на основе изменения параметров простого стиля объектов — реализуется алгоритмами создания анимаций подписей, цвета и прозрачности (см. выше пп. 3–4 перечня видов анимаций).
4. Создание анимации с использованием генератора геометрии сложного стиля объектов — реализуется алгоритмами создания анимаций пп. 5–8 (см. выше перечень видов анимаций).

В рамках исследования проанализирован вопрос о месте разработанных методов и алгоритмов для создания картографических анимаций в ГИС в системе знаний картографии и геоинформатики. Данный вопрос является дискуссионным ввиду комплексности понятийного аппарата, а также относительной новизны обсуждаемого направления и недостаточной проработанности его сущности и терминологии.

Анимационная картография (Animated Cartography) или анимационное картографирование (Animated Mapping) определяется в отечественных и зарубежных трудах [Берлянт, 1997; Лисицкий и др., 2014а; Берлянт, Ушакова, 2000; Moelling, 1980; Campbell, Egbert, 1990; DiBiase et al., 1992; Harrower, 2004; Harrower, Fabricant, 2008] как картографирование динамики и процессов, происходящих на какой-либо территории. Анимационная картография и картографические анимации, с другой стороны — часть геоинформационного картографирования, сущность которого определяется как автоматизированное создание и использование карт на основе ГИС и баз картографических данных и знаний [Берлянт, 1997]. Анимации и способы их создания неотделимы от динамического геоинформационного картографирования.

В свою очередь, мультимедийная картография [Лисицкий и др., 2014а; Лисицкий и др., 2017; Hunter, 1977; Peterson, 1995; Cartwright et al., 2007] определяется как сочетание разнообразных методов, приемов картографии и мультимедиа, программных и технических средств, позволяющих осуществлять интеграцию картографического изображения и другой информации в форме текста, звукового сопровождения, графиков, фотографий, видеосюжетов, рисунков, анимации, двух- и трехмерных моделей [Лисицкий и др., 2014б]. В мультимедийной картографии анимации являются средством, определяющим восприятие картографического изображения, а создание анимаций направлено на создание мультимедийных эффектов (перетекание, мерцание, возникновение, иные) при помощи специализированных технических средств и программного обеспечения.

Вопрос определения места разработанных в ходе исследования методов не является однозначным, так как:

1. Данные методы используют возможности ГИС.
2. Данные методы используют таблицы атрибутов пространственных объектов.
3. Метод создания анимации с использованием генератора геометрии позволяет дополнительно перейти от создания анимации к ее использованию, для проведения

анализа динамики моделируемых процессов, т. к. он позволяет в любой желаемый момент выполнять пространственные манипуляции и вычисления с моделируемым объектом.

Указанные свойства позволяют отнести разработанные методы к области геоинформационного картографирования. С другой стороны, учитывая, что данные методы позволяют создавать мультимедийные эффекты непосредственно в настольном приложении ГИС, которое можно классифицировать как специализированное ПО для создания данных эффектов, их возможно отнести и к методам мультимедийной картографии.

Таким образом, сущность выполненной разработки может быть определена как развитие методов динамического геоинформационного картографирования, учитывая, что выполнялась разработка методов создания анимаций объектов в ГИС в целом. Хотя достигаемая данными методами «мультимедийность изображения» скорее определяет разработку как комплексную, на стыке геоинформационного картографирования и мультимедийной картографии.

ВЫВОДЫ

В результате выполненных исследования и разработки был разработан ряд методов и реализующих их алгоритмов, обеспечивающих выполнение полного цикла анимационного картографирования динамики пространственных объектов в среде универсальных настольных ГИС. Разработанные алгоритмы были документированы путем создания UML-диаграмм классов и блок-диаграмм, что позволяет облегчить их портирование в другие настольные ГИС. Кроме того, созданные диаграммы могут быть охарактеризованы как методические средства, которые могут стать основой для дальнейшего развития методов анимации объектов в ГИС.

В процессе исследования, кроме того, на основе анализа существующих методов создания картографических анимаций объектов и функциональных возможностей QGIS для создания картографических анимаций объектов, были выделены основные группы картографических анимаций.

В результате анализа, обобщения и определения разработанных методов создания анимаций в ГИС определено место разработанных методов в системе знаний картографии и геоинформатики. Рассмотрена комплексность и неоднозначность отнесения методов автоматизации анимаций в ГИС к различным разделам геоинформатики и картографии, различия в схожих понятиях, возможные разночтения. В результате анализа место разработки в системе знаний определено на стыке геоинформационного картографирования (автоматизированной картографии) и мультимедийной картографии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Берлянт А. М. Геоинформационное картографирование. М.: Моск. гос. ун-т имени М. В. Ломоносова, Рос. акад. естеств. наук, 1997. 64 с.

Берлянт А. М., Ушакова Л. А. Картографические анимации. М.: Научный мир, 2000. 99 с.

Лисицкий Д. В., Хорошилов В. С., Колесников А. А. Анимационная картография — сущность, характеристики и перспективы. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2014а. № S4. С. 91–97.

Лисицкий Д. В., Колесников А. А., Комиссарова Е. В., Бугаков П. Ю., Писарев В. С. Мультимедийное направление в картографии. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2014б. № 3. С. 41–46.

Лисицкий Д. В., Комиссарова Е. В., Колесников А. А. Теоретические основы и особенности мультимедийной картографии. Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий), 2017. Т. 22. № 3. С. 72–87.

Campbell C. S., Egbert S. L. Animated cartography: thirty years of scratching the surface. *Cartographica*, 1990. V. 27. Iss. 2. P. 24–46. DOI: 10.3138/V321-5367-W742-1587.

Cartwright W. E., Peterson M. P., Gartner G. Multimedia cartography. Edition 2. Heidelberg: Springer, 2007. 546 p. DOI: 10.1007/978-3-540-36651-5.

DiBiase D., MacEachren A. M., Krygier J. B., Reeves C. Animation and the role of map design in scientific visualization. *Cartography and geographic information science*, 1992. V. 19. Iss. 4. P. 201–214. DOI: 10.1559/152304092783721295.

Harrower M. A look at the history and future of animated maps. *Cartographica: the international journal for geographic information and geovisualization*, 2004. V. 39. Iss. 3. P. 33–42. DOI: 10.3138/7MN7-5132-1MW6-4V62.

Harrower M., Fabricant S. The role of map animation for geographic visualization. *Geographic visualization: concepts, tools and applications*. New Jersey: Willey, 2008. P. 49–65. DOI: 10.1002/9780470987643.ch4.

Hunter G. Computer animation survey. *Computers & Graphics*, 1977. V. 2. Iss. 4. P. 225–229. DOI: 10.1016/0097-8493(77)90019-X.

Moellring H. Strategies of real-time cartography. *Cartographic journal*, 1980. V. 17. Iss. 1. P. 12–15. DOI: 10.1179/caj.1980.17.1.12.

Peterson M. P. Interactive and Animated Cartography. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995. 257 p.

REFERENCES

Berlyant A. M. Geoinformational mapping. Moscow: M. V. Lomonosov Moscow State University, Russian Academy of Natural Sciences, 1997. 64 p. (in Russian).

Berlyant A. M., Ushakova L. A. Cartographic animations. Moscow: Scientific World, 2000. 99 p. (in Russian).

Campbell C. S., Egbert S. L. Animated cartography: thirty years of scratching the surface. *Cartographica*, 1990. V. 27. Iss. 2. P. 24–46. DOI: 10.3138/V321-5367-W742-1587.

Cartwright W. E., Peterson M. P., Gartner G. Multimedia cartography. Edition 2. Heidelberg: Springer, 2007. 546 p. DOI: 10.1007/978-3-540-36651-5.

DiBiase D., MacEachren A. M., Krygier J. B., Reeves C. Animation and the role of map design in scientific visualization. *Cartography and geographic information science*, 1992. V. 19. Iss. 4. P. 201–214. DOI: 10.1559/152304092783721295.

Harrower M. A look at the history and future of animated maps. *Cartographica: the international journal for geographic information and geovisualization*, 2004. V. 39. Iss. 3. P. 33–42. DOI: 10.3138/7MN7-5132-1MW6-4V62.

Harrower M., Fabricant S. The role of map animation for geographic visualization. *Geographic visualization: concepts, tools and applications*. New Jersey: Willey, 2008. P. 49–65. DOI: 10.1002/9780470987643.ch4.

Hunter G. Computer animation survey. *Computers & graphics*, 1977. V. 2. Iss. 4. P. 225–229. DOI: 10.1016/0097-8493(77)90019-X.

Lisitsky D. V., Horoshilov V. S., Kolesnikov A. A. Animated cartography — the nature, characteristics and perspectives of Cartography. *Izvestia vuzov “Geodesy and aerophotosurveying”*, 2014a. No. S4. P. 91–97 (in Russian).

Lisitsky D. V., Kolesnikov A. A., Komissarova E. V., Bugakov P. Yu., Pisarev V. S. Multimedia trend in cartography. *Izvestiya vuzov. Izvestia vuzov “Geodesy and aerophotosurveying”*, 2014b. No. 3. P. 41–46 (in Russian).

Lisitsky D. V., Komissarova E. V., Kolesnikov A. A. Theoretical basis and features of multimedia cartography. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*, 2017. V. 22. No. 3. P. 72–87 (in Russian).

Moellring H. Strategies of real-time cartography. *Cartographic journal*, 1980. V. 17. Iss. 1. P. 12–15. DOI: 10.1179/caj.1980.17.1.12.

Peterson M. P. *Interactive and Animated Cartography*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995. 257 p.

И. А. Рыльский¹, Д. А. Парамонов², А. Ю. Кожухарь³, Р. В. Груздев⁴

СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ РАЙОНА АРХЫЗ

АННОТАЦИЯ

Проектирование горно-туристических кластеров требует значительного количества усилий разных специалистов из разных организаций и регионов. Свободный обмен высокоточными данными может быть затруднен, а сами эти данные, как правило, не могут быть получены из фондов, что требует выполнения высокоточных съемок с использованием новейших технологий. В работе описывается подход к информационному обеспечению разнородных специалистов высокоточной информацией посредством выполнения съемок с использованием метода воздушного лазерного сканирования, цифровой аэрофотосъемкой. Информационное обеспечение достигается производными от этих материалов картографическими продуктами, в т. ч. виртуальной моделью с закрытыми пространственными данными. Помимо использования открытых данных на менее важные регионы, в работе отдельно рассматриваются аспекты выполнения съемок в разные сезоны и возможности, которые предоставляет такой подход (расчет слоя глубин снежного покрова, возможность дешифрировать опасные процессы, связанные со снегом). Также описан подход к наполнению виртуальных моделей не только традиционными двумерными и трехмерными картографическими материалами, но и точками лазерных отражений от наземных объектов. Подобный подход позволяет не только повысить визуальное качество изображения при визуализации трехмерной модели, обеспечив высокий уровень реализма, но и дать пользователям возможность делать точные измерения на основании исходной информации съемок. В работе рассмотрены подходы к оптимизации хранения и визуализации данных, позволяющие работать с большим объемом пространственной информации без использования специализированных компьютеров. Рассмотрены различные подходы к визуализации точек лазерных отражений в пространстве модели.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аэрофотосъемка, виртуальная модель, лидар, ГИС

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 Институт природных ресурсов, экологии и криологии, Сибирское отделение РАН, ул. Недорезова, д. 16а, Чита, Россия, 672014,

e-mail: rogruzdev@mail.ru

Илья А. Рыльский¹, Dmitriy A. Paramonov², Anna Yu. Kozhukhar³, Roman V. Gruzdev⁴

CREATING VIRTUAL MODELS OF ARHYZ REGION

ABSTRACT

Designing mountain tourism clusters requires a significant amount of effort from different specialists from different organizations and regions. The free exchange of high-precision data can be difficult; the data itself, as a rule, cannot be obtained from funds, which requires high-precision surveys using the latest technologies. The paper describes an approach to providing information to diverse specialists with high-precision information, through surveying using the airborne laser scanning method, digital aerial photography. Information support is achieved by cartographic products derived from these materials, including a virtual model with closed spatial data. In addition to the use of open data for less important regions, the work separately examines aspects of surveying in different seasons and the opportunities that this approach provides (calculation of the depth layer of snow cover, the ability to decipher hazardous processes associated with snow). An approach to filling virtual models not only with traditional two-dimensional and three-dimensional cartographic materials, but also with points of laser reflections from above-ground objects is also described. This approach not only improves the visual quality of the 3D model rendering, providing a high level of realism, but also allows users to make accurate measurements based on the original survey information. The paper discusses approaches to optimizing data storage and visualization, allowing you to work with a large amount of spatial information without the use of specialized computers. Various approaches to visualizing laser reflection points in model space are considered.

KEYWORDS: airborne imagery, virtual model, remote sensing, GIS, LIDAR

ВВЕДЕНИЕ

Развитие горно-туристических кластеров относится к наиболее сложным видам освоения территорий в области рекреационного освоения территорий. Сочетание сложного или очень сложного рельефа, высокогорных условий, большого количества опасных инженерно-геологических процессов, крупных технических сооружений (подъемники, канатные дороги, транспортные системы — такие как тоннели, железные дороги и фуникулеры), большого количества зданий, строящихся по нестандартным проектам — все это делает развитие горно-туристических курортов очень разноплановой задачей. Решение данной задачи длится порой десятки лет, разбиваясь на много этапов и блоков, и требует усилий десятков и сотен коллективов людей. Лишь очень маленькая часть из этих людей владеет навыками работы с ГИС-приложениями, но почти все эти люди сталкиваются с необходимостью учета пространственных данных о территории и объектах на ней.

Как правило, полный объем материалов изысканий прошлых лет доступен не каждому из задействованных специалистов, руководители проектов зачастую имеют довольно смутное представление о расположении и особенностях территории. Следует отметить, что наглядность используемых в современном проектировании пространственных данных оставляет желать лучшего. Так, используемые в наши дни топографические планы, оформленные согласно ГОСТам (основной источник сведений для выработки

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 Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 16a, Nedorezova str., Chita, 672002, Russia, *e-mail:* rogruzdev@mail.ru

проектных решений) обладают крайне низкой наглядностью, и при большой площади территории вообще слабо поддаются осмыслению без длительного предварительного изучения. Отрицательной традицией является также составление топографических планов только на территории проектируемых объектов — в то время как прилегающие территории представляются в виде пустого белого листа, на котором как будто бы ничего нет. Но это совершенно неверно с любой точки зрения — объекты не «висят в космосе» и, конечно же, взаимодействуют с окружающими элементами природно-антропогенной среды.

Как уже было отмечено и обосновано нами ранее [Рыльский, 2023], наиболее приемлемым подходом для решения задач по информационной поддержке принятия решений при проектировании горнолыжных курортов и горно-туристических кластеров в целом является создание закрытых от редактирования виртуальных моделей на базе среды Unity. Подобные модели позволяют отобразить большой массив данных о территории. При этом нет проблем с распространением данных по различным категориям пользователей — это обеспечивается закрытостью модели от любых форм экспорта и редактирования исходных пространственных данных, на которых она была сделана.

Требования в части проектирования столь крупных пространственных объектов предполагают с одной стороны высокую точность (соответствует м-бам 1: 2 000–1: 500), а с другой — большой пространственный охват, исчисляемый тысячами и даже десятками тысяч гектаров. Кроме того, требуется наличие данных и более мелких масштабов на сопредельные территории. В зависимости от доступности, задач и радиуса буферной зоны вокруг объекта (требуемой для учета при анализе сопредельных территорий и создаваемых ими эффектов влияния) масштаб может колебаться от 1: 10 000 до 1: 100 000. Ширина внешней буферной зоны при этом может достигать десятков километров.

Геоинформационное обеспечение подобного рода проектов возможно только с использованием метода воздушного лазерного сканирования в сочетании с аэрофотосъемкой. На сегодняшний день данный метод является наиболее достоверным и точным из всех существующих методов дистанционного зондирования. Также следует отметить, что лазерное сканирование — единственный метод, позволяющий картографировать как рельеф под кронами деревьев, так и вершины растительности и ее центральные части (стволы, ветви, второй ярус растительности). Достигается это посредством регистрации нескольких отражений лазерного импульса избыточной мощности, которые формируются в результате взаимодействия начального лазерного импульса от разных частей кроны и грунта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методы геоинформационного обеспечения виртуальных моделей горно-туристических комплексов с использованием открытых данных

В предыдущей работе [Рыльский, 2023] были рассмотрены возможные варианты решения задачи по информационному обеспечению процесса создания виртуальных моделей крупных территориальных комплексов, сочетающих как данные высокой и очень высокой, так и средней детальности. Это топографические карты м-бов 1: 50 000–1: 25 000, материалы космосъемок с детальностью 0.3–1.5 м (платные) и 10–15 м (бесплатные), цифровые модели рельефа открытого пользования: AW3D30 (Alos DEM 30) или SRTM (бесплатные) и более детальные ЦМР — платные. Общая черта всех этих данных — невозможность обеспечить сведения о рельефе детальнее м-ба 1: 10 000 (даже при использовании платных ЦМР) и детальнее м-ба 1: 5 000 — в части текстур [Mukul, 2017].

Однако для понимания возможных решений, дешифрирования опасных процессов и просто создания эффекта реализма нужна гораздо более детальная информация. Это данные м-бов 1: 500–1: 2 000, и получить их из открытых источников или со спутников — невозможно. Кроме того, для того, есть и другие требования:

- все перечисленные материалы должны быть не старше 2 лет;

- пространственная точность должна быть на уровне 0.4–0.5 мм в масштабе карты (например, для м-ба 1: 2 000 это 0.8 м) в части планового положения, и 1/3 сечения рельефа (для м-ба 1: 2 000 сечение рельефа составляет 1 м, а точность — 0.33 м) — согласно СНиП 11-02-96 «Инженерные изыскания в строительстве».

Есть и иные недостатки у данных космических съемок. Так, данные *космических съемок в видимом диапазоне, а также цифровой аэрофотосъемки* с любых видов носителей и в любые сезоны не дают детальных сведений о рельефе и его микроформах под пологом растительности, а также в пределах крутых затененных склонов, вертикальных скальных стен и сбросов и т. п. Материалы же *радиолокационной съемки* либо недостаточно детальны (при использовании более длинных волн), либо не достигают поверхности грунта, отражаясь от крон деревьев (при использовании более коротких длин волн). Также, в связи с введенными против РФ санкциями, получение зарубежных материалов радиолокационных съемок практически невозможно (отечественная радиолокационная съемка, доступная гражданским организациям, отсутствует).

В то же время площадь анализируемого региона может быть очень большой. Так, в предыдущих работах рассматривалось построение моделей площадью свыше 10 000 км² [Рыльский, 2023]. При этом площадь района, на который требуются высокдетальные данные, может составлять тысячи или десятки тысяч га. Таким образом, подобные объемы работ полностью исключают возможность использования наземных методов съемок.

Единственным реально доступным методом информационного обеспечения таких проектов является воздушное лазерное сканирование (ВЛС) с пилотируемого или беспилотного носителя с одновременной аэрофотосъемкой (RGB) в видимом диапазоне; дополнительно могут быть выполнены съемки в ближнем инфракрасном и тепловом диапазонах. Этот метод гарантирует высокие полноту и точность материалов, соответствующие м-бам 1: 200–1: 5 000 на огромных территориях [Chen, 2007]. Цена 1 км² такой съемки сопоставима с ценой проведения космической стереосъемки (включая затраты на последующее моделирование поверхности в стереорежиме). Уникальной особенностью воздушного лазерного сканирования является способность лазерных импульсов (с полной оцифровкой формы принимаемого сигнала) проникать сквозь кроны, достигая истинной поверхности рельефа. Кроме того, эта особенность позволяет регистрировать множественные отражения, вызванные единственным исходным импульсом. Данная особенность позволяет отображать рельеф в местности, покрытой лесом, с той же подробностью, что и на открытом пространстве, а также выполнять дешифрирования различных ярусов растительности, и ее геометрических характеристик [Korpela, 2008].

Выбор программной основы для разработки ВММ и ее функций

Ранее нами были детально рассмотрены несколько основных типов существующих технических средств и программного обеспечения, которые используются для создания виртуальных моделей [Рыльский, 2022]. Были также отмечены и их недостатки. Также отметим, что в данный момент не существует широко известных программных сред виртуального моделирования, которые бы позволили визуализировать в виртуальной модели не только традиционные ГИС-данные, но и точки лазерных отражений.

Учитывая вышесказанное и с учетом ранее выполненных схожих работ, для территории района Архыза было принято решение построить модель на ядре визуализации Unity. Unity — это кросс-платформенная среда разработки интерактивных виртуальных сред, созданная фирмой Unity Technologies (США). Система разработки визуальных сред позволяет создавать отдельные модули, функционирующие на различных аппаратных платформах (персональные компьютеры, игровые консоли, мобильные устройства, сайты и пр.). Первая версия Unity вышла в 2005 г., и в течение последних 19 лет среда непрерывно совершенствуется. На базе

решений Unity создано значительное число виртуальных сред, приложений, визуализаций математических и пространственных моделей, которые охватывают широкий круг задач.

Отметим, что прямая загрузка пространственных данных в среду неквалифицированным пользователем возможна только в части векторных ГИС-материалов. Данные других видов (растровые, триангуляционные и точечные наборы данных) могут быть подгружены только на этапе компиляции модели, при этом они нуждаются в подготовке (сегментация, генерализация и пр.). Прямое встраивание ГИС-данных (например, векторные полигональные 2D-данные) в среду невозможно, для этого нужно выполнить конвертацию данных из 2D-векторной в растровую форму, или создать псевдо-3D-объекты (которые, по сути, трехмерны, но из-за вырожденности третьей координаты визуализируются как двухмерные).

Выбор участка и получение данных

Работа по созданию виртуальной модели местности района Архыз была выполнена в рамках совместной работы с ООО «Проектстрой» и ООО «Арк-он» в интересах организации-проектировщика застройки данного горнотуристического кластера (рис. 1).

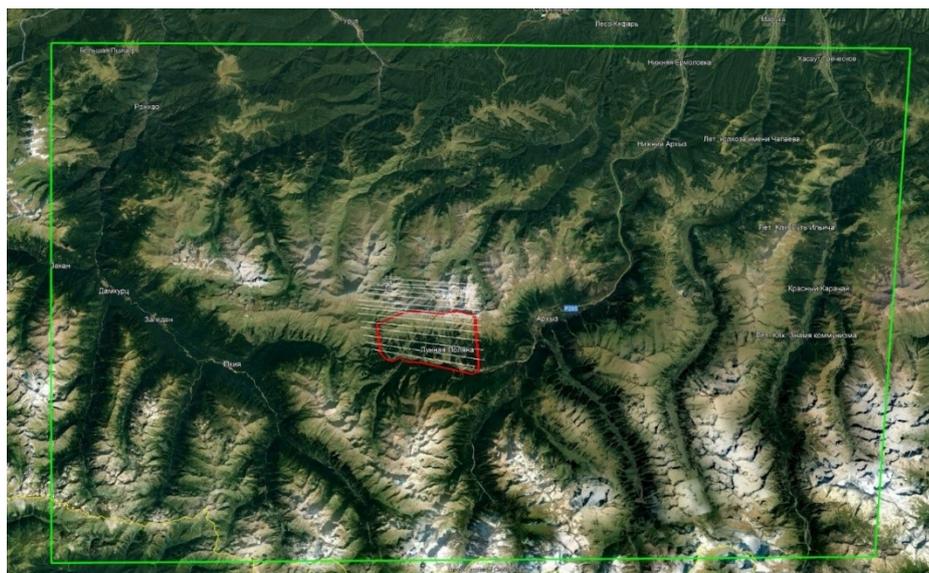
Район включает в себя предгорные и горные ландшафты Кавказа. Для наполнения модели данными были использованы материалы новых залетов лета 2023 г. и зимы-весны 2024 г. Съёмки проводились дважды (в весенний и летний периоды, что позволило создать модель толщины и распределения снежного покрова в период его максимального развития). Более подробно методика этой работы была описана в предыдущих статьях [Тикунов, 2020]. В данную модель вносились итоговые результаты в виде растрового слоя данных.

Горнолыжный кластер Архыза — один из наиболее динамичных в последние 5 лет. Развитие не только инфраструктуры для катания на горных лыжах, но и различных других видов рекреационной активности, таких как туризм, пешие однодневные прогулки, аттракционы, а также селитебной инфраструктуры и отельного бизнеса, предполагает очень разноплановые схемы использования природно-территориальных комплексов. Предполагается не только использование горнолыжных склонов, но и вершинных, долинных, залесенных и луговых склоновых ландшафтов — каждый под свои виды задач.

Климат региона — умеренно-континентальный, с умеренным воздействием морских воздушных масс. Территория гористая, с выраженными альпийскими формами в пределах всего Главного Кавказского хребта и сопредельных хребтов. Ближе к северу преобладают предгорные ландшафты Северного Кавказа.

Центральная часть района (красный контур) предполагает наивысший уровень детализации, а также и наибольшую сложность и стоимость в освоении территории. Тем не менее, этот относительно небольшой район (площадью около 4 600 га) неотделим от окружающих территорий, которые также связаны с ним — как физико-географическими, так и социально-экономическими взаимосвязями. Исходя из этого целевыми масштабами были выбраны 1:1 000 для центрального района (красный контур) и 1:100 000 — для внешней буферной зоны (зеленый контур), имеющей площадь 3 700 км².

На территории центральной части модели (красный контур на рис. 1) было выполнено лазерное сканирование на площади около 46 км², в ходе летнего и зимнего залетов снималась идентичная территория по идентичным полетным планам (рис. 2). Лазерное сканирование выполнялось с использованием лазерного сканера RIEGL Q680i (высота полета до 2 000 м над рельефом, скорость работы — до 400 000 измерений в секунду, регистрация неограниченного количества отражений. Для фотосъемки использована цифровая среднеформатная специализированная фотокамера видимого диапазона IGI DIGICAM H60 (разрешение матрицы 60 Мпк, размер матрицы 40.2 x 53.7 мм, использован объектив с фокусным расстоянием 50 мм).



*Рис. 1. Районы создания виртуальной модели. Красный контур — уровень
детальности 1 и 2, зеленый контур — уровень детальности 3.*

Fig. 1. Extent of virtual modelling levels. Red contour — levels 1 and 2, green — level 3



*Рис. 2. Район Архыз – Лунная Поляна. Моделирование с детальностью уровня 3 и 2
(в пределах желтого полигона). Использованы открытые источники данных
и материалы лазерного сканирования. Вертикальный м-б 1: 1*

*Fig. 2. Arkhyz – Lunnaaya Poliana Region. Modeling with level 3 and 2 detail (yellow polygon).
Open data sources and laser scanning materials were used. Vertical scale 1: 1*

Выполнение съемки происходило с высоты от 500 до 1 100 м над поверхностью. Съемка велась с параллельных треков, причем в силу чрезвычайно расчлененного рельефа продольное перекрытие снимков колебалось от 55 до 80 %, поперечное — от 20 до 65 %. Полеты были выполнены дважды — в летний сезон (2 июня 2023 г.) и в зимний сезон (30 марта 2024 г.). В обоих случаях схема залета и использованные сенсоры были идентичны. Полеты выполнялись с использованием пилотируемого носителя (Ан-2).

Аэрофотосъемка и лазерное сканирование производились одновременно. Разрешение фотоснимков составило от 7 до 13 см, плотность лазерного сканирования — от 2 до 12 точек на 1 м². Это соответствует требованиям м-ба 1: 500 и 1: 1 000 с запасом по детальности и плотности сканирования.

Точки лазерных отражений различных по времени залетов (2023 и 2024 гг.) были разделены на классы «Земля», «Здания и сооружения», «Растительность», «Прочее». По точкам класса «Земля» были созданы триангуляционные и матричные модели поверхности грунта, далее они были использованы для создания топографических планов м-бов 1: 500 и 1: 1 000 [Gorgens, 2017], по ним же созданы и модели рельефа в среде UNITY. За базовую модель рельефа была принята модель, построенная по материалам летних съемок.

Для увеличения уровня реализма в ВММ применено звуковое сопровождение (ветер), создана модель неба и облаков (без анимационных эффектов), смоделирована дымка на больших дистанциях. Освещение модели имитирует летний полдень.

Для облегчения ориентирования «на местности» используется карта-врезка (при необходимости может быть свернута), Указывая мышью нужную локацию на карте-врезке, пользователь может быстро переместиться в указанную на карте-врезке точку.

Модель поверхности грунта, покрытая снегом (по материалам залета от марта 2024 г.) была использована для создания модели толщины снежного покрова. Модель толщины снежного покрова была представлена в матричной форме с шагом 1 м и визуализируется в виртуальной модели как тематический отключаемый растровый слой данных. Подобный подход к расчету толщины снежного покрова (обычно эти сведения используются для расчета снеговых запасов для их оптимального использования и продления сезона катания на трассах) был описан в наших предыдущих работах на примере схожей задачи в Красной Поляне [Тикун, Рылский, 2020].

Моделирование искусственных сооружений не проводилось. Предполагается выполнение данного этапа на последующих стадиях совершенствования данной модели.

Особенностью данной модели является внесение в модель облака точек лазерных отражений класса «Растительность». Данная опция существенно увеличивает информационную насыщенность модели, позволяя показать большое число объектов на поверхности без их генерализации. В то же время визуализация десятков миллионов точек лазерных отражений накладывает более серьезные требования в части вычислительных мощностей ПК пользователя. Тем не менее, благодаря сегментации [Рылский, 2022] подгрузки данных лазерного сканирования удалось обеспечить устойчивую реализацию в реальном времени на ПК с 16 Гбайт оперативной памяти.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Подготовленные наборы геоинформационных данных были подвергнуты сегментации (в основном использована сетка сегментов 400 x 400 м, но прорабатывается и переход на сетку 100 x 100 м). Сегментация данных и создание на каждый сегмент пирамидальных слоев необходимы для ускорения подгрузки данных, оптимизации объемов загружаемой информации, использования сведений о дальности для объекта для выбора нужного уровня детализации сегмента [Капралов, 2004]. В отличие от предыдущих моделей, сегментация была проведена не только для растровых и TIN-данных, но и для трехмерных точек лазерных отражений.

В результате комплексирования вышеупомянутых данных и программно-аналитических функций для работы с пространственными запросами была выполнена компиляция в EXE-файл с прилагаемой базой данных. Данное приложение позволяет визуализировать в реальном времени (по аналогии с трехмерными компьютерными играми) трехмерную сцену с выбранными режимами отображения и наборами данных, осуществляя ее облет в реальном времени. Полученная виртуальная модель пригодна для использования на операционных

системах Windows 7, 8, 10, 11. Модель не требует инсталляции, и работает после простого переписывания ее на жесткий диск нужного персонального компьютера. Обязательным условием является работа с SSD-диска для обеспечения максимально быстрой загрузки данных. Рекомендованное разрешение экрана — FullHD (1920 x 1080), однако возможна визуализация в режимах 2560 x 1440 и далее, вплоть до 4K. Конечная детальность создаваемой «картинки» ограничена производительностью видеокарты пользователя и ее предельным разрешением. Рекомендованная видеокарта — RTX 3050 или лучше. Итоговый объем виртуальной модели составляет 12.6 Гбайт. Для запуска необходимы 16 Гбайт оперативной памяти и процессор уровня производительности Intel Core i7.

Общее описание модели

Основой модели является ЦМР, представленная в виде TIN-модели [Lohr, 1997], оптимизированной с использованием ключевых точек перегиба рельефа. Это обеспечивает рациональное использование ресурсов ПК и минимизирует нагрузку на процессоры. Основным режимом является визуализация рельефа в реальных пропорциях высот (вертикальный м-б 1: 1), но для низменных, плоских и/или слабо расчлененных участков предусмотрен вертикальный м-б 1: 2).

ЦМР текстурируется целевыми наборами растровых данных. Среди них отметим:

- ортофотопланы летние;
- ортофотопланы зимние;
- карта высот с нанесенными горизонталями и текстовыми отметками высот (окрашена с использованием градиентной гипсометрической шкалы высот);
- карта углов наклона;
- карта экспозиции склонов;
- карта глубины снежного покрова;
- растеризованные топографические планы (м-б 1: 1 000);

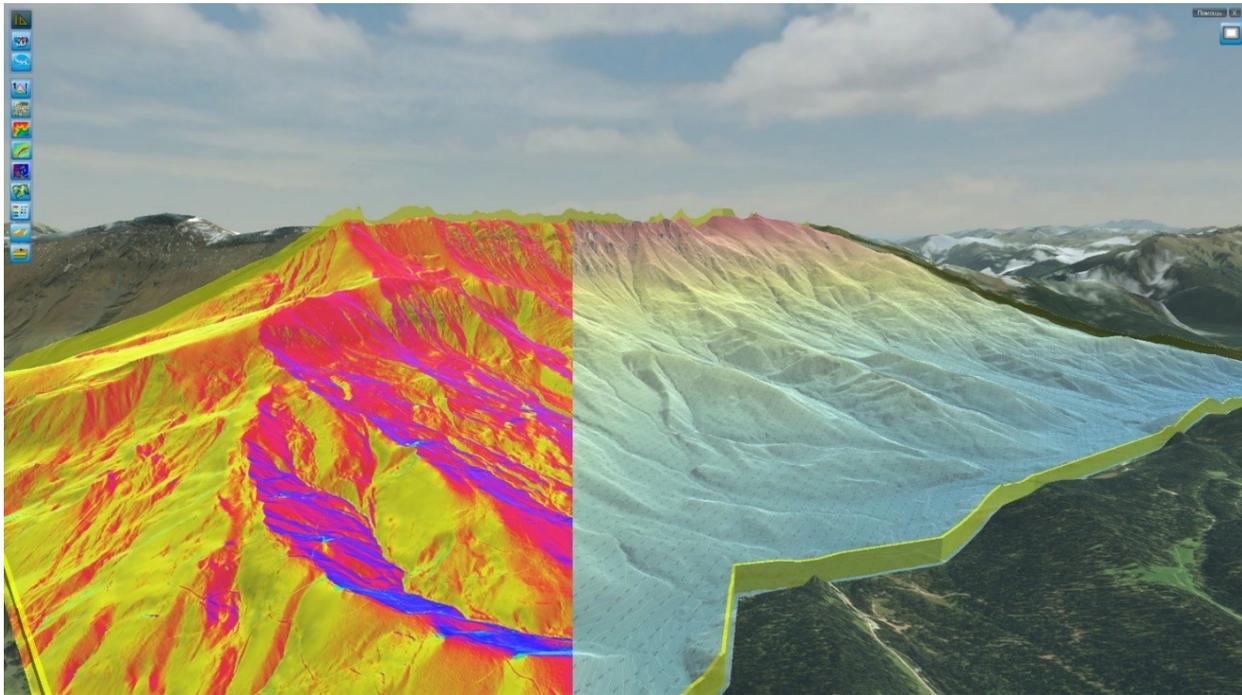
В каждый момент времени пользователь видит один слой, смешение слоев (в виде работы с полупрозрачностью или иные способы) в модели не реализовано.

Основное средство управления моделью и навигации в ней — мышь и клавиши перемещения курсора. Все прочие запросы переключаются с использованием кнопок экрана. В модели представлены 2 варианта облета (в режиме «Вращение вокруг объекта» и в режиме «Вертолет/вращение головой»).

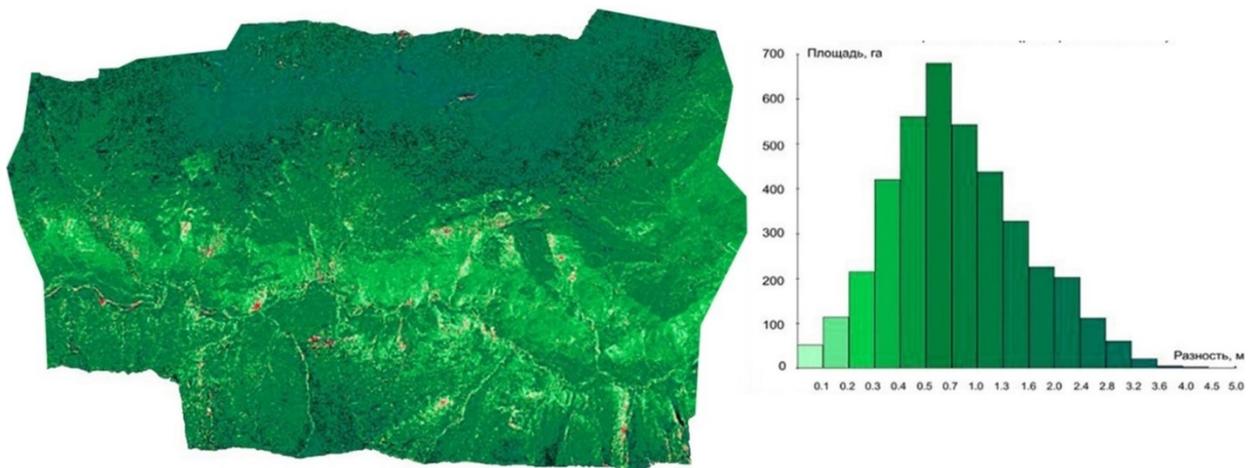
Наиболее частым запросом пользователей является измерение. В модели предоставляется возможность выполнения измерений длин отрезков в плане (при этом отображается длина, горизонтальное проложение, перепад высот, уклон (в процентах), периметров, площадей, а также высоты точек лазерных отражений над поверхностью рельефа (рис. 5).

Для обеспечения простейшего импорта и экспорта векторной информации в модель или из модели используется формат KML (изначально созданный для приложения Google Планета Земля). Данный формат удобен тем, что может быть переведен в любой другой векторный ГИС-формат пространственных данных. Пользователь также может самостоятельно создать в пространстве модели свои векторные объекты (точечные, линейные, площадные) и экспортировать их вовне. Формат данных KML — текстовый, что дает возможность использовать его с минимальными затратами усилий для разработчиков подобных моделей. В то же время не предполагается, что пользователи будут загружать значительные объемы данных в этом формате (на текущий момент — ограничение до 16 000 полигонов). Пользователь в пространстве модели и в режиме изометрического вида (с любого ракурса) может самостоятельно оцифровать контуры интересующих его объектов

(при этом можно «доворачивать» модель для достижения оптимального для рисования ракурса прямо в процессе рисования).



*Рис. 3. Виды слоев-текстур: слева — карта экспозиции склонов, справа — карта высот с нанесенными отметками высот.
Fig. 3. Types of texture layers: on the left — slope aspect map, on the right — elevation map with plotted contour lines*



*Рис. 4. Распределение толщины снежного покрова
Fig. 4. Distribution of snow coverage*



Рис. 5. Измерение длин и площадей в модели
Fig. 5. Measuring length and area of the polygon in the model

Детальность полученной модели позволяет визуально дешифровать опасные инженерные процессы и объекты — такие как карст, лавинные лотки, оползневые участки, осыпи и пр. (рис. 6).



Рис. 6. Потенциальные лавиноопасные участки
Fig. 6. Zones of potential avalanches

Для обеспечения возможности наблюдения стереоэффекта пользователем или группой пользователей в модели предусмотрена возможность визуализации в анаглифическом режиме (посредством двухцветных очков, см. рис. 7). При необходимости модель также может быть доработана для навигации в режиме управления без мыши с использованием touch-экранов или визуализационных столов. Отметим, что работа в стереорежиме или без

мышью делает выполнение измерений и/или оцифровку контуров малоэффективной и неудобной. Таким образом, данные режимы подходят скорее не для аналитических, а чисто визуализационных задач.

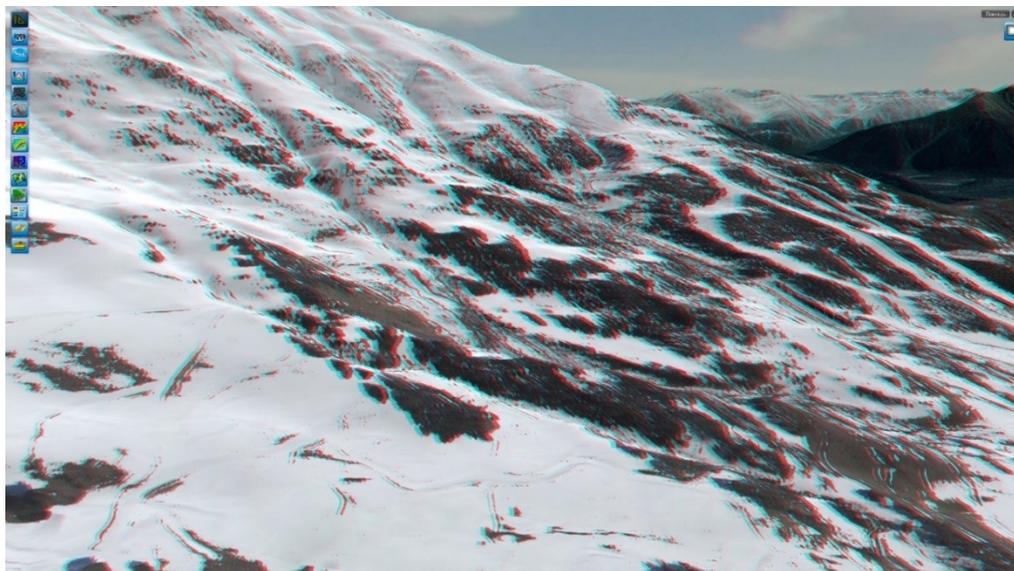


Рис. 7. Анаглифическая стереовизуализация
Fig. 7. Anaglyph stereo visualization

Принципиально новой особенностью данной модели является возможность визуализации в ней плотного облака точек лазерных отражений (ТЛО). Отметим, что визуализация ТЛО является очень трудной задачей для 3D графических приложений, и она мало где реализована в подобной форме. Действительно, визуализация ЦМР в формате TIN на территорию такой площади (4 600 га, 43 км²) потребует использования примерно 800 000 вершин и задействует примерно 1,5 млн граней. При этом будет достигнута точность и подробность рельефа на уровне 1: 1 000 с шагом горизонталей 0.5 м, а ТЛО под м-б 1: 1 000 будут иметь плотность от 2 т/м² на открытой местности и до 12 т/м² в лесах, всего — до 140 000 000 точек, из них около 60 000 000 ТЛО — точки отражения от растительности и иных надземных объектов.

Неоднозначным является также вопрос назначения ТЛО цветов. Возможные подходы:

- назначение обычного цвета с постоянной светимостью, на которую не влияют источники света в модели;
- назначение градиентных цветов, меняющихся по мере нарастания относительной высоты над рельефом (рис. 8);
- раскраска ТЛО с использованием прямого проецирования данных с фотоснимков (реальные цвета, рис. 9).

В данной модели к точкам класса «Растительность» отнесены как точки отражений от растительного покрова, так и точки надземных искусственных объектов — подъемники, здания, провода и тросы и т. д. Точки данного класса на рис. 8 расцвечены в соответствии с их относительной высотой над поверхностью рельефа, что позволяет видеть трехмерную структуру данного облака без генерализации и упрощений. Всего в модели использовано 60 млн точек данного класса. Данная форма представления более удобна для аналитики.

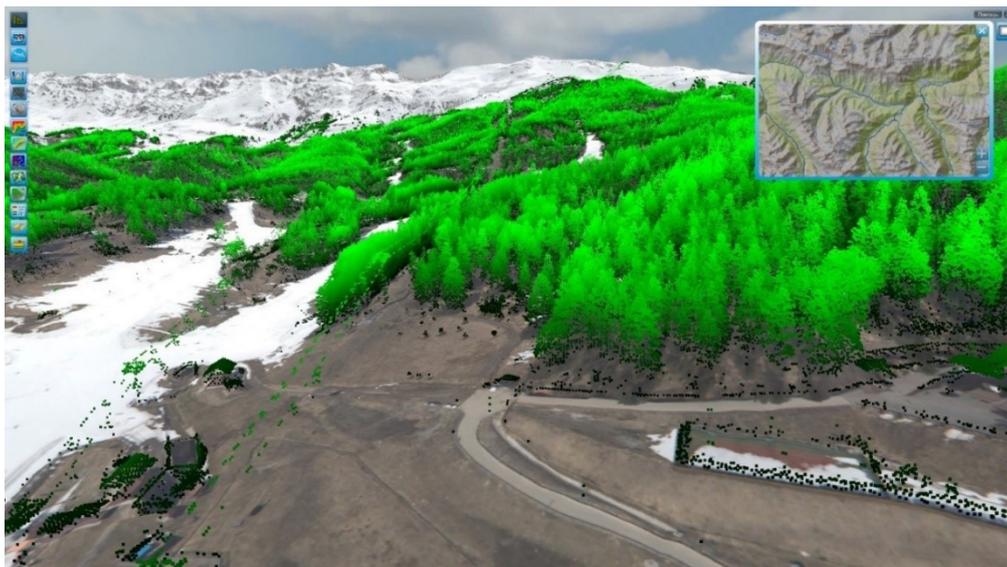


Рис. 8. Точки лазерных отражений класса «Растительность»; интенсивность нарастает по мере увеличения относительной высоты над рельефом
Fig. 8. Laser reflection points of the “Vegetation” class; the intensity increases as the relative height above the terrain increases

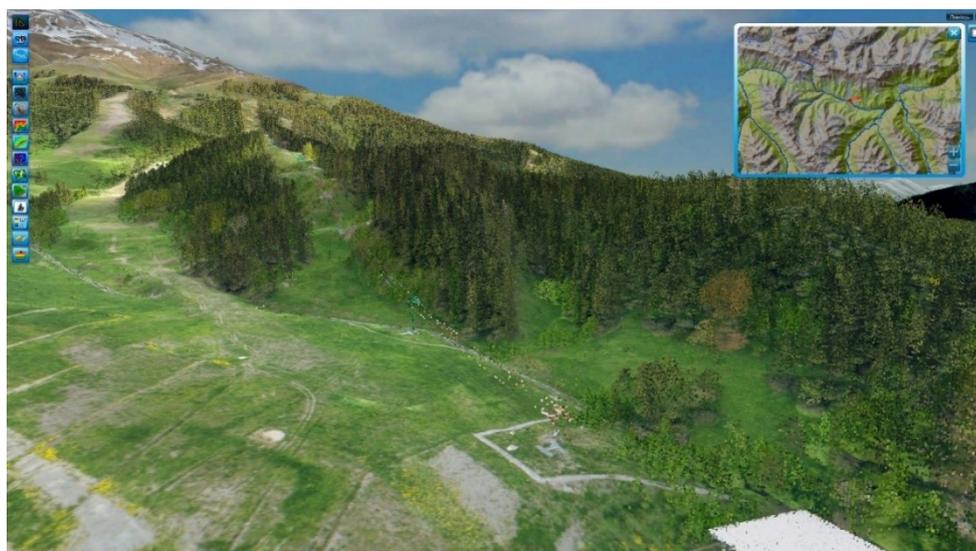


Рис. 9. Точки лазерных отражений класса «Растительность», реальные цвета
Fig. 9. Laser reflection points of the “Vegetation” class, real RGB colors

Отображение точек в реальных цветах делает анализ менее наглядным, зато значительно повышает реализм модели, обеспечивая эффект присутствия на местности, который практически недостижим никакими другими средствами сбора данных дистанционного зондирования. Этот режим более подходит для чисто демонстрационных целей.

К сожалению, выбранная идеология построения закрытых виртуальных моделей на базе 3D-движков вроде Unity или Unreal Engine обладает рядом недостатков, мешающих неограниченному развитию данного направления в сторону «сращивания» с ГИС. Большая часть материалов пространственного характера должна вноситься в модель до, а не после процесса компиляции EXE-файла. Поэтому импорт и экспорт данных в нее крайне

затруднен, а для многих видов данных (вроде векторных чертежей в форматах САПР) — невозможен.

Совершенствование данных моделей может идти несколькими путями:

- экстенсивный путь — наращивание потенциально возможных объемов визуализируемых данных (в т. ч. при задействовании более мощных ПК), увеличение детальности данных за счет добавления в модель данных не только воздушного, но и наземного/мобильного сканирования, заранее созданных более детальных 3D-моделей, полученных по данным БПЛА или ручного моделирования;
- интенсивный — наращивание функциональности анализа в рамках возможностей, предоставляемых 3D-движками, оптимизация скорости работы на ПК с недостаточными ресурсами, разработка новых визуальных средств показа трехмерной информации (инструменты работы с прозрачностью, цветовыми шкалами и т. п.).

В настоящее время технические возможности и практика реализованных проектов позволяют говорить о технической возможности визуализации моделей с территориальным охватом на уровне 10 000 км² с детальностью 1: 50 000–1: 100 000, содержащими более детальные участки общей площадью до 350 км², выполненные на масштабном уровне 1: 1 000–1: 2 000.

ВЫВОДЫ

Созданная виртуальная модель имеет ряд отличий, несвойственных другим продуктам аналогичного типа:

1. В модели использованы мультисезонные снимки (сезоны зима и лето); возможно, позднее будут добавлены осенние снимки. Эта возможность позволяет более детально оценить визуальную составляющую ландшафта в разные сезоны, что важно для обеспечения туристических ожиданий максимально широкого круга посетителей.
2. В модели есть сведения о толщине снегового покрова, причем покрытие носит сплошной характер. Полученные материалы важны не только для проектирования и строительства горнолыжных трасс и подъемников, но и для оценки опасных процессов, а также могут быть полезны рядовым посетителям, желающим получить ответ о возможных районах катания в начале и конце сезона.
3. В модель добавлено полное плотное облако точек класса «Растительность», что потребовало разработки новых инструментов и подходов к оптимизации визуализации при работе со столь сложным и объемным набором пространственных данных.

Новые слои данных, созданные в рамках работы над данной моделью, ее мультимасштабность в сочетании с большой буферной зоной вокруг объектов непосредственного интереса, а также возможность визуализации плотного облака ТЛЮ позволяют пользователям решать старые аналитические задачи на качественно новом уровне, решать новые аналитические задачи (глубина и объемы снега, опасные процессы в летний и зимний периоды и пр.), а также достичь ранее невозможного уровня реализма при визуализации виртуальной среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Капралов Е. Г., Кошкарёв А. В., Тикунов В. С., Основы геоинформатики. Учебное пособие для студентов вузов в 2-х книгах. М.: Академия, 2004. 480 с.

Рыльский И. А., Парамонов Д. А., Кожухарь А. Ю., Терская А. И. Создание виртуальной модели района Большой Сочи – Красная Поляна – плато Лаго-Наки. ИнтерКарто. ИнтерГИС, Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий:

Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2023. Т. 29. Ч. 1. 589–606. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-589-606.

Рыльский И. А., Кожухарь А. Ю., Терская А. И., Создание виртуальных моделей местности при проектировании портовых комплексов по данным лидарной съемки. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 540–555. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-540-555.

Тикунов В. С., Рыльский И. А. Подходы к определению толщины снежного покрова с использованием лазерного сканирования. Геодезия и картография, 2020. № 8. С. 28–41. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-962-8-38-48.

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. DOI: 10.14358/PERS.83.5.343.

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. III International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1997. P. 174–180.

Mukul M., Srivastava V., Jade S., Mukul M. 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. DOI: 10.14358/PERS.83.5.343.

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.

Kapralov E. G., Koshkarev A. V., Tikunov V. S., Fundamentals of geoinformatics. M.: Akademia (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 laserscanning: Principle and applications. III International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1997. P. 174–180.

Mukul M., Srivastava V., Jade S., Mukul M. Uncertainties in the Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) Heights: Insights from the Indian Himalaya and Peninsula. *Scientific Reports*, 2017. P. 1–10.

Rylskiy I. A., Paramonov D. A., Kozhukhar A. Y., Terskaia A. I. Creation of virtual model of the area of Big Sochy – Krasnaia Polyana – Lagonaki plateau. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference*. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2023. V. 29. Part 1. P. 589–606 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-589-606.

Rylskiy I. A., Terskaia A. I., Kozhukhar A. Y. Creation of virtual model of the area of Big Sochy – Krasnaia Polyana – Lagonaki plateau. *InterCarto. InterGIS*, 2022. No. 28. P. 540–555.

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. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-962-8-38-48.

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: 528.852+004.855.5

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-295-305

А. А. Воробьева¹

**ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
МЕТОДОМ СЛУЧАЙНОГО ЛЕСА
И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
БОЛЬШИМИ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ ДАННЫМИ
ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
РЯДОВ ДАННЫХ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ**

АННОТАЦИЯ

В данной статье рассмотрены содержание и результаты работы, посвященной разработке модели машинного обучения, позволяющей осуществить восстановление неполных данных с применением технологий облачных вычислений. Задача рассмотрена на примере исследования, посвященного моделированию данных для восполнения отсутствующих значений вегетационных индексов, основываясь на открытых каталогах данных платформ облачных вычислений. Предложенная методика основана на использовании многолетней периодичной выборки значений вегетационных индексов и обучения модели на больших объемах данных для повышения качества восстановления рядов. Указанный в работе подход позволяет добиться более высокой точности, нежели использование при восстановлении данных классических способов интерполяции, что делает моделируемые значения пригодными для использования при решении различных практических задач. Предложенная в работе методика реализована на примере восстановления значений нормализованного разностного вегетационного индекса, используемого для мониторинга и оценки состояния растительного покрова. В качестве исходных данных использовались массивы значений, полученные из каталогов облачной среды Google Earth Engine, предназначенной для обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли, по территории центральной части Новгородской области. Также, для ускорения процесса обучения модели и увеличения эффективности и производительности, использовались возможности платформы Google Colaboratory, что позволило не применять в исследовании локальные вычислительные мощности и специализированное программное обеспечение. Этот подход может быть адаптирован для восстановления других индексов или разрешения неполноты данных в различных предметных областях, что подчеркивает его универсальность и потенциальное практическое применение.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Google Earth Engine, регрессия, NDVI, Python

¹ Санкт-Петербургский Государственный Университет, Институт наук о Земле, Кафедра картографии и геоинформатики, Менделеевская линия, д. 2, Санкт-Петербург, Россия, 199034,
e-mail: st096985@student.spbu.ru

Anna A. Vorobyeva¹

APPLICATION OF RANDOM FOREST MACHINE LEARNING AND BIG GEOSPATIAL DATA MANAGEMENT SYSTEMS APPLIED TO RECONSTRUCT THE VEGETATION INDEX DATA SERIES

ABSTRACT

This article discusses the content and results of the work devoted to the development of a machine learning model that allows for data incompleteness recovery using cloud computing. The problem is considered using the example of a study devoted to data modeling to fill in missing values of vegetation indices based on open data catalogs of cloud computing platforms. The proposed methodology is based on the use of a multi-year periodic sampling of vegetation index values and model training on large amounts of data to improve the quality of series reconstruction. The approach indicated in the work allows for higher accuracy than using classical interpolation methods for data recovery, which makes the modeled values suitable for use in solving various practical problems. The proposed method is implemented using the example of restoring the values of the Normalized Difference Vegetation Index used for monitoring and evaluating the state of vegetation cover. Arrays of values obtained from the catalogs of the Google Earth Engine cloud environment intended for processing and analyzing data from remote sensing of the Earth (on the territory of the central part of the Novgorod Region) were used as initial data. To accelerate the learning process of the model and increase efficiency and productivity, the capabilities of the Google Colaboratory platform were used, which made it possible not to use local computing capacity and do not use specialized software in the study. This approach can be adapted to reconstruct other indexes or resolve data incompleteness in various subject areas, which emphasizes its versatility and potential practical application.

KEYWORDS: Google Earth Engine, regression, NDVI, Python

ВВЕДЕНИЕ

В области наук об окружающей среде вычисление вегетационных индексов [Черепанов, 2017] является важным методом исследования, мониторинга и оценки динамики и состояния растительного покрова в различных условиях. Но получение полных и корректных данных часто оказывается невозможным из-за преград, связанных с атмосферным воздействием, особенностями датчиков сканирующих систем и сложным взаимодействием факторов окружающей среды. Для осуществления анализа состояния растительного покрова необходимо устранить возникающую неполноту данных. Использование методов машинного обучения [Müller et al., 2016; Sarafanov et al., 2020] позволяет моделировать значения вегетационных индексов, опираясь на многолетнюю статистику, а также на значения релевантных показателей, что способствует повышению точности и надежности восстановления пропусков NDVI² (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс). Машинное обучение включает в себя широкий спектр вычислительных алгоритмов и методов, разработанных таким образом, чтобы модели могли автоматически обучаться и совершенствоваться, получая новую информацию. Практически

¹ Saint-Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, 2, Mendeleevskaya line, Saint Petersburg, 199034, Russia,
e-mail: st096985@student.spbu.ru

² База данных индексных показателей: Index Database. Электронный ресурс:
<https://www.indexdatabase.de/> (дата обращения 17.05.2024)

машинное обучение основано на анализе закономерностей для составления прогнозов или принятия решений.

Однако на сегодняшний день нет универсального решения, позволяющего использовать методы машинного обучения для восстановления данных вегетационных индексов. В настоящей статье рассмотрен подход к решению задачи восстановления данных на примере устранения неполноты данных NDVI, возникающей из-за проблем при получении исходных мультиспектральных снимков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе в качестве исходных данных использовались значения вегетационного индекса для территории центральной части Новгородской области, рассчитанные с помощью коллекций данных облачной платформы Google Earth Engine¹.

Неполнота данных, возникающая при расчете NDVI, может быть обусловлена несколькими факторами, каждый из которых в разной степени зависит от методов, используемых при сборе и обработке данных (рис. 1).

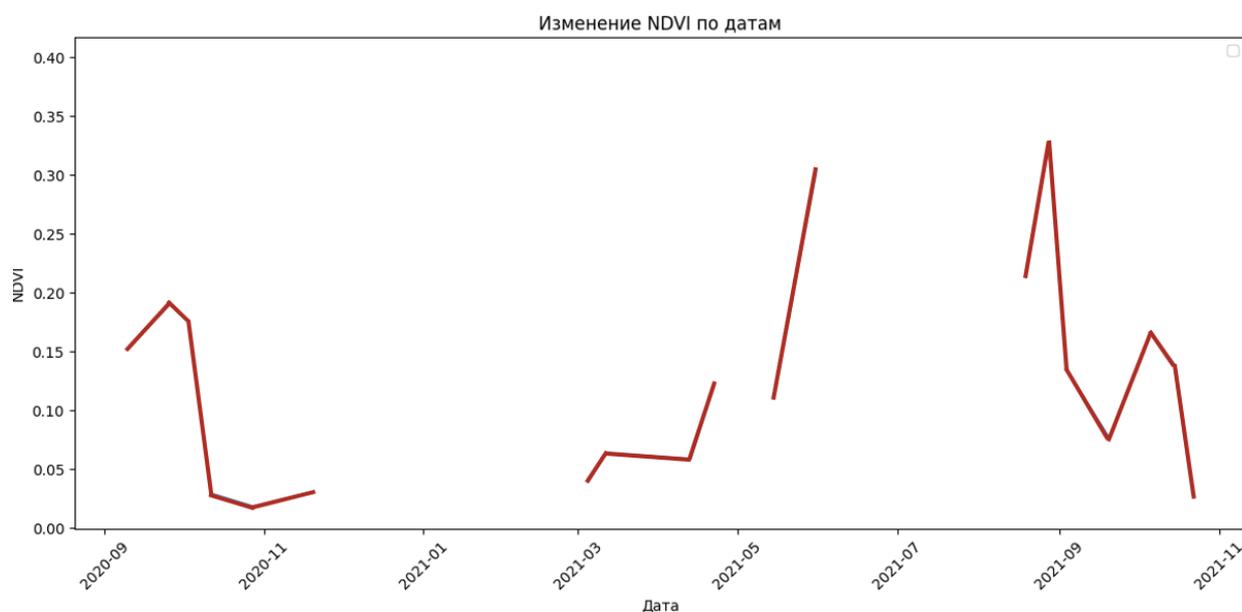


Рис. 1. График NDVI с отсутствующими значениями
Fig. 1. NDVI graph with missed values

Одной из основных причин возникновения неполноты данных является наличие облачного покрова на спутниковых снимках. Облака перекрывают обзор земной поверхности, что приводит к отсутствию полученных исходных данных. Существенным фактором являются также ограничения, связанные с работой датчиков, ошибками калибровки и спектральным разрешением, которые могут привести к получению ошибочных данных или полному их отсутствию. Кроме того, атмосферные помехи, такие как аэрозоли и дымка, искажают получаемые снимки и делают невозможным использование их для расчетов. Фенология растительности [Шнелле, 1961] также влияет на динамику NDVI, вызывая временное отсутствие корректных данных из-за циклов роста растительности и изменений растительного покрова с течением времени. Наконец, методы обработки данных и

¹ Облачный ресурс для обработки данных дистанционного зондирования: Google Earth Engine. Электронный ресурс: <https://earthengine.google.com/> (дата обращения 21.04.2024)

алгоритмы, используемые для расчета индекса, также способствуют неполноте данных в том случае, если они работают некорректно. В совокупности эти факторы подчеркивают трудности, связанные с получением подходящих данных для экологического мониторинга и анализа.

Методы восстановления пропусков [Julien et al., 2019] в данных обычно представляют собой интерполяцию и экстраполяцию для заполнения недостающих значений на основе имеющихся данных. Подобные способы направлены на анализ значений индекса в тех областях, где данные являются неполными. В данном исследовании подход к анализу исходных данных отличался от классического — оценивались данные многолетней выборки [Weigend, 2018; Saad et al., 2020], а не конкретно участки образования пропусков. Восстановление выполнялось с помощью обученной на выборке модели случайного леса [Тараканов, 2023; Hastie et al., 2009; Zhu, 2020]. Для осуществления обучения использовались мощности облачных сервисов [Мордовина, 2012; Бучев и др., 2017] Google: Google Colaboratory (Google Colab)¹ и Google Earth Engine. Google Earth Engine — это облачный сервис, предоставляющий доступ к данным дистанционного зондирования и инструментам для их анализа. Он включает в себя библиотеки данных и редактор кода, что позволяет пользователям создавать различные алгоритмы и программы для обработки данных. Общедоступный каталог данных Google Earth Engine — это большое, непрерывно обновляемое хранилище часто используемых наборов геопространственных данных. В настоящем исследовании взаимодействие с платформой Google Earth Engine осуществлялось через Google Colab. Google Colab — это облачная платформа, разработанная для совместного программирования и анализа данных с использованием Jupyter Notebook² на базе Python³. Она предоставляет бесплатный доступ к графическим (GPU — Graphics Processing Unit) и тензорным процессорам (TPU — Tensor Processing Unit), что делает ее удобным инструментом для решения задач машинного обучения [Pessoa et al., 2018].

Точность алгоритмов для вычисления пропущенных данных является критически важным аспектом обработки и анализа данных. В качестве оценочных метрик в данной работе применялись показатели производительности, используемые для количественной оценки полученных результатов:

1. Среднеквадратичная ошибка (MSE — Mean Squared Error)⁴ — измеряет среднюю разницу между наблюдаемыми и прогнозируемыми значениями, при этом более низкие значения указывают на более высокую точность вычисления.
2. Средняя абсолютная ошибка (MAE — Mean Absolute Error)⁵ — вычисляет среднюю абсолютную разницу между наблюдаемыми и прогнозируемыми значениями, обеспечивая меру точности алгоритма без учета направления ошибок.

¹ Облачный ресурс для работы с Python: Google Colaboratory. Электронный ресурс: <https://colab.research.google.com/> (дата обращения 20.04.2024)

² Пользовательская среда взаимодействия с Python: Jupyter Notebook. Электронный ресурс: <https://jupyter.org/> (дата обращения 20.04.2024)

³ Язык программирования Python: Python. Электронный ресурс: <https://www.python.org/> (дата обращения 13.04.2024)

⁴ Метрика MSE в документации библиотеки Scikit-learn: Scikit-learn documentation. Электронный ресурс: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.mean_squared_error.html (дата обращения 26.03.2024)

⁵ Метрика MAE в документации библиотеки Scikit-learn: Scikit-learn documentation. Электронный ресурс: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.mean_absolute_error.html (дата обращения 26.04.2024)

3. R^2 (коэффициент детерминации)¹ — R^2 количественно определяет долю отклонения в наблюдаемых значениях, которая объясняется расчетными значениями. Более высокое значение (более близкое к единице) R^2 указывает на более высокую эффективность расчета.

Разработанная методика предполагает такие этапы, как:

- 1) получение данных, предобработка, визуализация;
- 2) обучение модели и предсказание;
- 3) оценка точности.

Географическая область, представляющая интерес, определяется с использованием полигональной геометрии с указанием региона для анализа. В данной статье эксперимент по восстановлению значений вегетационных индексов проводился на участке, расположенном в пределах территории Новгородской области. Апробация методики проводилась на территориях, находящихся в Ямало-Ненецком автономном округе и Краснодарском крае. Все участки расположены в различных природных зонах:

- тундровой (остров Белый, Ямало-Ненецкий автономный округ);
- лесной (Новгородская область);
- степной (Усть-Лабинский район Краснодарского края).

Каждый из этих участков имеет свои особенности и преобладающий тип землепользования. Площадь каждого участка составляла порядка 3,5 тыс. га.

Тундровый участок находится на острове Белом, который является частью Ямало-Ненецкого автономного округа. Этот участок характеризуется суровыми климатическими условиями и низкой продуктивностью растительности. Здесь преобладает использование земли под пастбища.

Лесной участок расположен в Новгородской области. Он отличается умеренным климатом и богатым разнообразием растительности. Основными типами землепользования являются сельское хозяйство и лесопользование.

Степной участок находится в Усть-Лабинском районе Краснодарского края. Климат здесь теплый и сухой, а растительность представлена преимущественно злаковыми травами. Земледелие является здесь основным типом землепользования.

Таким образом, выбор рассматриваемых территорий был обусловлен их различными природными условиями и типами землепользования, что позволяет провести более полный анализ эффективности методов восстановления растительности в разных экосистемах. Выбираются коллекции спутниковых снимков Landsat-8 [Schmid, 2017] и Sentinel-2 с примененной атмосферной коррекцией [Pacifi et al., 2014]. Эти коллекции охватывают требуемые временные рамки (в данном исследовании коллекции выбирались за диапазон с января 2015 г. по январь 2023 г.) и географический район. Всего было использовано около 300 снимков, которые имели облачность не более 15 %.

Значения NDVI рассчитываются для каждого изображения в выбранных коллекциях по формуле²:

¹ Метрика R^2 в документации библиотеки Scikit-learn: Scikit-learn documentation. Электронный ресурс: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.r2_score.html (дата обращения 26.04.2024)

² База данных индексных показателей: Index Database. Электронный ресурс: <https://www.indexdatabase.de/> (дата обращения 02.02.2024)

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Средние значения NDVI для исследуемой области извлекаются из каждого изображения. Результаты сохраняются в виде объектов в массиве данных. Полученные значения NDVI обрабатываются и визуализируются с использованием библиотеки Pandas¹ для обработки данных и Matplotlib² для построения графиков (рис. 2).

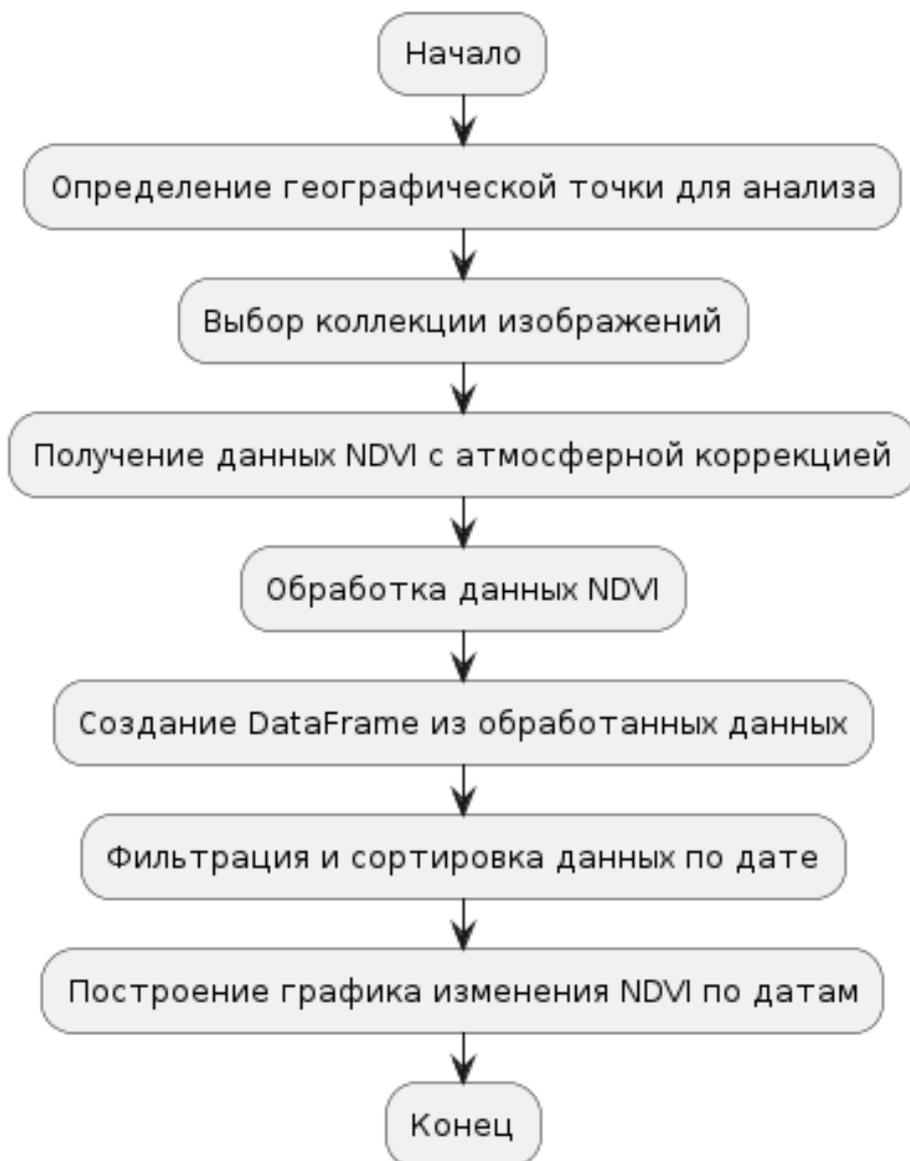


Рис. 2. Схема алгоритма предобработки данных
Fig. 2. Diagram of the data preprocessing algorithm

¹ Документация библиотеки Pandas: Pandas documentation. Электронный ресурс: <https://pandas.pydata.org/docs> (дата обращения 24.03.2024)

² Документация библиотеки Matplotlib: Matplotlib documentation. Электронный ресурс: <https://matplotlib.org/stable/index.html> (дата обращения 22.03.2024)

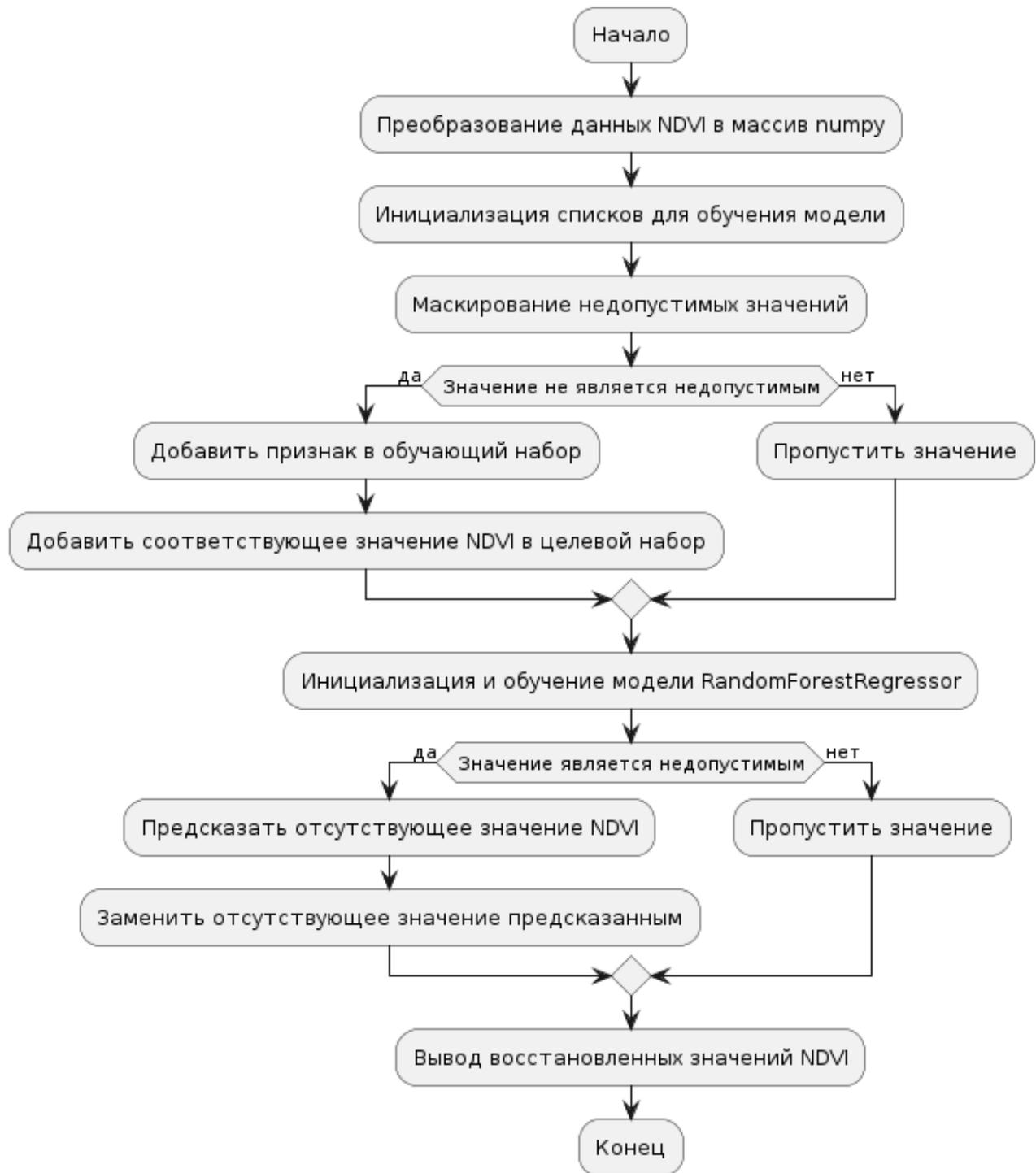


Рис. 3. Схема разработанного алгоритма для предсказания значений
Fig. 3. The scheme of the developed algorithm

Алгоритм (рис. 3) извлекает данные NDVI из массива данных (DataFrame) и преобразует их в массив NumPy¹. Пропущенные значения в данных NDVI обрабатываются с помощью маскированного массива NumPy, чтобы идентифицировать и замаскировать недопустимые (отсутствующие) значения. Допустимые (не пропущенные) точки данных разбиваются на объекты и метки, которые будут использоваться для обучения регрессионной модели случайного леса. Создается экземпляр RandomForestRegressor², и модель обучается с использованием данных объекта и метки. Пропущенные значения в данных NDVI вычисляются с использованием обученной модели. Для каждого отсутствующего значения индекса используется соответствующее значение признака, чтобы предсказать пропущенное значение NDVI и визуализировать его с помощью графика с восстановленными значениями (рис. 4).

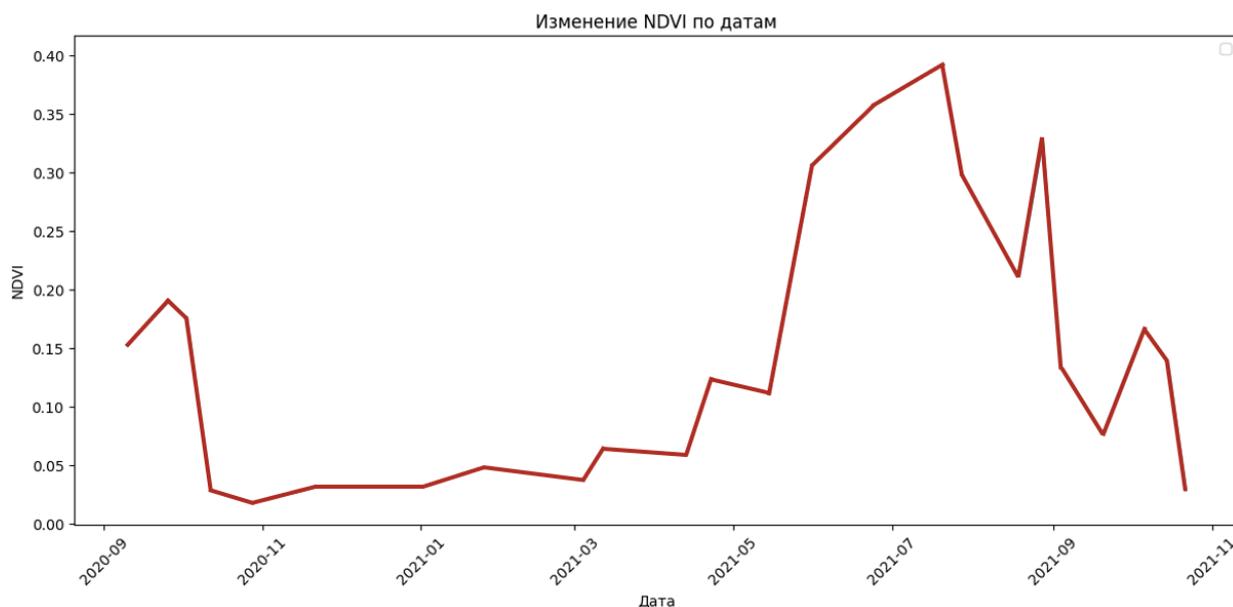


Рис. 4. График NDVI с восстановленными значениями
Fig. 4. NDVI graph with restored values

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эффективность процесса расчета оценивается с использованием таких показателей, как R² (коэффициент детерминации), MAE (средняя абсолютная ошибка) и MSE (средне-квадратичная ошибка).

Коэффициент детерминации измеряет долю отклонения в наблюдаемых значениях, которая объясняется прогнозируемыми значениями. Значение, близкое к 1, указывает на то, что модель объясняет значительную долю изменчивости в наблюдаемых данных, в то время как значение, близкое к 0, указывает на низкую эффективность. В результате данного исследования на примере территории Новгородской области значение R² составляет 0,510. Это говорит о том, что расчетные значения объясняют чуть больше половины вариабельности наблюдаемых данных, а это указывает на умеренную прогностическую

¹ Документация библиотеки NumPy: NumPy documentation. Электронный ресурс: <https://numpy.org/doc/> (дата обращения 06.04.2024)

² Функция RandomForestRegressor в документации библиотеки Scikit-learn: Scikit-learn documentation. Электронный ресурс: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestRegressor.html> (дата обращения 18.04.2024)

эффективность. Средняя абсолютная ошибка (MAE) обеспечивает простую оценку точности алгоритма, при этом более низкие значения указывают на более высокую производительность. Значение MAE, равное 0,081, указывает на то, что в среднем расчетные значения примерно на 0,081 единицы отличаются от наблюдаемых значений. Хотя это значение может показаться небольшим, его следует интерпретировать в контексте данных и конкретных требований приложения. При анализе среднеквадратичной ошибки (MSE) более низкие значения будут указывать на высокую производительность. Значение MSE, равное 0,010, указывает на то, что в среднем квадратичная разница между наблюдаемыми и прогнозируемыми значениями составляет около 0,010. Стоит отметить, что эти расчеты проводились на изначально полных наборах данных, из которых для исследования в случайном порядке удалялись значения. Это позволило получить более объективную оценку точности моделей и минимизировать влияние пропущенных данных на результаты.

Апробация на территориях Ямало-Ненецкого автономного округа и Краснодарского края показала, что разработанный алгоритм имел даже чуть более высокую точность восстановления (чем на тестовом наборе) для более северной территории и чуть более низкую точность для южной территории. Но необходимо учесть, что значения NDVI могут быть ниже в зоне тундр из-за специфических условий окружающей среды. Это может объяснить лучшую точность модели для этой зоны. Тем не менее, важно помнить, что точность модели также зависит от других факторов, таких как качество данных, методы обработки и обучения модели. Сравнение результатов точности производилось на основе коэффициента детерминации, т. к. данная метрика наиболее полно отражает точность полученной модели (табл. 1).

Табл. 1. Оценка точности по результатам дополнительного тестирования
Table 1. Accuracy assessment based on the results of additional testing

Территории тестирования	Метрики оценки точности		
	MSE	MAE	R2
Область на территории Новгородской области	0,081	0,010	0,510
Область на территории Ямало-Ненецкого автономного округа	0,047	0,004	0,542
Область на территории Краснодарского края	0,077	0,011	0,501

ВЫВОДЫ

Предложенная методика может быть применена для оптимизации процессов и повышения качества моделирования данных при использовании временных рядов вегетационных индексов. Она позволяет уменьшить время, затрачиваемое на восстановление отсутствующих значений, а также повысить точность предсказания. В данном исследовании рассмотрено использование временных рядов, которые сами по себе играют решающую роль в точном вычислении пропущенных значений. В ходе исследования удалось явно оценить результативность и итоговую точность предложенного алгоритма восстановления данных, что позволяет оценить его пригодность для решения конкретных задач конечного пользователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бучнев А. А., Пяткин В. П., Пяткин Ф. В. Модель облачной среды для обработки данных дистанционного зондирования Земли. ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении, 2017. № 3. С. 57–61.

Мордовина Д. О. Облачные вычисления в сфере геоинформационных технологий и ДЗЗ. Геоматика, 2012. № 2. С. 9–11.

Тараканов Д. А. Восстановление пропущенных значений в данных гидрометеорологических наблюдений с использованием машинного обучения (на примере реки Белая, Республика Башкортостан). Вестник Евразийской науки, 2023. Т. 15. № 6.

Шнелле Ф. Фенология растений. Ленинград: Гидрометеиздат, 1961. 259 с.

Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning, Data Mining, Inference, and Prediction. Springer, 2009. 746 p.

Julien Y., Sobrino J. A. Optimizing and comparing gap-filling techniques using simulated NDVI time series from remotely sensed global data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019. V. 76. P. 93–111. DOI: 10.1016/j.jag.2018.11.008.

Pacifici F., Longbotham N., Emery W. J. The Importance of physical quantities for the analysis of multitemporal and multiangular optical very high spatial resolution images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014. V. 52. No. 10. P. 6241–6256. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2295819.

Pessoa T., Medeiros R., Nepomuceno T., Bian G., Albuquerque V. H. C., Filho P. P. Performance Analysis of Google Colaboratory as a Tool for Accelerating Deep Learning Applications. IEEE Access, 2018. V. 6. P. 61677–61685. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2874767.

Saad M., Chaudhary M., Karray F., Gaudet V. Machine learning based approaches for imputation in time series data and their impact on forecasting. 2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2020. P. 2621–2627.

Sarafanov M., Kazakov E., Nikitin N. O., Kalyuzhnaya A. V. A machine learning approach for remote sensing data gap-filling with open-source implementation: An example regarding land surface temperature, surface albedo and NDVI. Remote Sensing, 2020. V. 12. Iss. 23. P. 3865. DOI: 10.3390/rs12233865.

Schmid J. N. Using Google Earth Engine for Landsat NDVI time series analysis to indicate the present status of forest stands. 2017. DOI: 10.13140/RG.2.2.34134.14402/6.

Weigend A. S. Time series prediction: forecasting the future and understanding the past. Routledge, 2018. 663 p. DOI: 10.4324/9780429492648.

Zhu T. Analysis on the Applicability of the Random Forest. Journal of Physics: Conference Series, 2020. V. 1607. P. 012123. DOI: 10.1088/1742-6596/1607/1/012123.

REFERENCES

Buchnev A. A., Pyatkin V. P., Pyatkin F. V. Cloud environment model for processing Earth remote sensing data. ITNOU: Information technologies in science, education and management, 2017. No. 3. P. 57–61 (in Russian).

Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning, Data Mining, Inference, and Prediction. Springer, 2009. 746 p.

Julien Y., Sobrino J. A. Optimizing and comparing gap-filling techniques using simulated NDVI time series from remotely sensed global data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019. V. 76. P. 93–111. DOI: 10.1016/j.jag.2018.11.008.

Mordovina D. O. Cloud computing in the field of geoinformation technologies and remote sensing. Geomatics, 2012. No. 2. P. 9–11 (in Russian).

Pacifici F., Longbotham N., Emery W. J. The Importance of physical quantities for the analysis of multitemporal and multiangular optical very high spatial resolution images. IEEE Transactions on

Geoscience and Remote Sensing, 2014. V. 52. No. 10. P. 6241–6256. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2295819.

Pessoa T., Medeiros R., Nepomuceno T., Bian G., Albuquerque V. H. C., Filho P. P. Performance Analysis of Google Colaboratory as a Tool for Accelerating Deep Learning Applications. IEEE Access, 2018. V. 6. P. 61677–61685. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2874767.

Saad M., Chaudhary M., Karray F., Gaudet V. Machine learning based approaches for imputation in time series data and their impact on forecasting. 2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2020. P. 2621–2627.

Sarafanov M., Kazakov E., Nikitin N. O., Kalyuzhnaya A. V. A machine learning approach for remote sensing data gap-filling with open-source implementation: An example regarding land surface temperature, surface albedo and NDVI. Remote Sensing, 2020. V. 12. Iss. 23. P. 3865. DOI: 10.3390/rs12233865.

Schmid J. N. Using Google Earth Engine for Landsat NDVI time series analysis to indicate the present status of forest stands. 2017. DOI:10.13140/RG.2.2.34134.14402/6.

Schnelle F. Plant phenology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1961. 259 p. (in Russian).

Tarakanov D. A. Missing values recovering in hydrometeorological data using machine learning (a case study from the Belaya River, Republic of Bashkortostan). The Eurasian Scientific Journal, 2023. V. 15. No. 6 (in Russian).

Weigend A. S. Time series prediction: forecasting the future and understanding the past. Routledge, 2018. 663 p. DOI: 10.4324/9780429492648.

Zhu T. Analysis on the Applicability of the Random Forest. Journal of Physics: Conference Series, 2020. V. 1607. P. 012123. DOI: 10.1088/1742-6596/1607/1/012123.

А. А. Высоцкая¹, А. А. Медведков^{2,3}, И. С. Кузьмичев⁴

ЛАНДШАФТНО-КАРТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕРРИТОРИИ ЮЖНО-КАМЧАТСКОГО ПРИРОДНОГО ПАРКА (УЧАСТКА ВСЕМИРНОГО ПРИРОДНОГО НАСЛЕДИЯ «ВУЛКАНЫ КАМЧАТКИ»)

АННОТАЦИЯ

Цель статьи — картографирование ландшафтов охраняемой территории Южно-Камчатского природного парка (в будущем — национального парка), являющегося частью кластерного объекта Всемирного природного наследия ЮНЕСКО «Вулканы Камчатки». Эта территория характеризуется слабой изученностью, особенно — в ландшафтном отношении, что делает чрезвычайно актуальной работу по картографированию ландшафтов в столь неоднородных геолого-геоморфологических и природно-климатических условиях. В качестве основы для картографирования ландшафтов использовались: результаты геологической съемки разных лет, ландшафтная карта СССР (ред. А. Г. Исаченко), цифровая модель рельефа ArcticDEM (32 м), авторские материалы, собранные в разных частях парка в ходе летних полевых исследований 2021 и 2022 гг., а также сформированные на всю охраняемую территорию разновременные (летние и осенние за разные годы) мало- и безоблачные мозаики многозональных космических снимков Landsat (30 м) и Sentinel-2 (10 м), которые стали основным источником информации о растительном покрове. В результате получена карта, являющаяся по существу концептуальной схемой районирования. Ландшафтная основа в картографическом виде на рассматриваемую территорию разработана впервые. По результатам проведенной работы территория парка в геолого-географическом отношении дифференцирована на 3 иерархических уровня. На первом уровне на основе анализа морфоструктурных особенностей в пределах парка выделены две области: «1» — восточная, включающая территории без признаков современного вулканизма (прибрежные хребты и низменные равнины) и «2» — западная, представленная территориями, на которых получают развитие процессы вулканической аккумуляции (распространены действующие вулканические аппараты, лавовые плато и вулканические равнины). Далее области подразделяются на районы, представляющие конкретные типы форм рельефа, выделенные на основании сходства процессов, сформировавших их внешний облик. Районы, в свою очередь, дифференцируются на провинции, при выделении которых учитывались типичные и наиболее распространенные растительные сообщества. Полученные результаты в форме их физико-географического анализа и картографического отображения раскрывают основные принципы природно-ландшафтной организации территории парка, являющиеся основой для планирования эколого-туристической, природоохранной и научно-исследовательской деятельности в его пределах.

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: an.vys@yandex.ru

² Институт географии Российской академии наук, Старомонетный пер., д. 29 стр. 4, Москва, Россия, 119017, *e-mail*: a-medvedkov@bk.ru

³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: a-medvedkov@bk.ru

⁴ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: pilot238@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: природное наследие, охраняемые ландшафты, физико-географическое районирование, ландшафтное картографирование, вулканические ландшафты, Юго-Восточная Камчатка

Anna A. Vysotskaya¹, Alexey A. Medvedkov^{2,3}, Ivan S. Kuzmichev⁴

**LANDSCAPE ANALYSIS OF THE SOUTH KAMCHATKA NATURAL
PARK TERRITORY (WORLD NATURAL HERITAGE SITE
“VOLCANOES OF KAMCHATKA”)**

ABSTRACT

The purpose of the article is to map the landscapes of the protected area of the South Kamchatka Natural Park (in the future — the National Park), which is part of the UNESCO World Natural Heritage cluster site “Volcanoes of Kamchatka”. This area is characterized by poor exploration, especially in landscape terms, which makes it extremely relevant to work on mapping landscapes in such heterogeneous geological, geomorphological and climatic conditions. As a basis for mapping landscapes, the following were used: the results of geological surveys of different years, a landscape map of the USSR (ed. by A. G. Isachenko), a digital relief model ArcticDEM (32 m), author’s materials collected in different parts of the park during the summer field studies of 2021 and 2022, as well as formed for the entire protected area multi-temporal (summer and autumn over different years) low- and cloudless mosaics of multi-zone satellite images of Landsat (30 m) and Sentinel-2 (10 m), which have become the main source of information about vegetation. The result is a map that is essentially a conceptual zoning scheme. The landscape basis in cartographic form was developed for the first time for this territory. According to the results of the work carried out, the territory of the park is geologically and geographically differentiated into 3 hierarchical levels. Based on the analysis of morphostructural features within the park, two regions are identified at the first level: “1” — eastern, including territories without signs of modern volcanism (coastal ridges and low-lying plains) and “2” — western, represented by territories where volcanic accumulation processes are developing (active volcanic apparatuses, lava plateaus and volcanic plains). Further, the regions are divided into districts representing specific types of landforms, identified based on the similarity of the processes that formed their appearance. Whereas the districts, in turn, are differentiated into provinces, the allocation of which took into account the typical and most widespread plant communities. The results obtained in the form of their physical and geographical analysis and cartographic display reveal the basic principles of the natural landscape organization of the park territory, which are the basis for planning ecological, tourist, environmental protection and research activities within its boundaries.

KEYWORDS: natural heritage, protected landscapes, physical and geographic regionalization, landscape mapping, volcanic landscapes, South-Eastern Kamchatka

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

² Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 29 build. 4, Staromonetny ln., Moscow, 119017, Russia, *e-mail:* a-medvedkov@bk.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* a-medvedkov@bk.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* pilot238@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на выдающуюся значимость, территория Южно-Камчатского природного парка (ЮКПП) остается одной из наименее изученных на п-ове Камчатка. Имеющиеся в открытом доступе опубликованные и картографические материалы, покрывающие изучаемую территорию, в основном являются мелкомасштабными (ввиду того что они представлены на территорию всего полуострова). Такого рода материалы позволяют получить лишь самую общую характеристику о территории.

Вместе с этим Южно-Камчатский природный парк (имеется в виду доступный в транспортном отношении его северный кластер) является одним из самых привлекательных в туристическом отношении и самых посещаемых ООПТ на Камчатке. Данная тенденция будет только усиливаться, учитывая существующие планы по созданию всесезонного туристического комплекса в долине вулканов Вилучинский, Горелый и Мутновский. Таким образом, один из важнейших вызовов связан со слабой изученностью территории и отсутствием тематических карт, что затрудняет ее использование для целей научно-образовательного и экологического туризма. Данное обстоятельство отражается на качестве информационно-методического обеспечения туризма. Также эта ситуация проявляется и в отсутствии актуальной информации о негативном влиянии туризма на разные вулканические ландшафты и существующих рисках для обеспечения безопасности туристов на действующих маршрутах. Следовательно, высокое разнообразие объектов природного наследия требует проведения их инвентаризации и оценки состояния для реализации мероприятий по охране природы и обеспечения безопасного развития туризма. Эти задачи невозможно реализовать без соответствующей основы в форме природно-ландшафтного районирования. Вопросам разработки этой физико-географической основы, но с учетом региональной специфики и посвящена настоящая статья. Это важнейший этап изучения природы охраняемой территории. В связи с этим мы согласны с тем, что в настоящее время настала необходимость разработки научно-методических основ для регламентации картографического обеспечения ООПТ [Алексеевко, 2019].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Картографические материалы. Наиболее полно рассматриваемая территория изучена в геологическом отношении, поскольку она покрыта геологической съемкой разных лет, о чем свидетельствуют результаты геологического картирования в м-бах 1: 200 000 и 1: 000 000 [Геологическая карта..., 1966, 1981, 1996, 2000; Геолого-экологическая карта..., 2006]. Данные материалы, наряду с научными публикациями по истории развития рельефа Камчатки, использовались авторами на разных этапах работы. Из картографических материалов также отдельного внимания заслуживает ландшафтная карта СССР в масштабе 1: 4 000 000 [1988], составленная под редакцией известного ученого географа-ландшафтоведа А. Г. Исаченко. Эта карта была использована в качестве концептуальной основы для разработки более крупномасштабной схемы районирования. На карте, выполненной под редакцией А. Г. Исаченко, на зонально-ландшафтной основе с привлечением необходимой геолого-геоморфологической информации показаны ареалы геосистем, общая логика выделения которых соотносится с принципами, используемыми нами при разработке схемы районирования на рассматриваемую территорию парка.

Пространственные данные. Рельеф территории анализировался с помощью его цифровой модели (ЦМР) ArcticDEM (32 м), в которой предварительно были исправлены случайные ошибки. На основе ЦМР получены основные морфометрические характеристики на всю территорию парка: уклоны, экспозиция, индекс расчлененности рельефа. Для создания слоя с внутренними водными объектами использованы открытые данные из

OpenStreetMap. Также на всю территорию парка сформированы разновременные (летние и осенние за разные годы) мало- и безоблачные мозаики многозональных космических снимков Landsat (30 м) и Sentinel-2 (10 м), которые стали основным источником данных о растительном покрове. На основе использования указанных снимков проводилась классификация и расчет вегетационного индекса (NDVI). Эти материалы использовались для уточнения границ отдельных растительных сообществ и оценки сезонной динамики растительного покрова. Все используемые для анализа пространственные данные объединены в единую геоинформационную систему, представляющую собой набор тематических слоев на территорию парка в ArcMap.

Материалы полевых исследований и аэровизуального дешифрирования. В ходе знакомства с тематической литературой и результатами обработки данных дистанционного зондирования проектировались маршруты для проведения полевых исследований в разных частях парка с целью сбора фактического материала о ландшафтной структуре его территории. Ведя подготовку к полевым исследованиям, мы опирались на существующие представления о картировании вулканических отложений и вулканических ландшафтов [Быкасов, 1998; Селянгин, 2009; Селянгин, 2016а, 2016б; Németh, Palmer, 2019].

На склонах вулканов Горелый (включая район Лавовых пещер) и Мутновский, а также через пемзовые массивы (Пемзовая и Тарбаганья) были заложены трансекты и проведены ландшафтные описания с учетом имеющегося опыта картографирования геолого-геоморфологической основы ландшафтов [Медведков, 2022]. Трансекты охватили наиболее типичные и интересующие нас урочища. Южная же часть парка была исследована посредством аэровизуального дешифрирования при вертолетном облете, в ходе которого были выполнены остановки (Ходуткинские источники, кальдера вулкана Ксудач, а также в бассейне р. Большая Ходутка) для рекогносцировочного обследования природных комплексов и подготовки ландшафтных описаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Факторы физико-географической дифференциации

Полуостров Камчатка на физической карте мира. Территория парка значительно неоднородна по своим физико-географическим условиям. Это объясняется действием различных факторов дифференциации природной среды. Так, фактором физико-географической дифференциации более высокого уровня является положение рассматриваемого объекта относительно материков и океанов, определяющее энергетическую базу природных комплексов (водно-тепловой баланс на уровне зон и секторные отличия). С указанной позиции территория всего парка (как и полуострова в целом) относится к зоне бореальных лесов умеренного пояса. Важное обстоятельство состоит в том, что рассматриваемая территория находится под сильным влиянием северной части Тихого океана, поэтому вместо хвойных лесов здесь господствуют каменно-березняки, приспособленные к морскому типу климата. В этой части Евразии морской климат характеризуется не только повышенной влажностью воздуха, но и сильными ветрами, а также недостаточной теплообеспеченностью, что заметно проявляется в структуре растительного покрова (рис. 1, табл. 1).

На следующем уровне обособляются наиболее крупные морфоструктуры, определяющие характер (равнинный или горный) ландшафтно-географической зональности (поясности). На более низких иерархических уровнях факторами дифференциации выступают генетический состав поверхностных отложений, экзогенные процессы и растительный покров, формирующие современный облик охраняемых ландшафтов.

Факторы дифференциации физико-географических условий на региональном уровне. Общей закономерностью, как и для всей Камчатки, является меридиональная вытянутость наиболее крупных форм рельефа. Это связано с историей формирования полуострова как части краевой материковой дуги с линейными зонами сжатия и растяжения земной коры, к которым приурочены тектонические разломы. Именно вдоль разломов расположены все вулканические проявления последних 2–3 млн лет, образовавшие аккумулятивные горы и плато [Зеленин, 2017].

Меридионально вытянутые морфоструктурно-обособленные части способствуют формированию региональных климатических различий. Так, с точки зрения климатического районирования [Кондратюк, 1974] территория парка относится к двум районам: южному вулканическому району (от г. Петропавловска-Камчатского и до м. Лопатка) и юго-восточному побережью (равнинные участки). Они отличаются по количеству осадков: на восточных склонах вулканических гор отмечаются максимальные суммы осадков (для всей Камчатки — 2 500 мм/г, на побережье — 1 000–1 500 мм/г), суровостью зимы (на побережье мягче) и силой ветров (в горах часты ураганные ветра).

Внутри своих границ морфоструктуры также неоднородны, подразделяясь на морфоструктуры второго порядка, отличающиеся геологическим строением, историей развития, соответственно, и выраженностью в рельефе. Так, для прибрежных гор типичны хребтовые массивы и отдельные хребты, в широтном направлении чередующиеся с долинами (грабенами), заполненными ледниковыми отложениями. Эти грабенообразные долины открываются в океан узкими бухтами [История развития рельефа..., 1974]. Кроме того, отдельные крупные блоки в пределах прибрежного горста испытывали погружение, что определило формирование в их пределах аккумулятивных равнин (вдоль бухт Ходутка и Вестник).

В области развития вулканизма в этот же период (и ранее, с позднего миоцена-плиоцена) происходили изменения другого рода: постепенное, но неравномерное накопление вулканических отложений, обусловленное разными типами вулканизма. Так, по осевой части крупного опущенного участка земной коры проходит основной региональный разлом северо-восточного направления, к которому приурочены наиболее крупные и длительно действующие вулканические аппараты: Желтовский, Ксудач, Ходутка, Асача, Горелый, Мутновский с лавами преимущественного среднего состава, сформировавшие высокие стратоконусы, частично разрушенные грандиозными (эксплозивными) извержениями (кальдеры Ксудача, Горелого). В западной части парка в конце четвертичного периода активно проявлялся ареальный вулканизм, базальтовые потоки которого осложнены цепочками и группами шлаковых конусов. Основанием для стратоконусов являются более древние разрушенные вулканические постройки щитовых и стратовулканов и обширные поля пирокластического материала [История развития рельефа..., 1974].

Важным дифференцирующим фактором для природных комплексов морфоструктур также стало развитие плейстоценовых оледенений: нижнеплейстоценового, о котором мало что достоверно известно, среднеплейстоценового (достоверные отложения относятся к Центрально-Камчатской депрессии) и верхнеплейстоценовое, проходившее в условиях интенсивных молодых восходящих движений. При этом вулканические конусы, сформированные к началу верхнеплейстоценового оледенения, выступали в качестве его центров, а ледники спускались к подножью и уходили в сторону побережья, часть из них спускалась в океан (м. Опасный – м. Крестовый). Основная роль в формировании современного рельефа принадлежит верхнеплейстоценовому оледенению, полупокровному в 1 стадии и горно-долинному во 2 стадии, оставившего комплексы скульптурных форм рельефа аккумулятивного типа [Леонов, Кобренков, 2003]. Ледниковые отложения частично перекрыты более поздними накоплениями вулканического генезиса. Тем не менее,

большая часть отложений ледникового происхождения сохранилась в пределах крупных депрессий, к которым приурочены долины рр. Прав., Лев. Ходутки, Вестник, что отражено на геологических картах. Здесь сформированы характерные ледниковые равнины с холмисто-западинным рельефом и плоские террасы на водно-ледниковых отложениях, а также конечно-моренные комплексы в устьях троговых долин. Также для прибрежных хребтов типичны формы рельефа ледниково-экзарационного типа (цирки, троговые долины).

Природно-ландшафтная структура территории

Южно-Камчатский природный парк расположен в юго-восточной части Камчатского п-ова, которая относится к Камчатскому сегменту Курило-Камчатской островодужной системы [Селянгин, 2016а]. Его территория находится в пределах двух субмеридионально вытянутых морфоструктур — области вулканической аккумуляции, приуроченной к грабенообразной депрессии с активным развитием вулканизма и Берегового хребта, представляющего собой горст-антиклинорий [История развития рельефа..., 1974]. Таким образом, на самом верхнем уровне физико-географической дифференциации территория парка подразделяется на две области: 1) *территории вне современного вулканизма* — это восточная часть ЮКПП и 2) *территории, с преобладанием процессов вулканической аккумуляции* — это западная часть ЮКПП (табл. 1 и рис. 1). Граница между этими двумя областями проходит по разломной зоне между грабен-синклиналью, характерной для западной части природного парка и горст-антиклиналью, типичной для его восточной части.

Восточная часть парка, в пределах области, не имеющей признаков развития современного (QII–IV) вулканизма, подразделяется на два района: *прибрежных низкогорных вулканогенно-денудационно-тектонических хребтов* и *низменных аккумулятивных равнин* (табл. 1, рис. 1).

Прибрежные хребты вытянуты вдоль побережья Тихого океана и имеют вид низкогорных (до 1 000–1 200 м) крутосклонных субширотных хребтов (№№ 111 и 112, табл. 1 и рис. 1). Хребты сложены олигоцен-неогеновыми вулканогенно-осадочными породами (туфогенные песчаники, туффиты, туфобрекчии, конгломераты, алевролиты, базальты и др.) олигоцен-неогенового возраста, прорванные интрузивными образованиями гранитоидов [История развития рельефа..., 1974]. Горные хребты расчленены многочисленными узкими долинами, заложенными по грабенам со следами ледниковой моделировки. Для долин типичны плоские днища, при выходе к океану они часто заболочены (№ 113, табл. 1 и рис. 1).

В пределах северного кластера ЮКПП растительный покров береговых хребтов представлен преимущественно стланиками. Ольховник покрывает незаболоченные днища, а в нижних частях склонов может образовывать смешанные с каменной березой, произрастающей вплоть до 200–250 м, растительные ассоциации. Кедровник произрастает в верхних частях склонов и на гребнях хребтов. Как отмечает В. Ю. Нешатаева [2009], ольховники предпочитают влажные наветренные восточные склоны, тогда как кедровники тяготеют к более сухим экотопам. В южном кластере нижние части склонов хребтов покрыты каменно-березовыми лесами, которые выше по склону (на высотах — 300–350 м) сменяются кедровниками, местами образующими практически сплошной стланиковый покров, и отундровелыми альпийскими лугами.

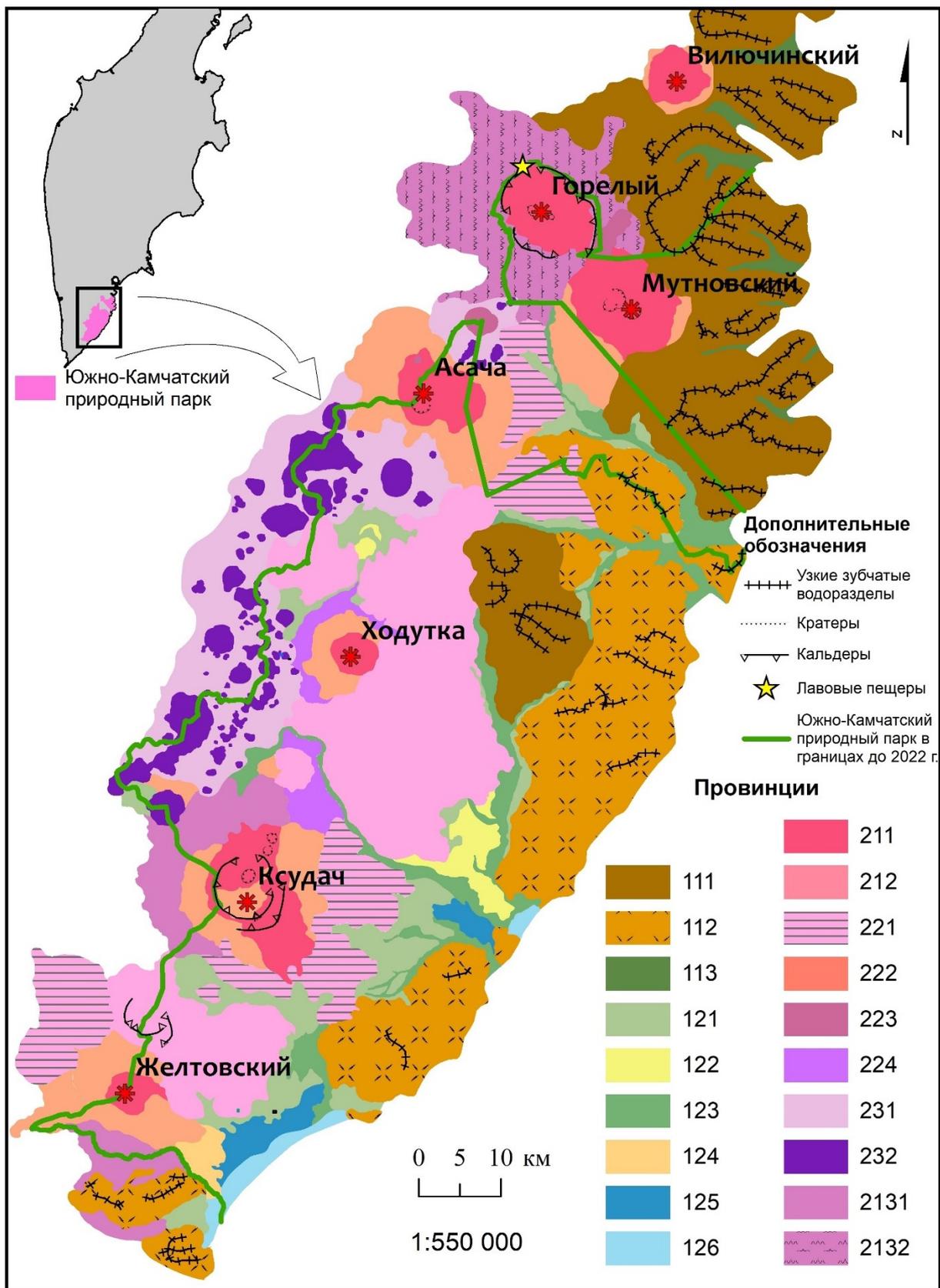


Рис. 1. Природно-ландшафтное районирование Южно-Камчатского природного парка
 Fig. 1. Natural landscape zoning of the South Kamchatka Natural Park

Табл. 1. Легенда к карте природно-ландшафтного районирования Южно-Камчатского природного парка
 Table 1. Legend to the map of natural landscape zoning of the South Kamchatka Natural Park

Области вне пределов современного вулканизма	
Районы	<p><i>Прибрежных низкогорных вулканогенно-денудационно-тектонических хребтов, сложенных вулканогенно-осадочными и интрузивными породами</i></p> <p><i>Низменных аккумулятивных равнин на четвертичных рыхлых отложениях</i></p>
Провинции	<p>Расчлененных крутых склонов и острых зубчатых водоразделов вулканогенно-тектонических гор с ледниковой экзарацией под ольхово-стланиковыми сообществами с участием каменно-березняков на конусах выноса и горных тундр на наиболее высоких вершинах (111)</p> <p>Ледниковые равнины (холмисто-увалистый и западинный рельеф моренного типа) под каменно-березняками, отундровельными лугами и группировками кедрового стланика (121)</p>
	<p>Эрозионно-расчлененных денудационно-тектонических низкогорных массивов под каменно-березняками и ольхово-стланиковыми сообществами с участием кедрового стланика (112)</p> <p>Водно-ледниковых пологих террасированных равнин под каменно-березняками, отундровельными лугами и группировками кедрового стланика (122)</p>
	<p>Плоских днищ троговых долин с пойменными лесами (ивняки, ольшаники) и высокотравными лугами (113)</p> <p>Аллювиальных равнин (речные долины) с ивняками, ольшанниками и лугами (123)</p>
	<p>Пологонаклонных равнин на пролювиальных конусах выноса вулканов под каменно-березняками (124)</p> <p>Озерно-болотных комплексов плоских водоразделов на размытых ледниковых и водно-ледниковых отложениях (с болотами типа аапа) (125)</p> <p>Аллювиально-морских равнин с высокими береговыми валами с разреженными галофитными лугами, переходящими при удалении от побережья в приморские тундры, кедрово-стланиковые заросли и каменно-березняки (126)</p>

Области преимущественно вулканической аккумуляции			
Районы	<i>Крупных длительно действующих вулканических аппаратов</i>	<i>Лавовых плато и вулканических останцов</i>	<i>Высоких вулканических равнин, осложненных шлаковыми конусами (область четвертичного ареального вулканизма)</i>
Провинции	Крутых сильно расчлененных верхних частей склонов стратоконусов и крупных кальдер с горно-тундровыми сообществами на пирокластических отложениях, подстилаемых лавами, гляциально-нивальной обработкой и голыми скалами (211)	Древних лавовых плато с крутыми расчлененными уступами и плоскими вершинными поверхностями с зарослями ольхового, местами кедрового стланика и участием каменно-березняков в нижних частях склонов (221)	Холмисто-грядовых (следы лавовых потоков) равнин под каменно-березняками и лугами (231)
	Пологих и покатых расчлененных нижних частей склонов стратоконусов с зарослями ольхового, местами кедрового стланика и каменно-березняками, с участками открытых пирокластических отложений (212)	Крутых внутренних и покатых внешних склонов подковообразных останцов плейстоценовых щитовых и стратовулканов под каменно-березняками (нижние части склонов), сообществами ольхового стланика с участием кедрового стланика и горных тундр, с выходами коренных пород на вершинах (222)	Шлаковых конусов и мелких щитовых вулканов с покровом ольхового стланика и участием кедрового стланика, местами у подножий с каменно-березняками (232)
	Пологонаклонных пирокластических плато подножий вулканов, расчлененных оврагами и временными водотоками — ингимбритовые под горными тундрами (2231); пемзовые и пемзотуфовые под каменно-березняками и стланиками (2132)	Крутосклонные экструзивные купола и конусы потухших вулканов с горными тундрами и нивальной моделировкой (223)	
		Пологонаклонные конусы выноса пролювиального материала у подножий вулканов под стланиками (224)	

Межгорные депрессии, к которым приурочены бассейны рр. Большой и Малой Ходутки и р. Вестник, типичны исключительно для южной части ЮКПП (между вулканическим «пьедесталом» со стратовулканами Ходуткой и Ксудачом и прибрежными хребтами). В рельефе они представлены обширными пониженными (до 100 м) равнинами — ледниковыми холмисто-западинными и выположенными водно-ледниковыми и аллювиальными, часто террасированными (№№ 121, 122, 123, 125, табл. 1 и рис. 1). Разные типы равнин сменяют друг друга при движении от окружающих хребтов и вулканических построек к центру депрессии и далее в сторону побережья [История развития рельефа..., 1974]. В примыкающих к вулканическим постройкам участках депрессий на пролювиальных шлейфах располагаются пологонаклонные равнины под каменно-березовыми лесами (№ 124, табл. 1 и рис. 1). Вдоль морского берега в приустьевой зоне рек формируются аллювиально-морские равнины с постепенно зарастающими береговыми валами высотой до 1,5–2 м, вытянутыми параллельно на 1,5–3 км вглубь берега (№ 126, табл. 1 и рис. 1). Растительный покров равнин и низменностей характеризуется высокой мозаичностью — каменно-березняки, расположенные на более дренированных возвышенных участках, отмечаются и отдельные группировки кедрового стланика, отундровелые разнотравно-злаковые луга с кустарниками и мелкоосоковые болота; по-видимому, это болота-аапа. Данные гидроморфные образования особого типа были описаны на территории соседнего ООПТ — Южно-Камчатского федерального заказника [Нешатаева, 2001, 2009], но на территории ЮКПП они нами отмечены впервые. Эти болотные массивы занимают плоские или слабовыпуклые водоразделы, перекрытые покровными ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями.

Западная часть парка, представленная областью преимущественно вулканической аккумуляции, подразделяется на три района: *крупных длительно действующих вулканических аппаратов; лавовых плато и вулканических останцов; высоких вулканических равнин, осложненных шлаковыми конусами* (табл. 1 и рис. 1).

Западная часть парка расположена в пределах Южно-Камчатской грабен-синклинали, имеющей северо-восточное простирание (с размерами 170 км на 100 км), она перекрыта верхне-плиоцен-четвертичными вулканическими отложениями. Вдоль разломной зоны в восточном борту грабен-синклинали линейно расположены крупные вулканы центрального типа — Желтовский, Ксудач, Ходутка, Асача и Желтый, Мутновский и Горелый. В западной, тыловой, части грабен-синклинали получил широкое развитие трещинный и ареальный базальтовый вулканизм (№№ 231, 232, табл. 1 и рис. 1), где формируется специфичный вид полого-холмистых лавовых равнин с цепочками небольших вулканов исландского типа и шлаковых конусов правильной формы высотой 300–700 м [История развития рельефа..., 1974].

В настоящее время область развития вулканогенно-аккумулятивного рельефа представляет собой обширное нагорье с двухъярусным строением: вулканический «пьедестал» — лавовые плато (№№ 221, 2231, 2132, табл. 1 и рис. 1), останцы разрушенных плейстоценовых стратовулканов (№ 222, табл. 1 и рис. 1) и расположенные в его пределах вулканические постройки (№№ 211, 212, табл. 1 и рис. 1), шлаковые конусы, экструзивные купола (№ 223, табл. 1 и рис. 1).

На участках лавовых плато, расположенных ниже 300–350 м, распространены каменно-березовые леса, выше — на приподнятых поверхностях плато, склонах вулканов и шлаковых конусов произрастает ольховый стланик (до 800–1 000 м)¹. Выше, начиная с 800–900 м, на лавовых плато и склонах вулканов стланиковый пояс постепенно сменяется

¹ USGS Earth Explorer. Электронный ресурс: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 27.09.2022)

альпийским, при этом в интервале абсолютных высот от 800 до 1 000–1 400 м образуется экотон, в котором стланики постепенно вытесняются горными тундрами с водораздельных поверхностей на склоны эрозионных форм. Выше, вплоть до высоты 1 000–1 400 м, распространен альпийский пояс, представленный сочетанием горно-луговой и горно-тундровой растительности. Средние части склонов и привершинные участки конусов вулканов лишены (или практически лишены) растительного покрова и относятся к гольцовому и нивально-гляциальным поясам.

ВЫВОДЫ

По итогам проведенного исследования разработана природно-ландшафтная основа охраняемой территории, представленная в картографическом виде в форме схемы районирования. Схема подчеркивает индивидуальные особенности отдельных групп природных комплексов на территории парка. При типизации природных комплексов особое внимание отводилось рассмотрению их геолого-геоморфологической основы и анализу важнейших этапов ее формирования, являющихся мощнейшими факторами ландшафтообразования, что является типичной особенностью для геодинамически активных районов планеты. Влияние фактора геолого-геоморфологической основы ощутимо и при оценке устойчивости природных комплексов к рекреационным нагрузкам [Кузьмичев и др., 2023; Кузьмичев, Медведков, 2024]. Так, в условиях горного рельефа и широкого распространения рыхлых пирокластических отложений, легко поддающихся разрушению при механическом воздействии, фактор геолого-геоморфологической основы становится особенно важным при решении геоэкологических задач.

Разработанная легенда включает 3 иерархических уровня. На первом уровне, базируясь на анализе морфоструктурных особенностей, производится разделение на области, отражающие самые общие различия в природных условиях парка. Далее, на втором уровне (в пределах природных областей выделяются отдельные районы), на этом этапе дифференциации во внимание принимались геолого-геоморфологические особенности внутри историко-генетических общностей: а) прибрежных хребтов (вне современного вулканизма) и б) территорий с современным вулканизмом. Затем районы подразделялись на провинции, для обособления которых учитывались типичные и наиболее распространенные растительные сообщества, а также редкие и уникальные ландшафты.

Таким образом, полученный результат в картографическом виде является основой для ландшафтного анализа территории парка, что необходимо для планирования научной и природоохранной деятельности в его пределах. Нельзя не отметить, что несмотря на недостаточную изученность северного кластера ЮКПП, значительно меньшей изученностью характеризуется его южный кластер. В этой связи хотелось бы предостеречь от исключительного использования открытых пространственных данных для дальнейшего совершенствования ландшафтной основы территории. Имеющийся у авторов опыт показывает [Высоцкая, Медведков, 2023], что успешное использование открытых геопропространственных данных для создания тематических карт должно сочетаться с привлечением результатов полевых исследований, выполненных на территориях с высокой репрезентативностью ландшафтов. Представляется, что результаты анализа геопропространственных данных создают лишь первичную основу для дальнейших исследований; также они могут помочь в экстраполяции результатов полевых исследований (при условии выявления межкомпонентных связей). Совершенно очевидно, что на территории парка требуются дальнейшие геологические, почвенно-геоботанические и ландшафтные (с учетом вулканической специфики) исследования, учитывающие физико-географическую дифференциацию охраняемых геосистем, основные особенности которых показаны в картографическом виде (рис. 1) и рассмотрены в табличной форме (табл. 1).

БЛАГОДАРНОСТИ

Сбор данных, их первичная обработка и картографирование выполнены в рамках Госзадания географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова «Анализ региональных геоэкологических проблем в условиях глобальных изменений окружающей среды» (№ 121040100322-8). Разработка концептуальных основ картографирования и анализ природно-ландшафтной структуры охраняемой территории выполнены в рамках Госзадания Института географии РАН «Биотические, географо-гидрологические и ландшафтные оценки окружающей среды для создания основ рационального природопользования» (FMWS-2024-0007).

ACKNOWLEDGEMENTS

Data collection, their primary processing and mapping were carried out within the framework of the State Task of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University “Analysis of regional geoecological problems under global environmental change” (No. 121040100322-8). The development of the conceptual foundations of mapping and analysis of the natural landscape structure of the protected area were carried out within the framework of the State Task of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences “Biotic, geographic-hydrological and landscape assessments of the environment to provide a framework for sound environmental management” (FMWS-2024-0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеевко Н. А. Актуальные вопросы картографического обеспечения особо охраняемых природных территорий России. *Геодезия и картография*, 2019. Т. 80. № 1. С. 13–23. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-943-1-00-00.

Быкасов В. Е. Вулканогенез и антропогенез: проблемы сравнительного сопоставления. *Известия РАН. Серия географическая*, 1998. № 3. С. 62–68.

Высоцкая А. А., Медведков А. А. Информационные ресурсы для оценки экологического потенциала геосистем. *ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф.* М.: Географический факультет МГУ, 2023. Т. 29. Ч. 1. С. 20–33. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-20-33.

Геологическая карта и карта полезных ископаемых дочетвертичных образований: М-57-II, III. Геологическая карта и карта полезных ископаемых. Западно-Камчатская серия. Масштаб: 1: 200 000, серия: Западно-Камчатская. Камчатское геологическое управление, 1966.

Геологическая карта: N-57-XXXII (сопка Опала). Государственная геологическая карта СССР. Западно-Камчатская серия. Масштаб: 1: 200 000, серия: Западно-Камчатская. Петропавловск-Камчатский: Камчатгеология, 1981.

Геологическая карта: N-57-XXXIII (Сопка Мутновская). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Южно-Камчатская серия. Масштаб: 1: 200 000, серия: Южно-Сахалинская. Петропавловск-Камчатский: Камчатгеология, 1996.

Геолого-экологическая карта: N-57 (Петропавловск-Камчатский). Серия Корякско-Курильская. Эколого-геологическая карта. Третье поколение. Масштаб: 1: 1 000 000, серия: Корякско-Курильская. Петропавловск-Камчатский, СПб.: Камчатгеология, ВСЕГЕИ, 2006.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 200 000. Серия Южно-Камчатская. Листы N-57-XXI (северные Коряки), N-57-XXVII (Петропавловск-Камчатский), N-57-XXXIII (сопка Мутновская). Объяснительная записка. М., 2000. 302 с.

Зеленин Е. А. Позднечетвертичные деформации Южной Камчатки. Вестник КРАУНЦ, Науки о Земле, 2017. № 3. Вып. 35. С. 103–111.

История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. Книга 9. Камчатка, Курильские и Командорские острова. М.: Наука, 1974. 439 с.

Кондратьев В. И. Климат Камчатки. М.: Гидрометеиздат, 1974. 204 с.

Кузьмичев И. С., Медведков А. А. Проблемы охраны вулканических ландшафтов на юге криолитозоны в условиях развития стихийного туризма. Вулканизм и связанные с ним процессы: XXVII ежегодная научная конференция, посвященная Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2024. С. 292–295.

Кузьмичев И. С., Медведков А. А., Скроб П. В. Развитие процессов овражной эрозии в вулканических ландшафтах природного парка «Ключевской». Географическая среда и живые системы, 2022. № 3. С. 44–59. DOI: 10.18384/2712-7621-2022-3-44-59.

Ландшафтная карта СССР, масштаб 1: 4 000 000. М.: ГУГК СССР, 1988.

Леонов В. Л., Кобренков Д. В. Основные закономерности распространения ледников последнего верхнеплейстоценового оледенения Камчатки. Вестник КРАУНЦ, Науки о Земле, 2003. № 1. С. 74–85.

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.

Нешатаева В. Ю. Растительность полуострова Камчатка. М.: КМК, 2009. 537 с.

Нешатаева В. Ю., Нешатаев В. Ю. Растительность болот Южно-Камчатского федерального заказника. Растительность России, 2001. Вып. 2. С. 58–70.

Селянгин О. Б. К вулканам Мутновский и Горелый. Вулканогеологический и туристический путеводитель. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2009. 108 с.

Селянгин О. Б. Строение, вещество и близповерхностные магматические очаги вулканов Мутновский и Горелый (Мутновский геотермальный район, Камчатка). I. Геологическое положение вулканов. Горный информационно-аналитический бюллетень, 2016а. № 31. С. 348–363.

Селянгин О. Б. Строение, вещество и близповерхностные магматические очаги вулканов Мутновский и Горелый (Мутновский геотермальный район, Камчатка). II. Вулкан Мутновский. Горный информационно-аналитический бюллетень, 2016б. № 31. С. 365–395.

Németh K., Palmer J. Geological mapping of volcanic terrains: Discussion on concepts, facies models, scales, and resolutions from New Zealand perspective. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2019. V. 385. P. 27–45. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2018.11.028.

REFERENCES

Alexeenko N. A. Topical issues of cartographic support of specially protected natural areas of Russia. Geodesy and Cartography, 2019. V. 80. No. 1. P. 13–23 (in Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2019-943-1-00-00.

Bykasov V. E. Volcanogenesis and anthropogenesis: problems of comparative coexistence. Izvestia RAN. Seriya Geograficheskaya (News of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series), 1998. No. 3. P. 62–68 (in Russian).

Geological-ecological map: N-57 (Petropavlovsk-Kamchatsky). Koryak-Kuril series. Ecological

and geological map. Third generation. Scale: 1: 1 000 000, series: Koryak-Kuril. Petropavlovsk-Kamchatsky, St. Petersburg: OJSC “Kamchatgeologiya”, FGBU “VSEGEI”, 2006 (in Russian).

Geological map and mineral map of pre-Quaternary formations: M-57-II, III. Geological map and mineral map. West Kamchatka series. Scale: 1: 200 000, series: West Kamchatka. Kamchatka Geological Department, 1966 (in Russian).

Geological map: N-57-XXXII (Opal Hill). State geological map of the USSR. West Kamchatka series. Scale: 1: 200 000, series: West Kamchatka. Petropavlovsk-Kamchatsky: OJSC “Kamchatgeology”, 1981 (in Russian).

Geological map: N-57-XXXIII (Mutnovskaya Sopka). State geological map of the Russian Federation. South Kamchatka series. Geological map. Scale: 1: 200 000, series: Yuzhno-Sakhalinskaya. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatgeology, 1996 (in Russian).

History of the development of the relief of Siberia and the Far East. (V. 9) Kamchatka, Kuril and Commander Islands. Moscow: Nauka, 1974. 439 p. (in Russian).

Kondratyuk V. I. Climate of Kamchatka. Moscow: Gidrometeoizdat, 1974. 204 p. (in Russian).

Kuzmichev I. S., Medvedkov A. A. Problems of protecting volcanic landscapes in the south of the permafrost zone in the context of the development of spontaneous tourism. Volcanism and related processes: XXVII annual scientific conference dedicated to Volcanologist Day. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS, 2024. P. 292–295 (in Russian).

Kuzmichev I. S., Medvedkov A. A., Skrob P. V. Development of ravine erosion processes in the volcanic landscapes of the Klyuchevskoy natural park. Geographical Environment and Living Systems, 2022. No. 3. P. 44–59 (in Russian). DOI: 10.18384/2712-7621-2022-3-44-59.

Landscape map of the USSR, scale 1: 4 000 000. Moscow: The Main Directorate of Geodesy and Cartography USSR, 1988 (in Russian).

Leonov V. L., Kobrenkov D. V. The main regularities in the glacier distribution of the last late pleistocene glaciation, Southeast Kamchatka. Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle (Bulletin of Kamchatka Regional Association “Educational-Scientific Center”. Earth Sciences), 2003. No. 1. P. 74–85 (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. Part 1. P. 78–90 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-78-90.

Németh K., Palmer J. Geological mapping of volcanic terrains: Discussion on concepts, facies models, scales, and resolutions from New Zealand perspective. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2019. V. 385. P. 27–45. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2018.11.028

Neshataeva V. Yu. Vegetation of the Kamchatka Peninsula. Moscow: KMK, 2009. 537 p. (in Russian).

Neshataeva V. Yu., Neshataev V. Yu. Vegetation of the swamps of the South Kamchatka Federal Nature Reserve. Vegetation of Russia, 2001. Iss. 2. P. 58–70 (in Russian).

Selyangin O. B. To the volcanoes Mutnovsky and Gorely. Volcanological and tourist guide. Petropavlovsk-Kamchatsky: New Book, 2009. 108 p. (in Russian).

Selyangin O. B. Structure, substance and near-surface magma chambers of the Mutnovsky and Gorely volcanoes (Mutnovsky geothermal region, Kamchatka). I. Geological position of volcanoes. Mountain Information and Analytical Bulletin, 2016a. No. 31. P. 348–363 (in Russian).

Selyangin O. B. Structure, substance and near-surface magma chambers of the Mutnovsky and Gorely volcanoes (Mutnovsky geothermal region, Kamchatka). II. Mutnovsky Volcano. Mountain Information and Analytical Bulletin, 2016b. No. 31. P. 365–395 (in Russian).

State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 200 000. South Kamchatka series. Sheets N-57-XXI (northern Koryaks), N-57-XXVII (Petropavlovsk-Kamchatsky), N-57-XXXIII (Mutnovskaya Hill). Explanatory letter. Moscow, 2000. 302 p. (in Russian).

Vysotskaya A. A., Medvedkov A. A. Information resources for assessing the environmental potential of geosystems (on the example of the territory of the Yenisei North). InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2023. V. 29. Part 1. P. 20–33 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-20-33.

Zelenin E. A. Late quaternary deformations of Southern Kamchatka. Bulletin of Kamchatka regional association “Educational-scientific center”. Earth sciences, 2017. No. 3. Iss. 35. P. 103–111 (in Russian).

УДК: 912.4

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-321-341

А. П. Красовский¹

БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЙ В ТОПОНИМИКЕ И ИСТОРИИ МЕЖЕВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

Предлагаются методические подходы к использованию инструмента «Большие данные» для анализа материалов XVI–XVIII вв. с целью изучения особенностей образования и изменений названий имущественных объектов, используемых в документах и на картографических материалах. Апробация инструмента выполнена на модели данных, представляющей собой малую выборку сведений о 22 малых сельских поселениях и землевладениях, а также об их владельцах, историю которых оказалось возможным проследить, начиная со второй половины XVI в. Исследования выполнены для объектов, располагавшихся на территории, оформившейся к началу XX в. в Рузский уезд Московской губернии. Сведения об объектах исследования были извлечены из писцовых книг, описаний землевладений, картографических материалов, книг Патриаршего Казенного Приказа, окладных книг, документов, удостоверяющих факты перехода имущества, и прочих материалов. Выполнена оценка адекватности отражения свойств объектов исследований сформированной выборкой данных. Осуществлен выбор оптимальной для демонстрации возможностей рассматриваемого инструмента формы представления анализируемых сведений. Продемонстрирована последовательность выполнения анализа имеющейся информации. Представлены результаты анализа разнообразных исторических сведений. Совпадение части полученных результатов с таковыми полученными ранее иными специалистами показало принципиальную пригодность инструмента «Большие данные» для выполнения исследований в областях топонимики и истории межевания. Полученные конкретные результаты и использованные для выполнения исследований сведения могут быть востребованы историками, социологами, экономистами и иными специалистами, изучающими историю развития, межевания и картографирования Рузского уезда в XVI–XVIII вв. Сделанные по ходу выполнения исследования заключения о причинах, приводивших к изменениям названий одних объектов и устойчивости других, могут быть интересны специалистам, работающим в областях истории, географии, картографии и топонимики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Большие данные, Рузский уезд, документы Русского государства XVI–XVIII вв., малые сельские поселения, названия объектов недвижимого имущества

Anton P. Krassowski²

BIG DATA AS A RESEARCH TOOL IN TOPONYMY AND THE HISTORY OF LAND SURVEYING

ABSTRACT

Methodological approaches to the use of the Big Data tool for the analysis of materials from the XVI–XVIII centuries are proposed in order to study the features of formation and changes in the names of property objects used in documents and cartographic materials. The tool was tested

¹ Государственный университет по землеустройству, факультет землеустройства и управления природопользованием, ул. Казакова, д. 15, Москва, Россия, 105064, *e-mail*: anton.krass@gmail.com

² State University of Land Use Planning, Faculty of Land Use Planning and Environmental Management, 15, Kazakova str., Moscow, 105064, Russia, *e-mail*: anton.krass@gmail.com

on a data model representing a small sample of information about 22 small rural settlements and landholdings, as well as about their owners whose history has been possible to trace since the second half of the XVI century. The research was carried out for objects located on the territory that was formed by the beginning of the XX century in the Ruza district of the Moscow province. Information about the objects of the research was extracted from scribal books, descriptions of land holdings, cartographic materials, books of the Patriarchal State Order, salary books, documents certifying the facts of the transfer of property and other materials. An assessment of the adequacy of the reflection of the formed sample of these properties of research objects has been performed. The choice of the form of presentation of the analyzed information is optimal for demonstrating the capabilities of the considered tool. The sequence of the analysis of the available information is demonstrated. The results of the analysis of various historical information are presented. The coincidence of some of the results obtained with those obtained earlier by other specialists showed the fundamental suitability of the Big Data tool for conducting research in the fields of the place-name study and the history of surveying. The specific results obtained and the information used to carry out research can be in demand by historians, sociologists, economists and other specialists studying the history of development, surveying and mapping of the Ruza district of the XVI–XVIII centuries. Conclusions made during the course of the research on the reasons that led to changes in the names of some objects and the stability of others may be of interest to specialists working in the fields of history, geography, cartography and the place-name study.

KEYWORDS: Big Data, Ruzsky district, documents of the Russian state of the XVI–XVIII centuries, small rural settlements, names of real estate objects

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение исследований в области топонимики традиционно основывается на анализе сведений о расположенных на местности объектах. Источниками этих сведений традиционно являлись либо исторические материалы, либо сведения, получаемые в результате экспедиционных работ посредством опросов местных жителей по тематике исследования. Обработка и анализ собранных сведений является весьма кропотливой работой и требуют от ее исполнителя предельного внимания и наличия своеобразной интуиции, способной подсказать ему существование взаимосвязей между объектами исследования. Результатами работ в области топонимики являлись, например, словари географических названий, топонимические словари и иные произведения [Витов, 1967; Мурзаев, 1984; Поспелов, 2008]. В них, в частности, содержатся ответы на вопросы: что было положено в основу названий различных объектов? каким образом эти названия были образованы? какие названия сохраняли устойчивость во времени, а какие изменялись?

Может сложиться впечатление, что ответы на все интересующие вопросы уже получены и представлены в соответствующих публикациях. Однако, занимаясь изучением жизни Русского общества XVI–XIX вв., все же можно задаться, например, и следующими вопросами: *почему* названия некоторых объектов изменялись с течением времени, а других нет? *почему* в, казалось бы, одинаковых условиях названия одних объектов оставались неизменными, а другие изменялись? Ответов на эти вопросы в известных к настоящему времени публикациях не содержится, хотя они бы дополнили сложившуюся к нашему времени картину образа жизни и общественных традиций Русского общества соответствующих эпох.

В то же время, современный уровень развития вычислительной техники и информационных технологий обеспечивают исследователям возможность накапливать и обрабатывать большие объемы информации. С их использованием становится возможным объе-

динять в базы данных и выполнять манипуляции не только с однотипной (например, визуальной) информацией, но и обрабатывать информацию, представляющую собой наборы самых разнообразных сведений, таких как изображения, персональные данные, исторические факты и пр.

Кроме того, в наше время появляются также и возможности конструировать алгоритмы расчетов, позволяющие выявлять зависимости, существующие между объектами исследований. Именно эти возможности являются наиболее ценными для изучения имеющих место в истории способов образования названий поселений и землевладений, т. к. в процессе подобных исследований приходится выявлять зависимости между порой, казалось бы, не связанными между собой объектами исследований. Именно эти возможности современных средств обработки и накопления информации приводят к мысли использовать их при изучении способов образования и причинах изменения исторических названий различных имущественных объектов.

Одним из инструментов, с использованием которого это может быть достигнуто, является инструмент «Большие данные». Для обеспечения возможности его полноценного использования с целью выявления способов образования названий объектов и причин, стимулирующих их изменения или препятствовавших им, необходимо использовать алгоритмы, оперирующие с разносторонней информацией, аккумулированной в специализированных базах данных. Информация эта разнородна по своему содержанию (от составленных в рукописном виде изображений землевладений до приводимых в документах сведений о персонах их владельцев) и по форме (от представленных в виде текстов документов до представленных в виде изображений картографических материалов), поэтому прежде всего должны быть разработаны оптимальные методы ее формализации, подготовки и аккумулирования в подлежащие анализу массивы.

Очевидно, что в этом случае при выполнении исследований предстоит анализировать и обрабатывать информацию, представленную в исторических материалах, многие из которых обладают особенностями, определяемыми, например, своеобразными способами подачи сведений, используемыми шрифтами и техникой составления изображений¹. Поэтому полноценное использование инструмента «Большие данные» может быть осуществлено лишь при сотрудничестве специалистов, работающих в областях истории, филологии, архивного дела, формирования и использования баз данных, обработки информации, картографии, землеустройства и пр.

Однако для демонстрации возможностей названного инструмента, имеющей своей целью привлечь внимание и вызвать интерес к нему у специалистов, работающих в областях топонимики и истории межевого дела в России, достаточно избранной в качестве модели малой выборки сведений, формирование и анализ которой могут быть выполнены без значительных затрат и привлечения представителей всех вышеназванных областей знаний. Результаты этой работы и будут представлены в настоящей статье.

Цели и задачи исследования

Целью настоящей работы является демонстрация возможности использования инструмента «Большие данные» для изучения процессов формирования и изменения названий объектов недвижимости, для выдвижения предположений о причинах, в силу которых названия одних объектов изменялись с течением времени, а другие оставались неизменными, а также для обоснования справедливости сделанных предположений.

¹ В случае использования материалов Русского государства XVI–XVII вв., помимо проблем, связанных с их поиском, организацией хранения и обработкой, как это характерно для материалов XVIII–XIX вв., возникают также проблемы прочтения и интерпретации записей. Например, вследствие особенностей используемых в ту эпоху шрифтов, терминов и системы указания числительных [Красовский, 2022]

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- получить необходимые для выполнения работ сведения об объектах исследования и объединить их в подлежащий анализу массив информации;
- предложить способ представления информации, обеспечивающий простоту и наглядность как при выполнении анализа, так и в представлении его результатов;
- с использованием инструмента «Большие данные» выявить способные оказывать влияние на названия особенности поселений и землевладений и внешние обстоятельства, после чего обосновать существование выявленных зависимостей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Представленное в настоящей статье исследование выполнено на основе опубликованных ранее материалов, в которых рассматривались способы образования названий объектов недвижимости и приводились подробные исторические справки о поселениях и землевладениях, располагавшихся на территории Рузского уезда в XVI–XIX вв. [*Холмогоровы*, 1881; *Красовский*, 2020]. Для выполнения анализа были приняты сведения обо всех 22 объектах, исторические сведения о которых удалось получить, начиная с середины XVI в., т. е. с эпохи, для которой имеются наиболее древние из сохранившихся до настоящего времени писцовые книги, составленные для данной территории.

В силу того, что представляемая работа имеет своей целью лишь демонстрацию возможностей инструмента «Большие данные», из всего спектра исторической информации об объектах исследования, их владельцах, а также о том историческом «фоне» (представляющем собой совокупность событий, нравов, обычаев и прочих обстоятельств), на котором формировались их особенности, на предварительном этапе была отобрана лишь та часть, которая обеспечила возможность наглядной демонстрации возможностей изучаемого инструмента без отвлечения читателя на излишние подробности. Именно это обстоятельство и определило представленный в настоящей статье набор информации, как способный повлиять на изменчивость названий объектов.

Фактологический материал представлен в традиционно используемой в подобных случаях табличной форме, которая для повышения наглядности его восприятия была совмещена с формой графической, что, по мнению автора работы, повысило удобство выявления существующих зависимостей.

Источниками сведений для выполнения исследований явились:

- изданные в соответствии с требованиями, предъявляемыми к изданию исторических материалов, копии рукописных документов [*Кондрашина* и др., 1992; *Кистерев*, *Тимошина*, 1997];
- содержащие исторические сведения об объектах недвижимости обзоры документов [*Холмогоровы*, 1881, вып. 1, 2, 10];
- полученные с исторических чертежей сведения о названиях объектов недвижимого имущества и персонах их владельцев [*Красовский*, 2022];
- материалы (описания землевладений и карты) генерального межевания территорий Рузского и Звенигородского уездов 1766–1773 гг. [*Кусов*, 2004];
- сведения, содержащиеся в метрических книгах и исповедных ведомостях XVIII–XIX вв., находящихся на хранении в Центральном городском архиве Москвы (ЦГАМ).

На начальном этапе исследований была выполнена проверка адекватности отражения сформированной выборкой сведений исторических реалий. Необходимость этого шага вызвана тем, что выявленные в результате анализа информации зависимости могут определяться не характеристиками объектов исследования, а, например, методикой фор-

мирования исходного массива информации. Эта проблема хорошо известна специалистам, работающим в области статистической обработки информации, и описана в специальной литературе [*Лебедев, Фадеева, 2018*]. Применительно к информации, используемой для выполнения настоящего исследования, она может проявляться в результате того, что для выполнения исследований были использованы материалы, составленные как светскими, так и духовными властями, которые могли использовать разные способы обозначения объектов недвижимого имущества и терминологию¹.

Относящиеся к середине XVI – началу XVII в. сведения были получены исключительно из документов, составленных светскими властями (документы статистического учета, составляемые в целях налогообложения, уплаты податей, учета пожалованного служащим лицам имущества и иных целей, например писцовые книги и межевые описания), а также документов, свидетельствовавших о фактах истории отдельных объектов, например купчие, завещания, «данные» (такое название имели акты, подтверждающие факты передачи имущества, например, при его даче в приданое). Подобные материалы, включая писцовые, переписные, межевые книги и планы, а также материалы статистического учета и переписей использовались для получения сведений об объектах исследования вплоть до окончания XIX в.

Начиная же со второй четверти XVII в.² в использованных сведениях содержится также и значительная доля информации, полученной из материалов ведомства духовного, а именно из приходных окладных книг Патриаршего Казенного Приказа (жилых данных церквей, а также пустовых и оброчных церковных земель) [*Холмогоровы, 1881, вып. 1, с. 2*]. При этом было возможно предположить, что церковные власти использовали в документах привычные для них названия поселений, образованные с учетом освящений расположенных на их территориях храмов.

Такое изменение структуры источников используемых сведений могло исказить имевшие место в действительности пропорции способов образования названий, увеличив определенную в результате выполненных работ долю названий, образованных с учетом освящений расположенных на территориях поселений храмов, и уменьшив при этом доли, приходящиеся на все остальные способы образования названий.

Опровергнуть это предположение и тем самым доказать адекватность отражения изучаемых исторических реалий сформированной выборкой данных позволило сравнение названий, встречавшихся в документах, практически одновременно составленных как светскими, так и духовными властями на протяжении двух эпох. Первой из таковых явилась приходящаяся на вторую половину XVII в. эпоха осуществленного светскими властями учета государственного и церковного имущества³, а второй — эпоха⁴ выполнения генерального межевания, проводившегося на территории Ружского уезда в большей части в 1766–1773 гг. Произведенное сравнение показало, что большинство названий встречаются в материалах, составленных как светскими, так и церковными ведомствами. Таким образом, становится возможным считать, что все принятые к анализу названия действительно

¹ Для выполнения исследования были использованы практически все оказавшиеся доступными материалы, в которых содержались необходимые сведения. В первую очередь это объясняется малым количеством источников, что особенно остро проявляется для XVI и начала XVII в.

² Наиболее ранние материалы духовного ведомства для изучаемой территории датируются 1628 г. [*Холмогоровы, 1881, вып. 1, с. 8*]

³ Для этой эпохи были выполнены сравнения имеющихся на чертежах сведений о названиях и типах поселений [*Красовский, 2023*] со сведениями, приводимыми в [*Холмогоровы, 1881*]

⁴ Для этой эпохи были выполнены сравнения сведений имеющихся в описаниях землевладений [*Кусов, 2004*] со сведениями, содержащимися в метрических книгах, исповедных ведомостях, письмах и иных документах духовного ведомства, находящихся на хранении в ЦГАМ

использовались в соответствующие периоды времени в общественной жизни Русского общества, а сформированная выборка данных адекватно отражает исторические реалии.

В табл. 1 приведен фактологический материал, использованный для выполнения настоящего исследования. В большинстве случаев представленные в столбцах таблицы исторические сведения по датам их свершений сгруппированы в десятилетние интервалы. Группировка событий в десятилетние интервалы, заменяющая собой представление дат их свершения с точностью до одного года, была применена с целью придания таблице более компактного вида и повышения наглядности представляемого в ней материала, хотя она и несколько снизила точность указания дат принятых к анализу событий.

В двух случаях сведения сгруппированы в более крупные интервалы. Первый из них соответствует сведениям, относящимся к самой ранней из анализируемых эпох — отрезку времени, соответствующему второй половине XVI в. Сделано это в силу того, что выполнять исследования для данной эпохи пришлось при крайне малом количестве исторических сведений¹. Для второго же из увеличенных интервалов, включающего в себя последнюю четверть XVIII и весь XIX в., наоборот имеется большое количество сведений, что делает его достойным отдельного исследования².

Все представленные в табл. 1 объекты³ объединены в две большие группы, к первой из которых отнесены объекты, названия которых в течение этого времени *оставались неизменными*, а ко второй — объекты, названия которых *менялись* в течение рассматриваемого отрезка времени. Эти особенности объектов указаны полужирным шрифтом в сквозных, выделенных заливкой, ячейках.

Сведения о каждом из объектов представлены в трех горизонтально расположенных разделах, отделенных двойными чертами.

В первом разделе представлены названия объектов. Названия, выделенные полужирным шрифтом, фигурируют в документах первой половины XIX в. и приведены для удобства отыскания сведений о соответствующих объектах в материалах ЦГАМ в случае возникновения необходимости. Перед соответствующими XIX в. названиями в исторически имевшей место последовательности перечислены типы, которые принимали соответствующие объекты под влиянием различных обстоятельств. Сделано это в силу того, что эти типы неоднократно изменялись в течение анализируемого интервала времени, что, как это будет показано ниже, было способно оказывать влияние на образование их новых названий. Для указания типов объектов в таблице использованы следующие обозначения: с. — село, сц. — сельцо, д. — деревня, сл. — слобода, пуст. — пустошь, пог. — погост [Вумов, 1953].

¹ Одной из причин плохой сохранности документов может являться имевшее место на рубеже XVI и XVII вв. Литовское разорение [Холмогоровы, 1901, с. III–IV]. В это время политической системе и хозяйственной жизни Русского государства был нанесен ущерб, последствия которого восполнялись в течение многих десятилетий, а иногда и более столетия [Красовский, 2020]. Свидетельством этому являются имеющиеся в табл. 1 прочерки, обозначающие отсутствие каких-либо сведений об объектах, факты разрушений ранее существовавших на территориях поселений храмов, пребывание объектов в заброшенном состоянии, массовая смена владельцев объектов недвижимости, имевшая место на рубеже XVI–XVII вв., и пр.

² Вследствие большого количества материалов этой эпохи становится возможным анализировать формирование названий, разделяя поселения на только что приобретшие новый тип (например, последовательно прослеживая цепочку преобразований: землевладение – починок – деревня – село), и на поселения, у которых изменялись названия, а тип оставался неизменным (например, села)

³ В силу того, что землевладения и поселения, сведения о которых были проанализированы в ходе представляемых исследований, на различных этапах своей истории могли представлять собой как населенные пункты (села, сельцы, погосты, деревни, слободы и пр.), так и ненаселенные землевладения (пустоши, «порозжие земли» и пр.), то при их упоминаниях в тексте статьи используется общий термин «объекты недвижимого имущества»

Второй раздел содержит сведения о владельцах объектов. В тех случаях, когда на протяжении указанных интервалов времени владельцами являлись исторические персоны, организации или ведомства, соответственно указаны фамилии или названия организаций и ведомств. Если объектом одновременно владели персоны двух разных фамилий, то указаны обе фамилии; в тех же случаях, если владельцами являлись одновременно члены трех и более фамилий, то указаны только наименьшее и наибольшее количества этих фамилий. При этом следует заметить, что каждая из фамилий (семей) может объединять несколько владевших (вернее, в данном случае — совладевших) объектом персон¹.

В третьем разделе приведены освящения когда-либо располагавшихся на территориях поселений храмов и исторические справки о них.

Указание использовавшихся в различное время названий объектов и их владельцев, а также освящений храмов и фактов их историй осуществлено посредством заливки ячеек таблицы, расположенных на пересечениях содержащих указания тех или иных сведений строк и указывающих соответствующие временные интервалы столбцов. Для обеспечения удобства восприятия материала использована заливка разных цветов:

- желтый цвет предназначен для указания названий объектов;
- синий или красный — для указания сведений об их владельцах (синий — в том случае, если владельцами являлись члены единственной фамилии или единственная организация, красный — если владельцами одновременно являлись члены разных фамилий);
- серый цвет предназначен для указания сведений о храмах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В материале табл. 1 можно заметить, что в течение рассматриваемого отрезка времени названия 12 объектов оставались неизменными, а 10 изменились. Среди оставшихся неизменными самой большей по количеству является насчитывающая 5 поселений группа объектов, названия которых были образованы с учетом освящений расположенных на их территориях храмов. Это:

- д. Покровская (№ 2);
- с. Воскресенское (№ 6);
- пог. Воздвиженский (№ 7);
- с. Спасское (№ 8);
- с. Михайловское (№ 11).

Названия 2 объектов, сел Полуэктово (№ 1) и Ащерино (№ 3), были образованы с учетом владельческих признаков². Название села Лужки (№ 9) — с учетом типа распо-

¹ Группировка персон по их фамилиям не способна исказить результаты настоящего исследования, т. к. она не изменяет *количество* владевших объектами недвижимого имущества *фамилий*

² Названия объектов недвижимого имущества могли образовываться, например, от фамилий, имен, рода деятельности и прочих признаков исторических персон (далее в тексте статьи будут приведены соответствующие примеры). В свою очередь, названия поселений могли быть образованы также и от названий владевших ими организаций (например, монастырей или храмов). Примером названного последним обстоятельства является образование названия села Ануфриево (№ 14), которое, насколько можно судить по имеющимся документам, находясь ранее во владении частного лица, перешло во владение Анофриевой пустыни, позднее Анофриева монастыря. Вследствие многообразия признаков владельцев недвижимого имущества, которые могли быть положены в основу образования названий поступивших в их владение объектов, соответствующий способ образования названий поселений и земель владений следует именовать «способом, учитывающим различные владельческие признаки», или способом образования названий «с учетом владельческих признаков». Заметим, что образование названий от *фамилий* владевших объектами исторических персон является лишь одной из наиболее наглядных и хорошо известных разновидностей этого способа

ложенного вблизи природного объекта. Количество объектов, происхождение названий которых выяснить не представилось возможным, оказалось равным 4, это села:

- Борзцово (№ 4);
- Казаново (№ 5);
- Картино (№ 10);
- Теплое (№ 12).

Среди объектов с изменившимися названиями наибольшую по численности группу составляют 7 объектов. Их названия образованы с учетом владельческих признаков, это села:

- Рождествено Новикова (№ 13);
- Ануфриево (№ 14);
- Дьяково (№ 15);
- Ивойлово (№ 16);
- Козлово (№ 17);
- Крымское (№ 18);
- Сляднево (№ 22).

В остальных группах насчитывается по одному объекту, это села:

- Богословское, Каменка тоже (№ 20);
- Никольское Долгоруковых (№ 19);
- Архангельское, Мытники тоже (№ 21).

Древнее название первого из этих сел было образовано с учетом названия речки, на которой оно расположено; название второго — с учетом освящения расположенного на его территории храма; в третьем же случае предположения о происхождении древнего названия села хотя и существуют (в этом селе располагался пункт сбора таможенных платежей), но их не удастся обосновать, основываясь на материалах, используемых при выполнении настоящего исследования.

Из отмеченного выше видно, что в наибольшей степени изменениям подвержены названия объектов, образованные с учетом владельческих признаков, что отмечалось и ранее специалистами, работавшими в области топонимики [Мурзаев, 1984; Постников, 1985]. Такое совпадение полученных разными путями результатов свидетельствует о принципиальной возможности применения инструмента «Большие данные» для исследований в области топонимики. Для демонстрации дальнейших возможностей, открывающихся посредством использования этого инструмента, приступим к выявлению обстоятельств, влиявших на изменчивость названий объектов. Для этого сопоставим имеющиеся в табл. 1 сведения о названиях объектов, их владельцах и различных исторических фактах.

Анализ сведений табл. 1, относящихся к наиболее раннему, продолжавшемуся с середины XVI в. до первой четверти XVII в. отрезку времени позволяет заметить, что претерпевавшие изменения названия тех объектов, которые существовали еще до середины XVI в. (т. е. до составления самых ранних из использованных при выполнении представляемого исследования писцовых книг), по-видимому, были образованы с учетом владельческих признаков в еще более раннее время; к середине XVI в. появляются признаки их владельцев на дату составления этих документов. Об этом свидетельствуют приводимые в писцовых книгах образованные таким образом двойные названия¹ следующих поселений:

¹ Эти названия указаны в строках, соответствующих началу всего анализируемого интервала времени

- Воздвиженское Степановское (№ 14);
- Федосово, Ивойлово тоже (№ 16);
- Митино Дворское (№ 18).

Сопоставляя названия таких объектов со сведениями об их владельцах можно заметить, что в более позднее время (в первую треть XVII в.) в названиях наблюдаются следующие изменения:

- либо исчезновение наиболее древней составляющей (из названий, бывших ранее двойными);
- либо появление второй составляющей (для названий, бывших ранее односложными);
- либо полное изменение названия.

При этом во всех случаях в новых названиях (или в их частях) присутствуют характерные для владельцев соответствующих объектов признаки, которые в том или ином виде¹ можно отыскать в документах середины XVI в. Таковыми являются используемые в писцовых книгах, образованные с учетом владельческих признаков 6 из всех 7 претерпевших изменения названия поселений:

- сл. Ануфриево² (№ 14);
- сц. Скореево, Дьяково тоже (№ 15);
- с. Ивойлово (№ 16);
- с. Семеновское, Козлово тоже (№ 17);
- д. Крымское Дворище³ (№ 18);
- с. Никольское, Поскочино тоже (№ 19).

Таким образом, сопоставление указанных выше сведений позволяет утверждать, что во второй половине XVI в. и в первой трети XVII в. названия объектов недвижимого имущества образовывались с учетом владельческих признаков, а изменения этих признаков стимулировали изменения ранее использовавшихся названий.

В то же время в материале табл. 1 можно обнаружить и 9 объектов, изменения владельцев которых не вызывали изменений их названий. Особенно важным является то, что это имело место во второй половине XVI в. и в первой трети XVII в., т. е. в эпоху, для которой способ образования названий объектов с учетом фамилий их владельцев являлся преобладающим. К таковым относятся как села, названия которых *оставались неизменными* на протяжении всего анализируемого интервала времени: Полуэктово (№ 1) и Ащерино (№ 3), так и села, названия которых в другое время *изменялись*: Рождествено Новикова (№ 13), Дьяково (№ 15), Ивойлово (№ 16), Козлово (№ 17), Крымское (№ 18), Никольское Долгоруковых (№ 19) и Сляднево (№ 22).

Выяснить причины такого положения становится возможным благодаря анализу дополнительных (также приводимых в табл. 1) сведений о владельцах соответствующих объектов.

¹ Имеются в виду либо содержащиеся в писцовых книгах прямые указания о том, что исторические персоны владели объектами недвижимости, названия которых явно образованы с учетом их фамилий или иных их качеств, либо упоминания таких персон в качестве владельцев иных объектов [Красовский, 2023]

² В данном случае объект принадлежит не конкретной исторической персоне, а Ануфриевой пустыни

³ В данном случае два поколения владельцев объекта неоднократно «ездили послами в Крым»

Для 4 из 9 случаев: пуст. Ащерино¹ (№ 3), с. Рождествено, Марково тоже (№ 13), с. Ивойлово (№ 16), сц. Козлово (№ 17) общими являются следующие, отчетливо заметные в материале табл. 1, обстоятельства:

- частая по сравнению со сменяемостью поколений смена фамилий, являвшихся единственными владельцами имущественных объектов² (нахождение объекта во владении персон единственной фамилии обозначено в таблице заливкой ячеек синим цветом);
- одновременное совладение объектом персонами двух и более (в приводимых в таблице случаях от 2 до 8) различных фамилий (обозначено заливкой ячеек красным цветом);
- выведение объекта из активного хозяйственного оборота и его пребывание в числе пустовых земель или же нахождение объекта во владении Великого государя (обозначено также заливкой ячеек синим цветом).

Эти три обстоятельства делали практически невозможными протекающие естественным образом процессы формирования названий объектов, учитывающих фамилии их владельцев, т. к. часто изменявшиеся фамилии владельцев не успевали ни прочно «связаться» с соответствующими объектами в общественном сознании, ни найти своего отражения в периодически составляемых документах³.

Можно видеть также, что для остальных 5 из 9 поселений, древние названия которых были образованы с учетом владельческих признаков: Полуэктово (№ 1), Дьяково (№ 15), Крымское (№ 18), Никольское Долгоруковых (№ 19) и Сляднево (№ 22), а также Мытниково (№ 21), для которого выяснить способ образования древнего названия не представилось возможным, характерно длительное пребывание во владении персон одной фамилии (от 40 до 140 и более лет). Это, однако, не привело к формированию названий, учитывавших фамилии их владельцев. Наиболее яркими примерами этому служат названия сел Дьяково (№ 15) и Мытниково (№ 21), для которых в течение XVII и XVIII вв. новые названия так и не были образованы, несмотря на то, что их владельцами на протяжении примерно двухсот лет были члены единственных фамилий Белых и Жеребцовых, соответственно.

Анализируя материал таблицы на предмет выявления особенностей имущественных объектов, полагавшихся в основу образования их названий, можно заметить, что начиная примерно со второй трети XVII в. практически прекращается образование названий с учетом владельческих признаков. Так, до 1630 г. были образованы названия упомянутых выше сел: Ануфриево (№ 14), Скореево, Дьяково тоже (№ 15) и Семеновское, Козлово тоже (№ 17), после чего такой способ образования названий более не встречается. По-видимому, это является свидетельством того, что образованию названий таким образом препятствовало какое-то иное обстоятельство, отличавшееся от трех названных выше. Его

¹ Здесь и далее приводятся типы, которые имели объекты в соответствующее время согласно [*Холмогоровы*, 1881]

² Согласно имеющимся в документах сведениям, персоны с единственной фамилией являлись владельцами таких объектов на протяжении от 1 до 30 лет

³ Следует заметить, что хотя для большинства названных выше объектов два первых обстоятельства проявляются одновременно, влияние каждого из них в отдельности делает невозможным образование названий объектов с учетом владельческих признаков. Также очевидно, что образование названий объектов таким способом было невозможным и в случаях отсутствия каких-либо определенных их владельцев

действие имело место начиная со второй трети XVII в. и продолжалось практически до окончания анализируемого отрезка времени¹.

Получить ответ на этот вопрос позволил анализ названий, образованных в эпоху, для которой было сделано приведенное выше наблюдение. В материале табл. 1 можно заметить, что на интервале времени с 1627 по 1710 гг. были образованы новые названия для 6 сел²:

- Рождествено (№ 13);
- Ивойлово, Воскресенское тоже (№ 16);
- Преображенское (№ 18);
- Богословское, Каменка тоже (№ 20);
- Архангельское (№ 21);
- Сляднево, Спасское тоже (№ 22).

В этих названиях явно прослеживались признаки освящений расположенных на их территориях храмов³.

Это позволяет заключить, что начиная со второй трети XVII в. названия поселений образовывались с учетом освящений расположенных на их территориях храмов, а факты оснований или восстановлений храмов стимулировали образования новых названий. Наиболее раннее из образованных таким способом название села Рождествено, Марково тоже (№ 13) упоминается в приходных окладных книгах Патриаршего Казенного Приказа 1627 г., а наиболее позднее, села Архангельского (№ 21) — в книгах 1707 г. Помимо названных, в эту эпоху вводятся в употребление также и названия сел:

- Ивойлово, Воскресенское тоже (№ 16);
- Преображенское (№ 18);
- Никольское (№ 19);
- Богословское, Дорки тоже (№ 20);
- Сляднево, Спасское тоже (№ 22).

Стоит заметить, что этот способ образования названий характерен как для поселений, когда-либо ранее уже имевших тип «село», так и для поселений, впервые приобретающих этот тип⁴.

Временную границу начала соответствующей эпохи можно очертить лишь весьма приближенно, т. к. эпоха, в которую названия объектов преимущественно образовывались с учетом владельческих признаков, уступает ей место постепенно. Причем на некотором отрезке времени, а именно с 1610 по 1630 гг., использовавшийся прежде и вытесняющий его способы образования названий действовали одновременно. Так, первым способом в это время были образованы названия сел Ануфриево (№ 14), Дьяково (№ 15), Семеновское, Козлово тоже (№ 17), Крымское Дворище (№ 18), а вторым — Рождествено, Марково тоже (№ 13).

¹ Исключением является название села Никольское Долгоруковых (№ 19), впервые встречающееся в документах 1796 г. [Красовский, 2020]. Но, как будет отмечено ниже, в эту эпоху новые названия объектов образовывались под влиянием целого ряда новых, характерных для нее обстоятельств

² К числу сел, получивших новые названия в эту эпоху, следует отнести также и село Богословское, Каменка тоже, прежнее название которого было образовано от названия реки, на которой оно располагалось, вследствие чего оно не было учтено в числе названных выше 5 сел

³ Расположения выделенных заливкой ячеек таблицы отчетливо демонстрирует то, что даты введения в употребление новых названий сел (указаны посредством заливки желтым цветом соответствующих названиям сел ячеек) практически совпадают датами оснований или восстановлений расположенных на их территориях храмов (указаны посредством заливки серым цветом ячеек, соответствующих указаниям фактов оснований или восстановлений храмов)

⁴ Увеличение количества храмов происходит вследствие либо освоения и хозяйственного развития территории уезда, либо, в большей части, восстановления после Литовского разорения

Таким образом, сопоставление указанных выше сведений позволяет утверждать, что начиная со второй трети XVII в. и в начале XVIII в. преобладает образование названий с учетом освящений расположенных на территориях поселений храмов. Стимулами к изменениям названий поселений в эту эпоху являлись факты оснований или восстановлений храмов на соответствующих территориях. Образование же названий объектов с учетом владельческих признаков в эту эпоху практически прекращается.

В одних случаях образованные таким образом (из указанных выше) названия использовались на протяжении большей части всего анализируемого отрезка времени, после чего, в конце XVIII и в течение XIX вв., они были вытеснены из употребления новыми названиями¹. Это характерно для сел:

- Рождественно Новикова (№ 13);
- Крымское (№ 18);
- Никольское Долгоруковых (№ 19);
- Богословское, Каменка тоже (№ 20);
- Архангельское, Мытники тоже (№ 21).

В других же случаях, а именно сел Ивойлово (№ 16) и Сляднево (№ 22), после использования в течение 40 и 100 лет соответственно, имел место возврат к названиям, использовавшимся прежде.

Завершая рассмотрение способов образования названий объектов недвижимого имущества следует заметить, что в последующую эпоху, в конце XVIII и в течение XIX вв., названия поселений образовывались с учетом значительно большего числа обстоятельств, для выявления механизма влияния которых требуется выполнять исследования с привлечением более разносторонней информации, что выходит за рамки представляемой в настоящей статье работы².

Таким образом, анализ приведенных в табл. 1 сведений, выполненный с использованием инструмента «Большие данные», позволяет утверждать следующее.

На территории Русского уезда в промежутке времени с середины XVI и практически до начала XVIII вв. изменения названий объектов недвижимости происходили под влиянием двух последовательно сменявших одна другую традиций³, причем для проявления каждой из них должен был выполняться ряд условий. Время действия каждой из них можно определить лишь условно, т. к. первая уступает место последующей постепенно, причем на некотором отрезке времени обе они действуют одновременно.

¹ В табл. 1 во втором столбце, в скобках, рядом с некоторыми из выделенных жирным шрифтом названиями поселений, для примера приведены даты введения в употребление некоторых из таких новых названий

² В эту эпоху названия поселений формировались, в частности, под влиянием следующих обстоятельств: изменений границ уездов, вследствие чего иногда возникала необходимость учета в реестрах документов и указания на картографических материалах расположенных в непосредственной близости друг от друга поселений с одинаковыми названиями; развития деловой активности, следствием чего явилось налаживание регулярного почтового сообщения, для оптимизации которого было желательно использование уникальных названий пунктов назначения корреспонденции; подъем патриотических настроений в Русском обществе, одним из результатов которого было формирование названий поселений с учетом фамилий наиболее значительных исторических персон, когда-либо владевших ими. Основываясь на сведениях, содержащихся в документах (хранящихся в ЦГАМ), можно утверждать, что для поселений, впервые приобретших тип «село» во второй половине XIX в., характерна неизменность сформировавшихся ранее названий

³ Проявление этих двух традиций хорошо заметно именно на объектах, названия которых образованы с учетом владельческих признаков. Для остальных же приведенных в табл. 1 объектов, названия которых изменялись, отчетливо видна только вторая из эпох, что является следствием большей устойчивости названий, образованных иными способами [Витов, 1967; Постников, 1985]

Табл. 1. Сведения об объектах недвижимости, их владельцах и храмах, расположенных на территориях некоторых из них
 Table 1. Information about real estate objects, their owners and temples located on the territories of some of them

	Названия объектов	И н т е р в а л ы в р е м е н и (г г.)																			
		1558	1601	1611	1621	1631	1641	1651	1661	1671	1681	1691	1701	1711	1721	1731	1741	1751	1761	1771	1781
	Владельцы (совладельцы) объектов	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	Храмы: освящения и факты их историй	1600	1610	1620	1630	1640	1650	1660	1670	1680	1690	1700	1710	1720	1730	1740	1750	1760	1770	1780	1834
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Объекты, названия которых не изменились в течение анализируемого отрезка времени																					
1	с., сц., с. Полуэктово (Волинщино)																				
	Волинские																				
	Долгоруковы																				
	Трехсвятительский	Действует (основан)																			
2	с., д. Покровская ¹ (Покровское)																				
	Покровское Долгорукова ² (с 1796 г.)																				
	Волинские																				
	Долгоруковы																				
	Покровский	Действует																			
		Разрушен																			
		Действует (воссоздан)																			
3	д., с., пуст., с. Ашерино																				
	Ашерины																				
	Осоргины (Осорбины)																				
	От 3 до 8 разных фамилий																				
	Иоанно-Предтеченский	Действует (основан)																			
		Разрушен																			
		Действует (воссоздан)																			
4	сц., с. Борзцово																				
	Звенигородские																				
	«Порозжая» земля																				
	От 4 до 7 разных фамилий																				
	Успенский	Действует (основан)																			
		Без пения ³ (поврежден)																			
		Действует (воссоздан)																			

¹ С 1816 г. упоминания этого поселения с типом «село» в документах и на картографических материалах отсутствуют [Красовский, 2020]

² В реестре метрической книги 1793 г. название этого села снабжено пометкой «Орлова» (ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 745, Д. 841, Л. Юб.)

³ Термин «без пения» означает отсутствие богослужений в храме [Холмогоровы, вып. 1, 1881, с. 3]

15	Скорево		—	—																
	Скорево, Дьяково тоже																			
	сц., с. Дьяково																			
	Дьяковы																			
	Нет сведений		—	—																
	Белые																			
	От 2 до 4 разных фамилий																			
	Белые																			
	Борисо-глебский	Действует																		
		Без пения (поврежден)																		
Действует (воссоздан)																				
16	Федосово, Ивойлово тоже																			
	Ивойлово																			
	Ивойлово, Воскресенское тоже																			
	с. Ивойлово																			
	Салтыковы																			
	Вековы и Ломоносовы																			
	Львовы и Пронские																			
	Спасо-Ярославского монастыря																			
	Никольский	Действует																		
		Разрушен																		
Воскресенский	Действует (основан)																			
17	Семеновское																			
	Семеновское, Козлово тоже																			
	с., сц., с. Козлово																			
	Козловы																			
	Даниловы и Козловы																			
	Волошениновы																			
	Челищевы																			
	Дашковы																			
	Великой княжны Натальи Алексеевны																			
	Хитровы																			
Флора-лаврский	Действует																			
	Без пения (поврежден)																			
	Действует (воссоздан)																			

18	Митино Дворское		—	—																
	Крымское Дворище																			
	Преображенское																			
	д., пуст., д., с. Крымское (с 1796 г.)																			
	Колычовы																			
	Нет сведений		—	—	—	—														
	Хитровы																			
	Борковы																			
	Яновы																			
	Преображенский	Действует (основан)																		
19	Никольское		—	—	—															
	Никольское, Поскочино тоже																			
	Никольское																			
	с., сц., с. Никольское Долгоруковых (с 1796 г.)																			
	Цыплетевы																			
	Нет сведений		—	—	—															
	Бельские																			
	Чириковы																			
	Милославские																			
	Прозоровские																			
Долгоруковы																				
Никольский	Действует																			
	Разрушен																			
	Действует (воссоздан)																			
20	пуст., д. Каменка и сц., пуст. Дорки		—	—	—	—	—	—	—											
	с. Богословское, Дорки тоже ¹																			
	Богословское, Каменка тоже (с 1794 г.)																			
	Льковы																			
	Нет сведений		—	—	—	—	—	—	—											
	Воротынские																			
	Офросимовы, Голицыны, Бухвостовы ²																			
	Шидловские																			
	Аленины																			
	Никольский	Разрушен																		
	Действует (воссоздан)																			

¹ В XVIII в. произошло слияние села Каменки с расположенным поблизости и принадлежащим тем же владельцам землевладением Дорки

² Члены названных фамилий попеременно владели объектом на протяжении указанного десятилетия, каждый из них на протяжении от одного до трех лет

21	Мытниково (Мытники)			—																
	Архангельское ¹																			
	Мытники (Мытниково)																			
	сц., с. Архангельское, Мытники тоже (с 1834 г.)																			
	Козловские																			
	Нет сведений			—																
	Жеребцовы																			
	Гавриило-архангельский	Основан, действует, позднее упразднен																		
	Христорождественский	Действует (основан)																		
22	Сляднево																			
	Сляднево, Спасское тоже																			
	сц., пуст., сц., с. Сляднево (с 1796 г.)																			
	Сапаговы																			
	«Порозжая» земля																			
	Костюрины																			
	Спасский	Действует (основан)																		

¹ В данном случае основанный на территории поселения храм согласно удовлетворенному Патриаршим Казенным Приказом прошению владельца поселения Гаврилы Иванова, сына Жеребцова был освящен во имя Архистратига Гавриила [*Холмогоровы*, 1881, Вып. 1, с. 70], что представляет собой интересный, являющийся исключительным, случай образования названия поселения

Для первой из традиций, действовавшей с середины XVI в.¹ и примерно до окончания первой трети XVII в., характерно образование названий объектов с учетом владельческих признаков, а для второй, действовавшей примерно со второй трети XVII в. и практически до начала XVIII в. — с учетом освящений храмов, расположенных на территориях соответствующих поселений.

Для того, чтобы в соответствующую эпоху названия объектов были образованы с учетом владельческих признаков, необходимыми условиями являлись *значительная продолжительность* владения объектом персонами *единственной* фамилии и использование объекта в активном хозяйственном обороте (например, в качестве жилого поселения или обрабатываемого землевладения).

Названия объектов, упоминаемые в настоящей статье, фигурировали в составляемых в различные эпохи документах и на картографических материалах. Понимание обстоятельств, которые были способны вызывать изменения названий одних объектов и способствовать неизменности других, позволит отыскивать сведения об одних и тех же объектах (преимущественно небольших сельских поселениях и землевладениях), упоминаемых под различными названиями в документах статистического учета и на картографических материалах различных эпох. В конечном итоге это обеспечит исследователям возможность получать из документов различную информацию о землевладениях и персонах их владельцев (количественную в первом случае и персональную во втором), анализ которой обеспечит возможность выполнять исследования в областях экономики, социологии, межевого дела, картографии, землеустройства и развития территорий.

ВЫВОДЫ

Представляемая в настоящей статье работа продемонстрировала целесообразность и эффективность использования инструмента «Большие данные» при выполнении исследований в областях топонимики и истории межевого дела. В ходе выполнения работ был предложен наиболее удобный для этой цели вид представления сведений о мелких сельских поселениях и землевладениях.

Анализ ограниченной выборки данных, использованной в качестве модели базы анализируемой информации, показал возможность с использованием инструмента «Большие данные» выдвигать и обосновывать гипотезы о причинах, вызывавших изменения названий одних объектов недвижимого имущества и обеспечивающих неизменность других; определять обстоятельства, препятствовавшие или способствовавшие формированию их новых названий, а также выявлять традиции образования названий имущественных объектов, бытовавшие на территории Рузского уезда в XVI–XVIII вв.

Полученные в ходе настоящего исследования фактические сведения о землевладениях и поселениях, а также о существовавших в Русском обществе XVI–XVIII вв. традициях образования их названий, могут быть использованы специалистами, работающими в смежных областях знаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Благирев А. П., Хапаева Н. М. Big Data простым языком. М.: АСТ, 2019. 253 с. 122 илл.
- Витов М. В. Севернорусская топонимия XV–XVIII вв. как исторический источник. Вопросы языкознания. М.: Наука, 1967. № 4. С. 75–91.
- Кистерев С. Н., Тимошина Л. А. Рузский уезд по писцовой книге 1567–1569 гг. Материалы для истории Звенигородского края. М.: Археографический Центр, 1997. Вып. 4. 300 с.

¹ Эта дата является также весьма условной в силу того, что она является датой составления наиболее древних из использованных для выполнения настоящего исследования документов

Кондрашина В. А., Лукичев М. П., Тихонюк И. А. Приправочный список с писцовых книг Звенигородского уезда 1558–1560 гг. Материалы для истории Звенигородского края. М.: Археографический Центр, 1992. Вып. 1. 156 с.

Красовский А. П. Оценка изменений совокупности сельских храмов Рузского уезда Московской губернии в XVII–XIX вв. на основе документальных и картографических материалов. Жизнь и смерть в Российской империи. Новые открытия в области археологии и истории России XVIII–XIX вв. М.: Институт археологии РАН — Институт российской истории РАН, 2020. С. 193–209.

Красовский А. П. Первые массово составляемые чертежи церковных земель Рузского уезда Московской губернии как инструмент идентификации объектов церковного имущества. Землеустройство, кадастр и мониторинг земель, 2022. № 5. С. 340–348. DOI: 10.33920/sel-04-2205-06.

Красовский А. П. О влияющих на изменчивость названий особенностях сельских поселений и инструментах их выявления (на примере сел Рузского уезда середины XVI – первой четверти XVII вв.). ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции, 2023. Т. 29. Ч. 2. С. 339–357. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-2-29-339-357.

Кусов В. С. Земли Московской губернии в XVIII веке. Карты уездов. Описание землевладений. Т. 3. Карты, 14 листов. М.: Издательский дом «Московия», 2004.

Лебедев А. В., Фадеева Л. Н. Теория вероятностей и математическая статистика. Учебник. Издание 4-е, переработанное и дополненное. М.: Наука, 2018. 480 с.

Мурзаев Э. М. Словарь народных географических терминов. М.: Мысль, 1984. 656 с.

Поспелов Е. М. Географические названия Московской области. Топонимический словарь (более 3500 ед.). М.: Астрель, 2008. 608 с.

Постников А. В. Развитие картографии и вопросы использования старых карт. М.: Наука, 1985. 216 с.

Холмогоров В. И., Холмогоров Г. И. Исторические материалы для составления церковных летописей Московской епархии. Вып. 1. А: Рузская десятина. М.: Типография Л. Ф. Снегирева, 1881. 288 с.

Холмогоров В. И., Холмогоров Г. И. Исторические материалы для составления церковных летописей Московской епархии. Вып. 2. Б: Звенигородская десятина. М.: Типография Л. Ф. Снегирева, 1881. 133 с.

Холмогоров В. И., Холмогоров Г. И. Исторические материалы для составления церковных летописей Московской епархии. Вып. 10: Можайская десятина Московского уезда. М.: Типография Л. Ф. Снегирева, 1901. 258 с.

REFERENCES

Blagirev A. P., Khapaeva N. M. Big data in simple language. Moscow: AST, 2019. 253 p. 122 fig. (in Russian).

Kholmogorov V. I., Kholmogorov G. I. Historical materials for compiling Church Chronicles of the Moscow diocese. V. 1. A: Ruza tithe. Moscow: Printing House of L. F. Snegirev, 1881. 288 p. (in Russian).

Kholmogorov V. I., Kholmogorov G. I. Historical materials for the compilation of Church Chronicles of the Moscow diocese. V. 2. B: Zvenigorod tithe of the Moscow district. Moscow: Printing House of L. F. Snegirev, 1881. 133 p. (in Russian).

Kholmogorov V. I., Kholmogorov G. I. Historical materials for the compilation of Church Chronicles of the Moscow diocese. V. 10: Mozhaiskaya tithe of the Moscow district. Moscow: Printing House of L. F. Snegirev, 1901. 258 p. (in Russian).

Kisterev S. N., Timoshina L. A. Ruza district according to the scribe's book of 1567–1569. Materials for the history of Zvenigorod Region. Moscow: Archaeographic Center, 1997. Iss. 4. 300 p. (in Russian).

Kondrashina V. A., Lukichev M. P., Tikhonyuk I. A. Seasoning list from the scribal books of Zvenigorod district of 1558–1560. Materials for the history of Zvenigorod Region. Moscow: Archaeographic Center, 1992. V. 1 156 p. (in Russian).

Krassowski A. P. Assessment of changes in the set of rural churches of the Ruza district of the Moscow province in the XVII–XIX centuries on the basis of documentary and cartographic materials. Life and Death in the Russian Empire. New discoveries in the field of archeology and history of Russia of the XVIII–XIX centuries. Moscow: Institute of archaeology of the Russian Academy of Sciences – Institute of Russian history, 2020. P. 193–209 (in Russian).

Krassowski A. P. The first widespread drawings of church lands in Ruza district of Moscow province as a tool for identification of church property objects. Land management, cadastre and land monitoring, 2022. No. 5. P. 340–348 (in Russian). DOI: 10.33920/sel-04-2205-06.

Krassowski A. P. About the features of rural settlements that influenced the variability of names and the tools for their identification (on the example of the rural of the Ruza district in the middle of the XVI – first quarter of the XVII centuries). InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International Conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2023. V. 29. Part 2. P. 339–357 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2023-2-29-339-357.

Kusov V. S. Lands of the Moscow province in the XVIII century. Maps of the counties. Description of land holdings. Maps, 14 sheets (in Russian). Moscow: Publishing House “Moskovia”, 2004.

Lebedev A. V., Fadeeva L. N. Probability theory and mathematical statistics. Textbook. 4-th edition, revised and expanded. Moscow: Nauka, 2018. 480 p. (in Russian).

Murzaev E. M. Dictionary of folk geographical terms. Moscow: Mysl', 1984. 656 p. (in Russian).

Pospelov E. M. Geographical names of Moscow province. Toponymic dictionary (more than 3500 units). Moscow: Astrel, 2008. 608 p. (in Russian).

Postnikov A. V. The development of the cartography and use of the old maps. Moscow: Nauka, 1985. 216 p. (in Russian).

Vitov M. V. North Russian toponymy of the XV–XVIII centuries as a historical source. Questions of linguistics. Moscow: Nauka, 1967. No. 4. P. 75–91 (in Russian).

УДК: 912.43

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-342-361

А. П. Красовский¹

**О ПРОБЛЕМЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ОДНОИМЕННЫХ СЕЛ
В ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ДОКУМЕНТАХ XVI–XX вв.
И ИНСТРУМЕНТАХ ЕЕ ИЗУЧЕНИЯ**

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены исторически имевшие место случаи существования в поселениях совместно учитываемых сел с одинаковыми названиями, а также выявлены причины, приводившие к изменению в них количества таких сел. Проанализированы исторически применявшиеся способы разрешения неоднозначной идентификации одноименных сел. Показано, что способы идентификации имевших одинаковые названия сел, используемые в материалах, составляемых различными ведомствами, могли быть различными: посредством группировки объектов по более мелким учетным единицам, посредством указания их расположений относительно местных объектов природного или антропогенного происхождения, указания ряда их отличительных особенностей, а также посредством формирования для каждого из них уникального названия. Выявлены случаи, в которых могли использоваться те или иные способы идентификации. Показано, что это могло зависеть от ведомства, в котором были составлены документы и картографические материалы (светские или духовные; столичные, губернские или уездные); от круга лиц, составлявших документы (их профессии и вида деятельности); от формы существования материалов (рукописная или печатная); от количества одновременно учитываемых в материалах поселений (нескольких десятков или нескольких тысяч); от количества экземпляров документов (нескольких единиц или целых тиражей). На основе выполненного анализа выработаны рекомендации по отысканию мест хранения сведений о селах в проблемных случаях. Исследование произведено с использованием инструмента «Большие данные». Ход работ продемонстрирован на примере 8 сел Рузского уезда, имевших одинаковые названия на протяжении разных временных отрезков XVI–XX вв. Показана эффективность применения инструмента «Большие данные» для выполнения исследований в данном направлении. Результаты исследования могут быть востребованы специалистами, осуществляющими поиск сведений о сельских поселениях XVIII–XX вв. в исторических источниках, изучающими историю Рузского и смежных с ним уездов, а также работающими в областях истории межевого дела и истории картографии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Рузский уезд, Московская губерния, идентификация поселений, архивные документы, исторические карты

¹ Государственный университет по землеустройству, факультет землеустройства и управления природопользованием, ул. Казакова, д. 15, Москва, Россия, 105064,
e-mail: anton.krass@gmail.com

Anton P. Krassowski¹

ABOUT THE PROBLEM OF IDENTIFYING RURAL OF THE SAME NAME IN RUSSIAN DOCUMENTS OF THE XVI–XX CENTURIES AND THE TOOLS TO RESEARCH IT

ABSTRACT

The historical cases of the existence of jointly accounted rural with the same names in settlements are considered, and the reasons that led to a change in the number of such rural areas are also revealed. The historically used methods of resolving the ambiguity of identifying rural settlements with the same names are analysed. It is shown that this was achieved by taking them into account among smaller accounting units, by indicating their locations relative to local objects of natural or anthropogenic origin as well as indicating their other specific features. It was found that the methods of identification of rural with the same names used in the materials compiled by various departments could be different. Identification could be provided by: grouping objects by accounting units, indicating their distinctive features and locations relative to local objects, as well as by forming unique names for rural settlements that were previously of the same name. Cases have been identified in which certain identification methods could be used. It is shown that this could depend on the department in which the documents and cartographic materials were compiled (secular or spiritual; metropolitan, provincial or county); on the circle of persons who compiled the documents (their profession and type of activity); on the form of existence of the materials (hand-written or printed); on the number of settlements simultaneously taken into account in them (several tens or several thousand); depending on the number of copies of documents (several units or whole copies) and other circumstances. Based on the performed analysis, recommendations have been developed for finding places to store information about rural settlements in problematic cases. The research was performed using the Big Data tool on the example of 8 rural settlements of the Ruzsky district that had the same names at different time intervals of the XVI–XX centuries. It is shown that the use of the Big Data tool makes it possible to carry out research in this direction. The results of the presented research may be in demand by specialists searching for information about rural settlements of the XVIII–XX centuries in historical sources, researching the history of the Ruzsky and adjacent counties, as well as working in the fields of the history of surveying and the history of cartography.

KEYWORDS: Ruzsky district, Moscow province, identification of settlements, archival documents, historical maps

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о том, когда именно в Русском государстве было начато составление материалов, содержащих статистически значимые количества сведений об объектах недвижимого имущества, остается открытым. В настоящее время с уверенностью можно утверждать лишь то, что наиболее древними и подготовленными именно специалистами-историками к использованию в научных целях документами подобного плана являются приправочные книги [Генеалогическая..., 2004, с. 50] Звенигородского и Ружского уездов, содержащие сведения на середину XVI в. [Кондрашина и др., 1992; Кистерев, Тимошина, 1997].

Для названных материалов, как и для любых хранилищ информации, аккумулирующих в себе сведения о большом количестве однотипных объектов, наиболее удобной

¹ State University of Land Use Planning, Faculty of Land Use Planning and Environmental Management, 15, Kazakova str., Moscow, 105064, Russia, e-mail: anton.krass@gmail.com

является идентификация каждого из объектов с использованием какого-либо уникального для него признака [Адлер, Черных, 2016]. Уникальность эта может обеспечиваться как для ограниченной, так и для произвольно большой совокупности объектов. В качестве исторического примера первых из них можно привести совокупность поселений, расположенных на территории волости, а в качестве вторых — в границах губернии или государства.

В современных базах данных, например, используемых в Российской Федерации при учете объектов недвижимости, роль такого идентификатора выполняют кадастровые номера, присваиваемые каждому из принимаемых к учету объектов. В исторических же материалах подобием такого идентификатора являлись названия объектов. Преимущества использования *уникального* для каждого из учитываемых объектов идентификатора очевидны: они обеспечивают удобство при поиске сведений о соответствующих объектах среди данных о прочих схожих объектах, аккумулированных в различного вида хранилищах информации, которые могут представлять собой как современные базы данных, так и исторические материалы.

Основное различие между современными кадастровыми номерами и используемыми в исторических материалах названиями объектов (под объектами в настоящем исследовании подразумеваются поселения, а конкретно — села) с точки зрения представляемого исследования заключено в механизмах их формирования. В первом случае идентификаторы создаются (генерируются) с использованием специально предназначенных для этих целей алгоритмов, а уже затем переносятся в документы; во втором же случае названия первоначально формируются в той или иной общественной среде, а уже затем переносятся в документы [Мурзаев, 1974].

Исторически в Русском государстве сложилась ситуация, при которой в совокупности совместно учитываемых объектов (примером таковых могут являться поселения, расположенные на территории одной волости, уезда и иных территориальных образований) присутствовали по два и более объектов, названия которых были одинаковыми, что приводило к возникновению проблемы их идентификации. Наиболее трудным решение этой проблемы было для объектов одного типа, например, сел, у которых одинаковыми были не только названия, но и иные особенности, используемые для их идентификации [Постников, 1985].

В наши дни решение указанной проблемы может стать необходимым при выполнении генеалогических поисков «по восходящей», в ходе которых требуется отыскивать содержащиеся в документах сведения о родственниках, проживавших ранее в сельских поселениях, названия и принадлежность которых к административно-(церковно-) территориальным единицам изменялись с течением времени [Витов, 1967]. При этом указанная проблема является всего лишь одним из примеров возникающих в наши дни неудобств, вызванных происходившими в прошлом изменениями административного деления территории, на которой располагались поселения. В тех случаях, когда села имели одинаковые названия, решение этой проблемы становится еще более проблематичным. Следует заметить, что подобные неудобства возникали также и в предыдущие эпохи [Поспелов, 2008]. Исследование, результаты которого представлены в настоящей статье, было посвящено выяснению следующего:

- какие меры принимались для преодоления этих неудобств;
- какими способами решалась проблема идентификация сел в подобных случаях в Русском государстве;
- какие это имело последствия;
- и какие меры могут быть приняты исследователями в наши дни для идентификации сел с целью последующего поиска сведений о них.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выполнения представляемого в настоящей статье исследования был использован инструмент «Большие данные». Очевидно, что применительно к сведениям XVI–XX вв. использование инструмента «Большие данные» в полном соответствии современным представлениям о нем невозможно. Прежде всего это является следствием относительно малого количества доступной для сбора и анализа в процессе исследований информации. Однако возможности названного инструмента, позволяющие выявлять существующие между объектами исследований зависимости на основе анализа больших объемов разносторонних сведений¹, как в названные эпохи, так и в наши дни остаются одними и теми же. В отношении же количества обрабатываемой в процессе исследований информации следует сказать, что в смысл самого понятия «Большие данные» заложены аккумуляция и совместный анализ такого количества информации, которые могут быть выполнены практически *на пределе* существующих в ту или иную эпоху средств обработки. Из этого следует сделать вывод, что обрабатываемые объемы сведений должны быть соотносимы с имеющимися для их обработки в каждую конкретную из эпох мощностями, из чего следует, что эти объемы в различные эпохи могут значительно различаться между собой. Так, если в наши дни с использованием современных вычислительных средств становится возможным обрабатывать колоссальные объемы разносторонней информации, то для XVI в. под «Большими данными» следует понимать лишь немногие дошедшие до наших дней сведения, содержащиеся в писцовых, переписных, межевых и иных книгах, грамотах, указах, различных списках служащих исторических персон, письмах и прочих материалах, содержащих какие-либо упоминания об объектах исследований, т. к. средствами XVI в. ни аккумуляция, ни обработка больших объемов информации возможности не было.

В ходе представляемого исследования были использованы стандартные для реализации инструмента «Большие данные» методические подходы [Адлер, Черных, 2016]. Они дают возможность привлечь сведения, содержащиеся в различных по назначению и формам представления информации источниках. Применяемые же при реализации названного метода способы выявления зависимостей, в свою очередь, позволяют выявить зависимости, существовавшие между объектами исследований. *Ограниченность* же использования названного инструмента состоит в ничтожно малом (по представлениям наших дней) для его полноценного функционирования количестве принятых к анализу сведений и выполнении их анализа без использования компьютерных технологий².

В качестве фактологического материала в исследовании использованы материалы различных ведомств и уровней власти, составленные для территории Рузского уезда начиная с середины XVI и заканчивая началом XX вв.

¹ В качестве примеров можно привести два широко известных случая использования инструмента «Большие данные». Первый из них — это замеченное в 1796 г. Э. Дженнером обстоятельство, что ухаживающие за коровами персоны либо не заболевают натуральной оспой вовсе, либо, заболевая, переносят ее достаточно легко, что позволило впоследствии разработать первую в мире живую вакцину от этого заболевания. Второй — открытие Д. И. Менделеевым секрета бездымного пороха, выполненное на основе анализа ставших ему доступными транспортных накладных. И хотя *в действительности* имела место лишь первая из историй [Менделеев, 1949; Шамшева и др., 2016, с. 13, 14], обе они являются яркими примерами как того многообразия источников, содержащаяся в которых информации может оказаться существенной для решения поставленной задачи, так и того, сколь разнообразны факторы могут решающим образом определять особенности объектов исследований

² Допустимость такого подхода объясняется тем, что настоящее исследование призвано лишь продемонстрировать возможность применения инструмента «Большие данные» при выполнении подобных исследований

К анализу были приняты:

- рукописные и печатные документы;
- обзоры исторических материалов;
- копии документов, обработанные и изданные в соответствии правилами издания исторических документов;
- изготовленные литографическим способом картографические материалы.

Конкретные указания литературных, научных и архивных источников приведены в статье далее в соответствующих местах по мере упоминания каждого из материалов. Доступ к электронным копиям архивных документов возможен с использованием сайта Центрального городского архива Москвы (ЦГАМ). При выполнении исследования предпочтение отдавалось документам и картографическим материалам, содержащим *одновременно* все необходимые для выполнения анализа сведения обо всех объектах¹.

В представляемом исследовании подробно проанализирован промежуток времени с середины XVIII и до третьего десятилетия XX вв. Начальная дата этого интервала объясняется тем, что только начиная с этого времени становятся доступными для выполнения работ метрические и исповедные книги Рузского уезда. На анализе сведений, содержащихся в них, в значительной части и основано исследование. Сведения же, относящиеся к наиболее раннему времени, т. е. к середине XVI в., приводятся в статье лишь в качестве исторической справки, призванной продемонстрировать способы идентификации имеющих одинаковые названия объектов недвижимого имущества, исторически применяемые в Русском государстве, и свидетельствовать о значительной истории рассматриваемой проблемы, т. к. выполнение анализа, подобного выполненному для более позднего времени, на основе материалов XVI в. невозможно в силу крайне ограниченного их количества². Конечная же дата рассматриваемого отрезка времени, а именно — третье десятилетие XX в., объясняется тем, что произошедшие во втором десятилетии в России события коренным образом сменили уклад жизни Русского общества, кардинально изменив процессы образования названий поселений. Выполнение исследований в таких условиях требует привлечения иных подходов и не может быть осуществлено лишь с помощью инструмента, используемого для выполнения исследования настоящего.

В силу того, что доказательная база исследования построена на анализе большого объема содержащихся в исторических материалах (писцовых и метрических книгах, исповедных ведомостях, списках, справочниках, картографических материалах и пр.) сведений, для представления в настоящей публикации выполненного исследования было решено ограничиться использованием материалов, характеризующих территорию, оформившуюся к окончанию XIX в. в Рузский уезд Московской губернии. Для представления же исследования в качестве объектов были избраны 8 сел, попарно имевших на протяжении некоторых отрезков времени одинаковые названия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В начале исследования были рассмотрены наиболее древние, составленные в середине XVI в. [*Кистерев, Тимошина, 1997*] и оказавшиеся доступными для изучения исторические материалы, содержащие сведения о расположенных на территории Рузского уезда объектах недвижимого имущества. В результате было выяснено, что из примерно 2 000 объектов одинаковые названия имеют от 20 до 25 %. При этом около 40 % из

¹ В исторических материалах можно встретить случаи частичной утраты сведений

² Для выполнения исследований для территории Рузского уезда доступны только указанные выше источники, содержащие сведения по состоянию на середину XVI в.

одноименных объектов имеют также и одинаковые типы (села, деревни, сельца, селища, пустоши и пр.). Наиболее часто встречающимися названиями являются: «Высокое» — так называются 5 деревень, 1 сельцо и 1 пустошь; «Горки» — 1 деревня, 1 сельцо и 2 пустоши; «Дубровки» — 1 деревня, 1 погост и 2 пустоши¹.

Селами Рузского уезда, имеющими одинаковые названия, в это время были (рис. 1а): 2 села Никольских (волостей Замощье и Сестринского стана) и 4 села Покровских (волостей Воиничи и Юрьева Слобода, а также Локношского и Сестринского станов).

Анализ названных материалов, выполненный с точки зрения настоящего исследования показывает, что в тетрадах, содержащих сведения об учитываемых объектах, изначально составленных в отдельности для каждой волости или стана [Кистерев, Тимошина, 1997, с. 5–8], фигурируют, по-видимому, сформировавшиеся естественным образом и использовавшиеся в повседневной жизни названия сел (в настоящем исследовании предметом рассмотрения являются названия исключительно сел). В XVI в. при объединении тетрадей в книги не существовало практики составления реестров, которые обеспечивали бы отыскание требуемой информации посредством упорядоченного перечисления названий всех объектов, сведения о которых были аккумулярованы в книгах². Такой подход к организации хранения сведений обеспечивал однозначную идентификацию объектов посредством того, что сведения о них содержались в группах, объединенных по единству их принадлежности к одной волости (стану). Относительно небольшое количество входящих в группу объектов (порядка 100) практически исключало необходимость учета в ней объектов с одинаковыми названиями.

Материалов, пригодных для анализа в целях представляемого исследования, составленных в течение примерно двух последующих столетий, обнаружить не удалось. Поэтому следующими рассматриваемыми документами являются составленные примерно в середине XVIII в. духовным ведомством: сначала книги исповедных ведомостей, а позднее — и метрические книги. Указанные материалы составлялись ежегодно, причем значительная их часть сохранилась до нашего времени и является доступной для изучения [Генеалогическая..., 2004, с. 49]. Их использование обеспечивает возможность получения большого количества информации как об исторических персонах, так и о располагавшихся на территориях каждого из церковных приходов поселений.

Изучая книгу исповедных ведомостей церковью Рузской десятины³ за 1741 г., можно обнаружить только одну пару сел⁴, названия которых одинаковы. Эти села имеют названия «Горбово»⁵ (рис. 1б). Одно из них, с расположенным на его территории Одигитриевским (Смоленской Божией Матери) храмом, имело тип «село» еще издревле, а второе — приобрело этот тип только в 1644 г., после того, как на территории существовавшего прежде сельца с названием «Горбово» впервые был основан Казанский храм [Холмогоровы, 1881, с. 88, 141].

¹ Следует заметить, что сложившаяся на территории Рузского уезда ситуация с повторяющимися названиями не является типичной для всех территорий Русского государства этой эпохи. Так, например, в писцовых книгах Звенигородского (смежного с Рузским) уезда из примерно 1 000 объектов можно насчитать всего лишь около двух десятков тех, названия которых одинаковы. При этом количество повторов каждого названия не превышает двух, а типы соответствующих объектов, как правило, различаются. Повторяющихся же названий *сел* на территории Звенигородского уезда в эту эпоху нет вовсе

² Данное обстоятельство, по-видимому, может быть объяснено значительной трудоемкостью изготовления письменных материалов, характерной для XVI в.

³ Десятина (в контексте данной статьи) — единица церковно-территориального деления этой эпохи

⁴ ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 747, Д. 66, Л. II, Поб., III

⁵ В результате проведенных в течение двух предыдущих столетий реформ территориального деления некоторые села, ранее относившиеся к Рузскому уезду, стали учитываться в числе сел смежных с ним уездов

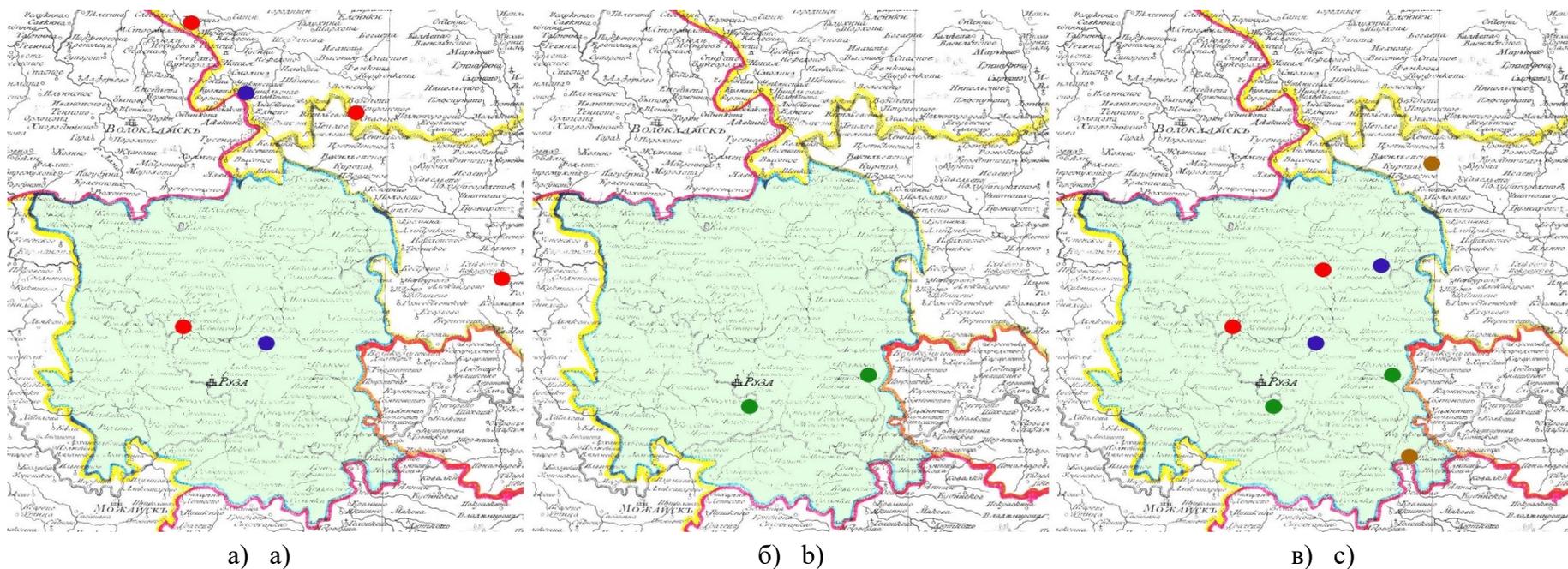


Рис. 1. Фрагмент листа № 17 Атласа 1792 г.¹ с указанием мест расположения относившихся к Рузскому уезду сел, имевших в различные эпохи одинаковые названия (границы и территория Рузского уезда указаны по состоянию на 1792 г.). Кружками красного цвета обозначены села Покровские, синего цвета — Никольские, зеленого — Горбовы, коричневого — Васильевские.

a) по состоянию на середину XVI в.; б) по состоянию на 40-е гг. XVIII в.; в) по состоянию на начало XIX в.

Fig. 1. Fragment of sheet No. 17 of the Atlas of 1792¹ with an indication of the locations of rural belonging to the Ruzsky district that had the same names in different eras (the borders and territory of the Ruzsky district are indicated as of 1792). The Pokrovskie rural are marked with red circles, Nikol'skie — blue, Gorbovi — green, Vasilevskie — brown.

a) s of the middle of the XVI century; b) As of the forties of the XVIII century; c) As of the beginning of the XIX century

¹ Российский атлас из сорока четырех карт состоящий и на сорок на два наместничества ИМПЕРИЮ разделяющий. Сочинен, гравирован и печатан при Горном Училище. СПб, 1792. 44 л.

The Russian atlas consists of forty-four maps and divides the EMPIRE into forty-two governorates. Composed, engraved and printed at the Mining College. St. Petersburg, 1792. 44 sheets (in Russian)

Анализируя сведения, приведенные в *заглавиях тетрадей* исповедных ведомостей (например, обоих сел Горбовых за 1741 г.¹), можно видеть, что для каждого села в них в первую очередь указываются сведения, являющиеся существенными для духовного ведомства: освящения расположенных на территориях каждого из сел храмов и фамилии (а также имена) священнослужителей. Для принадлежащих историческим персонам сел указываются и их владельцы. Приводимые сведения позволяли однозначно идентифицировать каждое село, т. к. полное совпадение указанного набора сведений для различных сел было практически невозможным.

В *реестрах* же книг² ввиду необходимости представления каждого упоминаемого в нем села посредством минимального, занимающего не более одной строки набора сведений, указывались только названия сел и освящения храмов. В случае с селами Горбовыми³ это позволяло однозначно идентифицировать каждое из сел вследствие того, что располагавшиеся на их территориях храмы имели разные освящения.

Сравнивая наборы сведений, приводимые для идентификации сел в светских и церковных документах, можно констатировать, что в церковных документах в качестве идентифицирующих признаков использовались особенности сел, существенные именно для духовного ведомства; волости же, в которых располагались села, в церковных документах, в отличие от светских, не указывались.

Анализируя иные, составленные также духовным ведомством документы, можно заметить стремление их составителей обеспечить удобство идентификации сел Горбовых путем придания им уникальных названий. Так, в списках священнослужителей Рузского уезда 1766 г.⁴ село Горбово, на территории которого располагался Одигитриевский храм, именуется «Одигитриевское Горбово»; другое же село Горбово, с Казанским храмом, названо: «Горбово, Казанской церкви». Позднее же, например, в книгах исповедных ведомостей 1788 г.⁵, второе из сел и вовсе получит новое название — «Богородицкое».

По материалам последующего времени можно отметить, что к середине 70-х гг. XVIII столетия уникальные названия сел этой пары использовались и в документах, составляемых светскими властями. Примерами этому служат их названия «Одигитриевское, Горбово тож» и «Богородское, Горбово тож», которые используются в описаниях землевладений [Кусов, 2004, с. 211, 189] и на межевых планах⁶, составленных по итогам выполнения генерального межевания территории Рузского уезда в 1766–1773 гг. Похожие названия, «Одигитриевское» и «Богородское», эти села имеют и на Географической карте Московской провинции 1774 г.⁷

Одновременно с названными выше процессами в три последних десятилетия XVIII в. происходили также и изменения административно-, и церковно-территориальных делений Московской губернии. Одним из их следствий являлось появление в числе

¹ ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 747, Д. 67, Л. 264, 424

² В Духовной Консистории составляли рукописные копии книг, переданных в нее из приходов церковью подведомственной десятины (уезда). В зависимости от места составления книги было принято называть консисторскими или приходскими [Генеалогическая..., 2004, с. 179]. Иногда, следуя традициям XVI в., копии приходских книг, являющиеся частями книг консисторских, продолжали называть *тетрадами*. Для удобства поиска книг (тетрадей) нужного прихода (церкви, села) в XVIII в. уже существовала практика составления реестров, или алфавитов

³ ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 747, Д. 66, Л. Поб., III

⁴ ЦГАМ, Ф. 607, Оп. 1, Д. 15, Л. 29, 29об.

⁵ ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 747, Д. 584, Л. 281

⁶ План генерального межевания одноверстного масштаба 1792 г.

Plan of the General survey of the single-layer scale of 1792 (in Russian)

⁷ Географическая карта Московской провинции, сочиненная с Генеральных Уездных межевых планов попечением Межевой Канцелярии членом Коллежского Советника Зенбулатова и Инженер Майором и над Чертежною Директором Горихвостовым. 1774 г.

поселений Рузского уезда еще нескольких пар, имеющих одинаковые названия сел. Так, в метрических книгах Духовной Консистории 1793 г.¹ можно видеть две пары сел с названиями «Никольское»² и «Покровское», а позднее, в книге исповедных ведомостей 1798 г.³ — и еще одну пару сел с названиями «Васильевское»⁴. При этом следует особо отметить, что названия этих сел являлись давно сформировавшимися и устойчивыми во времени, т. к. наименьшая продолжительность существования поселения с типом «село» в этой группе к этому времени уже превышала сто лет [*Красовский, 2020*].

Наиболее ранней, доступной и удобной для выполнения детального анализа, т. к. в ней содержатся подробные сведения обо всех рассматриваемых в настоящей статье 8 селах (включая в это число и два села Горбовых)⁵, является упомянутая выше консисторская книга исповедных ведомостей 1798 г.

Различать недавно вошедшие в состав Рузской десятины села Васильевские было возможно посредством имевшихся в заглавиях тетрадей каждого из них указаний освящений расположенных на их территориях храмов: Рождества Пресвятой Богородицы и Воскресения Христова соответственно. Для идентификации сел Покровских, на территориях которых располагались имеющие одинаковые освящения храмы Покрова Пресвятой Богородицы, можно было использовать имеющиеся в заглавиях тетрадей указания их владельцев: Долгоруковых для одного из них и Шереметевых для другого. Для идентификации же сел Никольских, на территориях каждого из которых располагались храмы, имеющие одинаковые освящения во имя Николая Чудотворца, приходилось использовать фамилии служивших в них священников⁶, т. к. иные сведения, позволяющие их идентифицировать (например, фамилии владельцев), указаны не были.

Основываясь же исключительно на сведениях прилагаемого к книге реестра, в котором, как и в иных реестрах, были указаны только названия сел и освящения расположенных на их территориях храмов⁷, определить, какое из сел Никольских или Покровских⁸ приводилось под тем или иным номером, возможности не было.

¹ ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 745, Д. 841

² Для третьего села Никольского, также впервые встречающегося в книге исповедных ведомостей церковей Рузского уезда 1798 г. [ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 747, Д. 729, Л. 1 об., 868], указывалось древнее название «Надовражное тож». Таким образом, название этого села являлось уникальным, в результате чего оно не рассматривалось в представляемом исследовании

³ ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 747, Д. 729

⁴ Кроме названных, начиная с конца XVIII в. в документах можно обнаружить присутствие еще одной пары одноименных сел — «Рождественских». Истории формирования их названий, несмотря на всю их сложность, отчасти схожи с историями формирования названий, представляемых в настоящей статье, поэтому сведений об этой паре сел в ней было решено не приводить

⁵ В *метрических* же книгах все 8 названных сел одновременно упоминаются только начиная с 1818 г.

⁶ Это обстоятельство способно осложнить использование подобных документов в наши дни, т. к. фамилии священнослужителей нам практически неизвестны. Для его преодоления следует анализировать сведения об имущественной принадлежности поселений (вотчин), упоминаемых в текстах записей, имеющих в исповедных или метрических тетрадях

⁷ Особенностью этой книги, как и иных книг данной эпохи, является отсутствие в ней реестра, составленного одновременно со снятием консисторских копий с исповедных книг каждого из приходов. В консисторской книге имеется только реестр, составленный в 1825 г. Реестры представляют интерес вследствие того, что в них идентификация церковей (сел), в отличие от заголовков тетрадей, выполнена посредством указания минимального набора сведений, т. е. с соблюдением того же условия, что и идентификация сел, сведения о которых приводятся в справочниках, составленных *светскими* властями

⁸ В реестре метрических книг 1796 г. (ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 745, Д. 874, Л. 9 об.) для сел Никольские и Покровские видны очевидно сделанные другим лицом в более позднее время (что понятно по иным пометкам и использованному пишущему средству) надписи, содержащие указания их владельцев, что свидетельствует о предпринимаемых пользователями этого документа попытках облегчения поиска сведений о них

В светских документах идентификация рассматриваемых в настоящей работе сел была организована иным способом. Так, в уже упомянутых выше описаниях землевладений, составленных в 1766–1773 гг., для идентификации указывались волости (станы), в которых они располагались, а также как актуальные на даты составления описаний, так и прежние их названия (при наличии таковых). Дополнительно к этому все объекты были нанесены на специально составленные карты одно- или двухверстных масштабов, что позволяло выполнять идентификацию с использованием местоположений каждого из них. Комплекс предпринятых мер позволял практически исключить возможность ошибочной идентификации каждого из объектов. На *обзорных* же картах, например, на карте десятиверстного масштаба 1792 г.¹ (на которых в силу специфики предъявляемых к ним требований отсутствовала возможность указания дополнительных сведений о поселениях, в частности, их исторических названий), фигурируют по 2 Васильевских и Покровских села, а также села Богородское, Одигитриевское и Никольское² (рис. 1в).

Процесс изменения названий рассматриваемых одноименных сел можно подробно проследить, пристально изучая церковные материалы различных годов. Эта возможность появляется вследствие той особенности церковных материалов, что как метрические книги, так и книги исповедных ведомостей составлялись ежегодно, начиная примерно с первой четверти XVIII столетия, и аккумулировали в себе сведения об отражаемых ими событиях и субъектах в количестве, позволяющем, хотя и с очевидными ограничениями, использовать инструмент «Большие данные». В то же время перечни населенных пунктов, справочники, описания землевладений, карты, атласы и иные подобные материалы (т. е. материалы, в которых также содержатся необходимые для выполнения настоящего исследования сведения) составлялись светскими властями весьма редко.

В составляемых духовными властями документах первой половины XIX в. можно заметить проявление двух тенденций. Первая из них — возвращение к исторически использовавшимся названиям, а вторая — изменение подходов к именованию сел и своеобразная «унификация» подходов к формированию их названий.

Под влиянием первой тенденции происходит возвращение к названиям, использовавшимся до эпохи реформ административно- и церковно-территориальных делений³. О ее проявлении свидетельствует то обстоятельство, что если в *заглавиях* тетрадей исповедных ведомостей 1741 г. для 32 сел Рузского уезда не приведено ни одного из 11 использовавшихся прежде названий⁴, то в *заглавиях*⁵ тетрадей исповедных ведомостей

¹ Российский атлас из сорока четырех карт состоящий и на сорок на два наместничества ИМПЕРИЮ разделяющий. Сочинен, гравирован и печатан при Горном Училище. СПб, 1792. 44 л.

² На карту нанесено только одно из рассматриваемых нами сел Никольских, принадлежавшее Шереметевым. Принадлежащее же Долгоруковым село Никольское, вероятно, вследствие ошибки, на карте не указано

³ Влияние этой тенденции приводит к указанию в различных материалах в качестве альтернативных ранее использовавшихся названий. Альтернативные названия указываются после названий, используемых на дату составления документа, и снабжены пометкой «тоже». Ее проявление можно обнаружить еще в писцовых книгах XVI в., книгах исповедных ведомостей первой половины XVIII в. и в материалах генерального межевания второй половины XVIII в. Наиболее же ярко она проявляется в первой половине XIX в.

⁴ К этому времени, помимо подробно рассматриваемых в настоящей статье сел Горбовых, типы «село» и новые названия «Спасское», «Воскресенское», «Богословское», «Воскресенское», «Знаменское», «Рождествено», «Преображенское», «Архангельское», «Пречистенское» и «Спасское» приобрели поселения (села, сельцы или деревни), именовавшиеся ранее «Дуброво», «Ивойлово», «Дорки», «Кожино», «Комлево», «Колубакино», «Крымское Дворище», «Мытники», «Поповское» и «Сляднево» соответственно [Красовский, 2020]

⁵ В 10-е гг. XIX в. изменяются подробность и форма представления сведений в метрических книгах, однако представляемый в *заглавиях* тетрадей набор сведений существенных изменений не претерпевает

1834 г.¹ указаны прежние названия уже 3 из 11 переименованных ранее сел² (не считая сел, изменения названий которых являются предметом настоящего исследования). Не исключено, что это происходило под влиянием того обстоятельства, что в деловой практике продолжали использоваться названия, которые ранее употреблялись в общественной жизни и продолжали фигурировать в материалах, составляемых светскими учреждениями, например, военно-топографическим депо^{3,4} и почтовым ведомством⁵.

Под влиянием же второй тенденции в устойчивых во времени одинаковых названиях сел формируются указываемые через черточку вторые части. Это позволяло сформировать уникальное название для каждого села, например, посредством указания фамилии его владельца, тем самым обеспечив его однозначную идентификацию⁶.

Наиболее отчетливо обе указанные тенденции проявляются в названиях сел, приводимых в *реестрах* метрических книг⁷ 1846 г.⁸ В результате их влияния избранные для представления настоящего исследования названия сел становятся следующими: «Васильевское Яковлевых» — «Васильевское Хлебниковых», «Горбово Тупина» — «Горбово Пашкова» и «Никольское Долгоруковых» — «Никольское Гагарина».

В отношении же пары сел Покровских следует сказать, что в десятые годы XIX в. принадлежащее фамилии Долгоруковых поселение Покровское утрачивает тип «село» и становится деревней с названием «Покров» [Красовский, 2020]. Однако, несмотря на это, в

¹ ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 747, Д. 1252

² Это происходит с названиями сел: «Богословское, Каменка тоже», «Знаменское, Комлево тоже», «Архангельское, Мытники тоже» (ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 747, Д. 1252, Л. 511, 561 и 727). Еще в 6 из этих 11 случаев к этому времени произошел возврат к названиям, использовавшимся до эпохи, в которую поселения получили новые названия, образованные от освящений основанных или ранее уже существовавших на их территориях храмов. Так, были возвращены древние названия сел Дуброво, Ивойлово, Крымское, Кожино, Коллюбакино и Сляднево (ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 747, Д. 1252, Л. 339, 437, 467, 577, 609 и 970)

³ Специальная карта западной части Российской империи, составленная и гравированная в 1/420 000 долю настоящей величины при Военно-топографическом депо во время управления Генерал-квартирмейстера Нейдгарта под руководством Генерал-лейтенанта Шуберта, 1832. 63 л.

⁴ На картах этого времени присутствуют ошибки, о которых следует помнить современному исследователю. Так, на карте Шуберта 1832 г. отсутствуют некоторые значимые поселения (например, село Ащерино); названия некоторых поселений искажены (деревня Редькина поименована деревней «Родкина»); а типы поселений могут быть указаны неверно (для поселения с названием «Покров», принадлежавшего Долгоруковым, и на дату составления карты имеющего тип «деревня» по-прежнему, указан тип «село»). Это может быть объяснено большим объемом информации, отображаемой на карте, высокой трудоемкостью и, по современным меркам, примитивностью технологии ее изготовления

⁵ Дорожная карта Российской империи, всем почтовым, проселочным, проезжим дорогам способным для кратчайшего проезда всякому вообще, а паче нужным для провозу товаров торгующему купечеству и прочим промышленникам. Соч. в 1809 г. СПб, 1809. 1 л. цв., раскраш. границы, табл.

⁶ Описания землевладений также содержат указания их владельцев, однако в наши дни с использованием этого признака возможно идентифицировать только те объекты, которые на протяжении длительных промежутков времени принадлежали одним и тем же фамилиям, например, Долгоруковых и Шереметевых

⁷ В 40-е гг. XIX столетия происходит очередное изменение формы представления приходскими метрическими сведениями: сведения о храмах теперь указываются не в заглавиях, а на их титульных листах, а формируемые приходскими метрическими документами называются не тетрадами, а книгами. Кроме того, происходит уменьшение количества сведений, указываемых на титульных листах книг: на них отныне не приводятся фамилии настоятелей храмов и священников. При этом подробность сведений, приводимых в отношении регистрируемых в метрических книгах событий, напротив, еще более возрастает

⁸ ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 745, Д. 1717, Л. I; ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 745, Д. 1718, Л. I

названии второго, сохранившего тип «село» поселения этой пары, остается вторая составляющая, указывающая фамилию его владельца: «Покровское Шереметева»¹.

Используемые в это время способы идентификации в церковных документах сел с продолжающими оставаться одинаковыми названиями нельзя назвать устоявшимися и единообразными. В некоторых случаях для этого, как и ранее, указываются освящения располагающихся на территориях сел храмов (примером этого подхода является пара сел Васильевских²). В некоторых случаях идентификация может быть обеспечена посредством указания большего количества сведений, указываемых, например, в *заглавиях* тетрадей (или на *титульных листах*) метрических книг³. Однако следует учитывать, что в *заглавиях* тетрадей (как и на *титульных листах* книг) могут быть указаны названия сел, отличающиеся от указанных в *реестрах*. Примером этому являются названия пары сел Горбовых, для которых в заглавиях тетрадей исповедных ведомостей 1834 г. указаны названия «Одигитриевское, Горбово тоже» и «Горбово», в то время как в реестрах они фигурируют под названиями «Горбово Мосальских» и «Горбово Хованских» соответственно⁴.

Еще одна особенность *реестров* церковных документов середины XIX в. состоит в том, что вторая часть приводимых в них названий сел может содержать⁵ указания фамилий персон, которые могли являться как их единственными владельцами, так и быть их *совладельцами* на даты составления документов или когда-либо в прошлом. Так, в реестре метрической книги 1846 г. вторая часть названия села Васильевского с расположенным на его территории Воскресенским храмом содержит указание фамилии Яковлевых, в то время как персоны этой фамилии владели селом только в середине 30-х гг. XIX в.;⁶ позднее же, в 1847 г. (прочитать соответствующие записи в книге 1846 г. возможности не представилось), его *совладельцами* являлись члены фамилий Щербатовых и Бартололи⁷. Также, указанные в реестре книги 1846 г. в названии одного из сел Васильевских (с расположенным на его территории Рождественским храмом), члены фамилии Хлебниковых были не единственными его владельцами, а лишь *совладели* им наряду с членами фамилий Вейденгаммер, Бунс и Волинских⁸. Таким образом, становится возможным заключить, что в реестрах метрических книг и книг исповедных ведомостей 40-х гг. XIX в. для одноименных сел во вторых частях их названий могут быть указаны изменяющиеся год от года фамилии их владельцев. Это является свидетельством отсутствия единого и устоявшегося подхода к формированию названий таких сел с одной стороны, и о предпринятии попыток облегчения их идентификации посредством выработки уникальных названий каждого из них — с другой⁹.

¹ Это село и далее будет оставаться единственным в уезде селом, сохранившим в своем названии составляющую «Покровское». Поэтому в дальнейшем представлении настоящего исследования эта пара поселений упоминаться не будет

² ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 745, Д. 1717, Л. 671 и 715

³ При недостаточности приводимых в указанных местах сведений для идентификации сел в наши дни можно использовать сведения, содержащиеся в метрических записях о каждом регистрируемом событии

⁴ ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 747, Д. 1252, Л. I и Юб., 367, 385

⁵ Это имеет место примерно в половине случаев, в оставшихся же случаях какие-либо уточнения отсутствуют. Примерами наличия и отсутствия подобных записей могут служить реестры метрических книг 1846 и 1847 гг. соответственно (ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 745, Д. 1717, Л. I; ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 745, Д. 1742, Л. I)

⁶ ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 745, Д. 1333, Л. 26

⁷ ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 745, Д. 1742, Л. 616об. 621

⁸ ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 745, Д. 1742, Л. 668об. 674

⁹ Кроме того, происходящие с течением времени изменения фамилий владельцев сел, влекущее за собой изменения их названий, вызывает очевидные неудобства при использовании сформированных подобным образом названий, и в конечном итоге делает его весьма затруднительным

Анализируя реестры церковных документов, составленные в течение 50-х гг., например, метрической книги 1855 г., можно заметить, что во вторых частях названий бывших ранее одноименными сел в большинстве случаев указываются фамилии *наиболее значимых* исторических персон, когда-либо ранее владевших ими¹. В результате появляются названия: «Горбово Мосальских» и «Горбово Хованских», а также «Никольское Долгоруковых» и «Никольское Гагариных»². Для идентификации же сел Васильевских в эти годы используется географический признак: для села, расположенного на берегу реки Москвы (с Воскресенским храмом³), в реестре упомянутой выше метрической книги 1855 г. указывается — «Васильевское на Москве реке».

На основе выполненного анализа составляемых духовным ведомством рукописных документов становится возможным заключить, что для большинства ранее имевших одинаковые названия сел⁴ к 50-м гг. XIX в. был выработан способ формирования и сформированы пригодные для использования *в этих документах* устойчивые во времени и в то же время уникальные названия. В результате этого большая часть сел могла быть однозначно идентифицирована исключительно с использованием их названий.

Впоследствии, на протяжении второй половины XIX в. и в начале XX в., названия рассматриваемых в настоящей публикации сел практически не изменялись. Увидеть, какими они были, можно на титульных листах метрических книг из 1912 г.⁵ В таком же виде их можно встретить и в используемых нами описях материалов, находящихся на хранении в Центральном городском архиве Москвы. Для сел двух первых пар: «Горбово-Хованское» — «Горбово-Мосальское» и «Никольское-Гагарина» — «Никольское-Долгорукого» соответственно. Села третьей пары имеют одинаковые названия: «Васильевское». Очевидно, что уникальные названия обеспечивали возможность идентификации каждого из сел не прибегая к указанию их иных особенностей, а села же третьей пары различали (и различают, при выполнении различных работ в наши дни), зная освящения действовавших в них храмов.

Анализ названий, использовавшихся приблизительно в это же время в издаваемых светскими властями печатных материалах, можно выполнить с использованием сведений изданного в 1862 г. Сборника статистических сведений о населенных местах Московской губернии⁶. В нем присутствует значительное количество объектов, имеющих одинаковые названия. Правда, во многих случаях типы этих объектов различаются. Так, во всех уездах Московской губернии, в которых в совокупности насчитывалось 5 811 поселений, 54 объекта имеют название «Никольское», 27 — «Покровское», 20 — «Васильевское» (без разделения на «Васильевская» и «Васильевское») и 6 — «Горбово».

¹ На титульных листах книг продолжают указываться только освящения храмов, расположенных на территориях сел, и лишь в случаях полного совпадения и названий, и освящений для разных сел (как это имеет место для сел Никольских) — вторые части указанных в реестре их названий

² И все же следует заметить, что во вторых частях названий сел, приводимых в реестрах, в редких случаях по-прежнему можно встретить фамилии владельцев, актуальные на даты составления соответствующих документов. В качестве примера можно привести случай с, казалось бы, уже устоявшимся во времени названием села «Горбово Мосальское», которое в реестре исповедных ведомостей 1854 г. обозначено как «Горбово Г. Пашковой» (ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 747, Д. 1688, Л. 1)

³ Здесь и далее по тексту статьи в подобных случаях в скобках приведены указываемые в документах и рассмотренные ранее в примерах особенности, позволяющие понять, о каком именно из одноименных сел ведется речь

⁴ ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 745, Д. 1959, Л. 1, Юб.

⁵ ЦГАМ, Ф. 203, Оп. 780, Д. 4368 и 4370

⁶ Московская губерния. Список населенных мест по сведениям 1859 г. Издан центральным статистическим комитетом министерства внутренних дел. Обработан Старшим Редактором Е. Огородниковым. СПб.: Типография Карла Вульфа, 1862. Т. 2

Для именования рассматриваемых в представляемой работе сел Горбовых в названном сборнике используются ранее уже встречавшиеся названия «Горбово» и «Богородское», для пары сел Никольских — «Никольское» и «Ново-Никольское» (Гагариных и Долгоруковых, соответственно), оба же села Васильевских носят одинаковые названия.

В алфавитном указателе рассматриваемого сборника населенных мест, призванном облегчить поиск необходимых сведений о них (что делает его назначение аналогичным оному для рассмотренных выше реестров церковных документов), указаны названия *уездов* и номера станов¹ (это номера «1» или «2»), в которых они располагаются². Это способствует значительному уменьшению неопределенности при поиске сведений о нужном поселении, но не исключает полностью возможности возникновения проблемы идентификации объектов с одинаковыми названиями и типами, т. к. в каждом из станов учитываются объекты, располагающиеся на территориях, примерно равных половине территории уезда.

Для обеспечения же однозначной идентификации объектов в основном разделе рассматриваемого издания применен оригинальный прием: внутри указанных станов для каждого из уездов объекты перечисляются в той последовательности, в которой их встречал бы путник, следовавший из указанного в справочнике пункта отправления в пункт назначения, по левую или правую сторону от соединявших эти пункты шоссе, трактов, железных дорог и прочих объектов транспортной инфраструктуры.

Подводя итоги анализа всех приведенных выше материалов XVI–XIX вв., имеющих текстовую форму представления информации, можно отметить, что в них для идентификации имеющих одинаковые названия сел могли указываться как те сведения о селах, которые являются существенными и специфическими для составляющего материалы *ведомства* (например, для духовного ведомства таковыми являлись освящения храмов и фамилии священнослужителей), так и *общие сведения* (например: названия уездов и волостей, а также номера станов, в которых они располагались; фамилии персон, которым они принадлежали; их расположения относительно природных или антропогенных объектов и пр.).

Начиная с середины XIX в. в Российской империи создается значительное количество картографических материалов.

На наиболее известной профессиональному сообществу нашего времени, двухверстной топографической карте Московской губернии 1860 г., созданной военно-топографическим депо под руководством Ф. Ф. Шуберта³, села Васильевские и Никольские рассматриваемых пар имеют одинаковые, не снабженные какими-либо дополнительно идентифицирующими их сведениями названия, и лишь для одного из сел Горбовых под его основным названием, «Горбово», в скобках более мелким, чем использованным для указания основного названия шрифтом, приведено уточнение: «Богородское».

Фигурировавшие на этой карте названия поселений можно встретить также и на издаваемых вплоть до 20-х гг. следующего века иными светскими ведомствами картографических материалах. Примерами могут служить следующие карты десятиверстного

¹ Понятие «стан» в XIX и XVI вв. имеют различное толкование. Территории станов XIX в. значительно более крупные, чем в XVI в., и равны примерно половине территории уезда

² Для поселений указаны также и их номера, являющиеся сквозными для обоих томов справочника, но они призваны лишь обеспечить удобство отыскания места нахождения необходимых сведений в справочнике

³ Топографическая карта Московской губернии. Составлена с топографической съемки, произведенной в 1852 и 1853 гг. СПб.: Военно-топографическое депо, 1860. 40 л.

масштаба: Карта Московской губернии Тодта¹, Карта производств², Гидрогеологическая карта³ и Карта земских пунктов⁴. Использование названий, указанных именно на карте Шуберта 1860 г. можно объяснить тем, что ситуация на этой карте была изображена с высокой точностью и подробностью, в следствие чего на основе этой карты создавались многие последующие, как все названные выше, так и иные, картографические материалы.

Таким образом, можно констатировать, что с течением времени наносимые на картографические материалы названия поселений оставались практически неизменными. От используемых на карте Шуберта 1860 г. их отличало лишь отсутствие указаний *использовавшихся ранее названий*⁵.

Все отмеченное выше, казалось бы, приводит к выводу, что используемые в материалах, издаваемых светскими властями во второй половине XIX – начале XX вв. названия сел являются устоявшимися и практически неизменными. Однако названия сел, фигурирующие в Сборнике статистических сведений по Московской губернии 1881 г., весьма отличаются от указанных выше. В тексте сборника для рассматриваемых сел двух первых пар используются названия, соответственно: «Богородское-Горбово» — «Горбово» и «Никольское-Гагарино» — «Никольское», а оба села третьей пары имеют устойчивые во времени одинаковые названия⁶ «Васильевское» [Сборник..., 1881, с. 20, 21]. На прилагаемой же к сборнику составленной в шестиверстном масштабе карте⁷ села двух первых пар имеют несколько иные названия: «Богородское» — «Горбово» и «Никольское-Гагарино» — «Долгоруково» соответственно.

Еще один пример употребления иных названий рассматриваемых сел представляют «Списки господам помещикам и имениям Рузского уезда»⁸. Этот документ, представлявший информацию по состоянию на 16 февраля 1861 г., был составлен по поручению Московского дворянского депутатского собрания. В нем села принятых к анализу в настоящей работе пар имеют следующие названия: «Богородское, Горбово тоже» (Хованских; в 1861 г. принадлежало штаб ротмистру Девитте) — «Одигитриевское» (Мосальских; в 1861 г. — девицы Пашковой) и «Никольское» (в 1861 г. — Гагариных) — «Ново-Никольское» (в 1861 г. — Долгоруковых).

Рассматривая материалы двух последних примеров, можно заметить, что они были подготовлены с использованием документов, составленных непосредственно в уезде по

¹ Планы на уездные города и посады Московской губернии. Составлены надворным советником Тодт, 1873. Атлас. 17 л.

² Общая сводка по санитарным исследованиям фабричных заведений Московской губернии за 1879–1885-е гг. Часть I. М., 1890. 101 с. 3 л.

³ Гидрогеологический очерк Московской губернии Н. Д. Соколова с портретом Н. Д. Соколова и гидрогеологическою картою Московской губернии. Под ред. и с доп. статьями В. Д. Соколова. М.: Московск. губ. земство, 1913. 158 с. 2 л.

⁴ Московская губерния. Лечебные, ветеринарные, страховые и агрономические земские пункты и шоссейные дороги к началу 1916 г. М.: Типография товарищества Кушнерева и Ко, 1916. 1 л.

⁵ Проблема идентификации изображенных на картографических материалах поселений не стоит столь остро ввиду того, что указываемое на картах местоположение объектов обеспечивает возможность различать поселения с одинаковыми названиями. Однако при использовании картографических материалов возникновение проблемы идентификации одноименных поселений все же возможно, например, при составлении их описаний на основе снятой с карт информации, в ходе которого может потребоваться приведение уточняющих сведений о том, о каком именно из одноименных поселений ведется речь

⁶ В данном случае села различают посредством приведения сведений о них в числе сел, относящихся к различным волостям

⁷ Схема церковных приходов и волостей Можайского и Рузского уездов 1877 г., составленная по поручению Московской губернской земской санитарной комиссии С. Матвеевым

⁸ ЦГАМ, Ф. 4, Оп. 17, Д. 375

поручению губернских властей и содержали сведения о небольшом количестве объектов¹. В использованных для подготовки этих материалов исходных документах фигурировали названия, которые, подвергаясь изменениям, были сформированы и использовались в эпохи составления каждого из документов представителями различных общественных групп, в т. ч. и весьма немногочисленных². Именно этим обстоятельством, по всей видимости, и следует объяснить присутствие в рассмотренных материалах названий сел, используемых практически в месте их расположения (в уезде). Эти названия буквально «проникали» вместе со сведениями, содержащимися в используемых документах, в создаваемые на их основе материалы. Так могло происходить и при создании указанного статистического сборника³, для подготовки которого использовались документы духовного ведомства: метрические книги⁴ и исповедные ведомости [Сборник..., 1881, с. 14, 65].

Наиболее поздними из проанализированных в представляемом исследовании материалов являются два справочника, подготовленных светскими властями губернского уровня в начале XX в.

В первом из них, Приложении к памятной книжке Московской губернии 1911 г., содержатся сведения примерно о 7 350 поселениях. В первой паре объектов, избранных для представления настоящего исследования, оба села называются одинаково — «Горбово»; пара сел Никольских — «Никольское» (Гагарина) и «Ново-Николаево» (Долгоруковых), соответственно; название располагающегося на реке Москве села Васильевского не изменяется, а на месте второго села Васильевского теперь расположены два села, имеющие названия: «Нижнее Васильевское» и «Верхнее Васильевское»⁵ [Приложение..., 1911, с. 400, 401, 406, 409, 411, 417].

Во втором из них, изданном в 1929 г., уже в эпоху существования СССР, очередном, содержащем статистические сведения примерно о 7 500 поселениях справочнике, фигурируют следующие пары названий рассматриваемых сел⁶: «Горбово» — «Горбово (Мос.)» (Мосальских), «Никольское» (Гагарина) и «Никольское Д.» (Долгоруковых), «Васильевское» (расположенное на реке Москве) — «Васильевское-Нижн.» и «Васильевское-Верхн.», соответственно. Интересно отметить, что принадлежавшее Шереметевым село Покровское в этом справочнике фигурирует под названием «Покровское-Шереметев.», вероятно, по причине того, что это название, являясь уникальным, обеспе-

¹ В это время в Рузском уезде количество сел не превышает 5 десятков

² В данном случае речь ведется о группе лиц, являвшихся консисторскими служащими. К сожалению, в наши дни не представляется возможным выяснить, сформированные и используемые в каких именно общественных группах названия переносились в создаваемые тем или иным ведомством материалы. Это могли быть лица, объединенные, например, по территориальному (чиновники столичных, губернских или уездных ведомств), ведомственному (пути сообщения или горное дело) или иным признакам

³ Эти названия в несколько измененном виде можно обнаружить и на прилагаемой к сборнику карте

⁴ В Российской империи регистрация фактов рождения и заключения брака, а также смерти и ее причин для лиц Православного вероисповедания велась *церковными* властями (для лиц иных конфессий — полицией) [Генеалогическая..., 2004, с. 28, 29]. Следует заметить, что при подготовке сборника использовались также и сведения, полученные в результате проведенной в 1869 г. *светскими* властями подворовой переписи населения [Сборник..., 1881, с. 16]

⁵ В документах 10-х и на картах 30-х гг. XX в. то из сел Васильевских, на территории которого располагался Рождественский храм, будет именоваться «Нижнее Васильевское». Изменение названия произошло вследствие того, что по мере развития этого села две его части, расположенные на разных сторонах правого притока реки Болденки, стали рассматриваться составителями различных материалов как два разных поселения: «Нижнее Васильевское» и «Верхнее Васильевское». В 80-е же годы XX в. это село в документах и на картах, как встарь, будет вновь именоваться Васильевским

⁶ Заметим, что в 1922 г. Рузский уезд был упразднен, а его волости были переданы смежным с ним уездам

чивало однозначную идентификацию данного села [Справочник..., 1929, с. 106, 126, 128, 358, 360, 364].

Несмотря на то, что в справочнике 1929 г. названия всех рассмотренных в ходе представления настоящего исследования сел являются уникальными, в нем все также присутствуют и села, названия которых одинаковы: 5 Васильевских, 7 Никольских и 9 Покровских (с учетом же деревень одноименных поселений значительно больше).

Однозначная идентификация каждого из имеющих одинаковые названия сел в реестрах названных материалов обеспечивалась путем указания волостей, в которых они располагались, а в основных частях — посредством приведения сведений о них среди поселений, сгруппированных по этому признаку. Таким образом, следует признать, что способ идентификации оставался тем же самым, что и в писцовых книгах середины XVI в.

В результате анализа всех использованных для выполнения настоящего исследования материалов (составляемых как светскими властями, так и церковными; как в рукописном виде, так и в печатном; как имеющих текстовую форму представления информации документов, так и картографических материалов) можно сделать следующие заключения.

Фигурирующие в исторических материалах названия *существенным образом* определялись *способом* создания этих материалов и количеством учитываемых в них объектов.

Составленные «от руки» в единственном экземпляре материалы духовного ведомства содержали сведения о небольшом количестве совместно учитываемых объектов. Это приводило к тому, что сделанные в их регистрах пометки и предпринимаемые попытки сформировать уникальные названия упоминаемых в них сел не могли оставаться незамеченными их пользователями, что в конечном итоге способствовало формированию удобных в использовании названий. Эти названия употреблялись членами сформировавшей их группы лиц, лишь в редких случаях «выходя» за ее пределы.

В материалах, содержащих сведения о больших количествах объектов, фигурировали исторически устоявшиеся названия объектов. Эти названия были сформированы в течение естественного потока жизни Русского общества и использовались различными общественными группами, позднее находя свое отражение в документах. Изменения используемых в подобных материалах названий происходили лишь в редких случаях. Целенаправленное формирование уникальных названий для идентификации каждого из объектов в этих случаях было практически невозможным¹.

Завершая представление настоящего исследования, следует отдельно отметить, что используемые для его выполнения методические подходы инструмента «Большие данные» позволили использовать сведения, содержащиеся в источниках, различающихся по их назначению и формам представления содержащейся в них информации (картографические материалы, метрические книги, статистические справочники и пр.), а обеспеченные именно с его использованием способы выявления зависимостей — выявить, в частности, зависимость между фигурирующими в исторических материалах названиями поселений и условиями, оказывавшими влияние на их формирование, а также зависимость особенностей различных материалов от тех или иных характеристик их составителей.

¹ Имевшие идеологическую основу и протекавшие в СССР в более поздние периоды времени под централизованным влиянием власти процессы формирования и последующего внедрения в использование названий различных поселений, протекавшие с учетом «интересов классовой борьбы», «искоренения пережитков прошлого», «формирования образа будущего» и прочих не являются предметом настоящего исследования вследствие необходимости использования иных подходов для их изучения

ВЫВОДЫ

В результате выполнения настоящего исследования становится возможным сделать следующие выводы:

1. Названия одних и тех же сел, фигурирующие в материалах, составляемых различными ведомствами в одну и ту же или в различные эпохи, а также в материалах, созданными властями уездного, губернского и иных уровней, могут различаться.
2. Идентификация одноименных сел в светских документах XVI – начала XX вв. при выполнении исследований в наши дни может быть выполнена посредством знания либо административно-территориальных единиц, на территориях которых они располагаются, либо их расположений относительно природных или антропогенных объектов. В церковных же документах XVIII – начала XX вв. идентификация одноименных сел может быть выполнена посредством принятия во внимание их отличительных особенностей, как специфических для духовного ведомства, так и их иных, светских.
3. Названия сел, представляющие интерес значительной части современного Русского общества и используемые при выполнении генеалогических исследований, а также фигурирующие в составленных церковными властями метрических книгах и книгах исповедных ведомостей, представляют собой лишь один из случаев названий, сформированных и используемых группой людей, объединенных по ведомственному признаку (церковных служащих).
4. В случае возникновения значительных затруднений, обусловленных проблематичностью поиска мест хранения сведений о поселениях, следует рассматривать как историю самих поселений, так и историю изменений административно-территориального и церковно-территориального делений той территории, на которой они располагаются.
5. Использование инструмента «Большие данные» при выполнении исследований в географии, картографии, истории межевого дела, генеалогии, краеведения и иных областях позволяет скрупулезно и всесторонне анализировать большие объемы разносторонних сведений, содержащихся в исторических материалах; выявлять способы их структурирования, применявшиеся специалистами различных ведомств в различные эпохи; и на основе этого вырабатывать имеющие прикладное значение рекомендации по отысканию необходимых сведений в наиболее затруднительных случаях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Адлер Ю. П., Черных Е. А. Статистическое управление процессами. «Большие данные». Учебное пособие. М.: Издательский Дом МИСиС, 2016. 52 с.

Витов М. В. Севернорусская топонимия XV–XVIII вв. как исторический источник. Вопросы языкознания. М.: Наука, 1967. № 4. С. 75–91.

Генеалогическая информация в государственных архивах России: Справочное пособие. М.: Федеральное архивное агентство, ВНИИДАД, 2004. 280 с.

Кистерев С. Н., Тимошина Л. А. Рузский уезд по писцовой книге 1567–1569 гг. Материалы для истории Звенигородского края. Вып. 4. М.: Памятники исторической мысли, 1997. 300 с.

Кондрашина В. А., Лукичев М. П., Тихонюк И. А. Приправочный список с писцовых книг Звенигородского уезда 1558–1560 гг. Материалы для истории Звенигородского края. Вып. 1. М.: Памятники исторической мысли, 1992. 156 с.

Красовский А. П. Оценка изменений совокупности сельских храмов Рузского уезда Московской губернии в XVII–XIX вв. на основе документальных и картографических материалов. В сборнике: Жизнь и смерть в Российской империи. Новые открытия в области археологии и истории России XVIII–XIX вв. М.: Институт археологии РАН, Институт российской истории РАН, 2020. С. 193–209.

Кусов В. С. Земли Московской губернии в XVIII веке. Карты уездов. Описание землевладений. М.: Издательский дом «Московия», 2004. Т. 3. 14 л.

Менделеев Д. И. Сочинения. Т. IX: Пороха. Ленинград – М.: Издательство Академии Наук СССР, 1949. 313 с.

Мурзаев Э. М. Очерки топонимики. Институт географии АН СССР. М.: Мысль, 1974. 384 с.

Поспелов Е. М. Географические названия Московской области. Топонимический словарь (более 3500 ед.). М.: Астрель, 2008. 608 с.

Постников А. В. Развитие картографии и вопросы использования старых карт. М.: Наука, 1985. 216 с.

Приложение к памятной книжке Московской губернии на 1912 г. Издание Московского Столичного и Губернского Статистического Комитета. М.: Губернская типография, 1911. 459 с.

Сборник статистических сведений по Московской губернии. Отдел санитарный. Т. II. Вып. I: Очерк статистики народонаселения Рузского и Можайского уездов С. П. Матвеева. Издание Московского губернского земства. М.: Типография С. В. Гурьянова, 1881. 226 с. (с 9 пл. и 7 диаг.).

Справочник по населенным местам Московской губернии. По материалам всесоюзной переписи 1926 г. Издание Московского статистического отдела, 1929. 349 с.

Холмогоров В. И., Холмогоров Г. И. Исторические материалы для составления церковных летописей Московской епархии. Вып. 1, А: Рузская десятина. М.: Типография Л. Ф. Снегирева, 1881. 288 с.

Шамшева О. В., Учайкин В. Ф., Медуницын Н. В. Клиническая вакцинология. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2016. 576 с.

REFERENCES

Adler Yu. P., Chernykh E. A. Statistical process management. “Big Data”. Textbook. Moscow: Publishing House of MISiS, 2016. 52 p. (in Russian).

Appendix to the commemorative book of the Moscow province for 1912. Publication of the Moscow Metropolitan and Provincial Statistical Committee. Moscow: Gubernskaya Printing House, 1911. 459 p. (in Russian).

Collection of statistical information on the Moscow province. The sanitary department. V. II, Iss. I. An essay on population statistics of the Ruzsky and Mozhaisky districts by S. P. Matveev. Edition of the Moscow provincial zemstvo. Moscow: Printing House of S. V. Guryanov, 1881. 226 p. (with 9 maps and 7 diagrams) (in Russian).

Directory of populated places in the Moscow province. Based on the materials of the All-Union census of 1926. The publication of the Moscow Statistical Department, 1929. 349 p. (in Russian).

Genealogical information in the State Archives of Russia: Reference manual. Federal Archive Agency, VNIIDAD. Moscow: 2004. 280 p. (in Russian).

- Kholmogorov V. I., Kholmogorov G. I.* Historical materials for compiling Church Chronicles of the Moscow diocese. Iss. 1, A: Ruzskaya tithe. Moscow: Printing House of L. F. Snegirev, 1881. 288 p. (in Russian).
- Kisterev S. N., Timoshina L. A.* Ruzsky district according to the scribe's book of 1567–1569. Materials for the history of Zvenigorod region. Iss. 4. Moscow: Monuments of historical thought, 1997. 300 p. (in Russian).
- Kondrashina V. A., Lukichev M. P., Tikhonyuk I. A.* Seasoning list from the scribal books of Zvenigorod district in 1558–1560. Materials for the history of Zvenigorod region. Iss. 1. Moscow: Monuments of historical thought, 1992. 156 p. (in Russian).
- Krassowski A. P.* Assessment of changes in the set of rural churches of the Ruzsky district of the Moscow province in the XVII–XIX centuries on the basis of documentary and cartographic materials. In the collection: Life and Death in the Russian Empire. New discoveries in the field of archeology and history of Russia of the XVIII–XIX centuries. Moscow: The Institute of archaeology of the Russian Academy of Sciences, Institute of Russian history of the Russian Academy of Sciences, 2020. P. 193–209 (in Russian).
- Kusov V. S.* Lands of the Moscow province in the XVIII century. Maps of the counties. Description of land holdings. Moscow: Publishing House "Moskovia", 2004. V. 3. 14 sheets (in Russian).
- Mendeleev D. I.* Writings. V. IX: Gunpowders. Leningrad–Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1949. 313 p. (in Russian).
- Murzaev E. M.* Essays on toponymy. Institute of Geography of the USSR Academy of Sciences. Moscow: Mysl', 1974. 384 p. (in Russian).
- Pospelov E. M.* Geographical names of the Moscow region. Toponymic dictionary (over 3 500 units). Moscow: Astrel, 2008. 608 p. (in Russian).
- Postnikov A. V.* The development of the cartography and use of the old maps. Moscow: Nauka, 1985. 216 p. (in Russian).
- Shamsheva O.V., Uchaykin V.F., Medunitsyn N.V.* Clinical vaccinology. Moscow: GEOTAR-Media, 2016. 576 p. (in Russian).
- Vitov M. V.* North Russian toponymy of the XV–XVIII centuries as a historical source. Questions of linguistics. Moscow: Nauka, 1967. No. 4. P. 75–91 (in Russian).
-

Г. В. Требелева¹, С. М. Сакания²

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ХРИСТИАНСТВА В АБХАЗИИ
В ПОЗДНЕАНТИЧНЫЙ И СРЕДНЕВЕКОВЫЙ ПЕРИОДЫ
ПО ДАННЫМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА
ПАМЯТНИКОВ В ГИС**

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена анализу пространственного расположения храмов в Абхазии и реконструкции на основе полученных результатов путей проникновения и распространения христианства в разные хронологические этапы: период поздней античности и первого проникновения христианства на территорию Колхиды (IV–V вв.); период максимального Византийского влияния в эпоху Юстиниана Великого и ближайший за ней период (VI–VII вв.) — период, традиционно считавшийся этапом официального принятия христианства в Абхазии; период максимального расцвета Абхазского царства. Анализ проводится на основе созданной авторами ГИС по данным натурных разведок, включающей 149 храмов. Проведенный пространственный анализ позволил ответить на вопросы о том, как быстро христианство стало распространяться по территории Абхазии и какие районы оказались наиболее восприимчивы к новой религии. Традиционно считалось, что христианство попало в Абхазию с римскими военными, через крепости Понтийского лимеса, построенного вдоль побережья. Однако проведенный анализ показал, что важным путем распространения христианства являлись торговые караванные пути: можно выделить несколько очагов как на западе республики, так и на востоке. В то же время в центре, где Бзыбский хребет перекрывает доступ к основным перевальным путям, традиционная религия сохраняется дольше, почти на два столетия. Этот фактор оказывал влияние на распространение христианства и в последующем периоде. В целом для юстиниановского времени характерен значительный рост числа храмов, с одной стороны, стандартизация их внешней формы, с другой, а с третьей — усложнение литургической службы, что отразилось в более сложной организации внутреннего пространства храмов. В последующий период данные тенденции усиливаются. Появляются отдельные архитектурные школы. Таким образом, пространственный анализ как непосредственного расположения храмов, так и распределения в пространстве тех или иных архитектурных особенностей позволил проследить процесс христианизации и развития Церкви, не нашедший отражения в письменных источниках.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГИС, пространственный анализ, храмы, Абхазия, поздняя античность, средневековье

¹ Институт археологии Российской академии наук, ул. Дмитрия Ульянова, д. 19, Москва, Россия, 117292, e-mail: trgv@mail.ru

² Абхазский институт гуманитарных исследований Академии наук Абхазии, ул. Аидгылара, д. 44, Сухум, Абхазия, 384900, e-mail: suram_sakania@mail.ru

Galina V. Trebeleva¹, Suram M. Sakania²

THE SPREAD OF CHRISTIANITY IN ABKHAZIA ACCORDING TO THE SPATIAL ANALYSIS OF MONUMENTS IN GIS IN THE LATE ANTIQUE AND MEDIEVAL PERIODS

ABSTRACT

The article is devoted to the analysis of the spatial location of temples in Abkhazia and reconstruction based on the results of the ways of penetration and spread of Christianity in different chronological stages: the period of late antiquity and the first penetration of Christianity into the territory of Colchis (IV–V centuries); the period of maximum Byzantine influence in the era of Justinian the Great and the period that following it (VI–VII centuries) — the period traditionally considered the stages of the official adoption of Christianity in Abkhazia; and the period of the maximum flourishing of the Abkhazian kingdom. The analysis is carried out on the basis of a GIS created by the authors, according to field surveys, including 149 temples. The conducted spatial analysis allowed us to answer the questions of how quickly Christianity began to spread across the territory of Abkhazia, which areas turned out to be the most susceptible to the new religion. It was traditionally believed that Christianity entered Abkhazia with the Roman military, through the fortresses of the Pontic Limes, built along the coast. However, the analysis showed that the trade caravan routes were also an important way of spreading Christianity. For the same reason, we see several hotbeds both in the west of the republic and in the east. But in the center, where the Bzyb ridge blocks access to the main passageways, traditional religion has been preserved for longer, almost two centuries. This factor influenced the spread of Christianity in the subsequent period. In general, the Justinian period was characterized by a significant increase in the number of churches, on the one hand, the standardization of its external form, on the other, and on the third, the complication of the liturgical service, which was reflected in the more complex organization of the internal space of churches. In the subsequent period, these trends are intensifying. Separate architectural schools are emerging. Thus, the spatial analysis of both the location of temples and the distribution of certain architectural features in space reflect the processes of Christianization and development of the Church, which was not reflected in written sources.

KEYWORDS: GIS, spatial analysis, temples, Abkhazia, late antiquity, Middle Ages

ВВЕДЕНИЕ

Распространение христианства является неотъемлемой частью не только российской и абхазской истории, но и мировой в целом. Самые ранние сведения о появлении христианства в Абхазии восходят к апостольским временам. Апокрифические традиции [Peeters, 1932, P. 12–18] тесно связывают их с именами апостолов Андрея и Симона Кананита. Самые ранние сведения обнаруживаются в «Деяниях Андрея», созданного во второй половине II в. Хотя в его канонической версии говорится изначально лишь о Скифии, но сама логика говорит, что попасть в Скифию он мог, скорее всего, передвигаясь вдоль побережья Черного моря, а значит, не мог миновать прибрежных городов [Хрушкова, 2002, с. 45]. Не вдаваясь в апокрифические споры о маршрутах проповедования святых апостолов, можно уверенно констатировать, что христианство проникло на территорию Абхазии через римские крепости, расположенные на побережье. Кроме непосредственно

¹ Institute of Archaeology of the Russian Academy of Sciences, 19, Dmitriya Ulyanova str., Moscow, 117292, Russia, e-mail: trgv@mail.ru

² Abkhazian Institute of Humanitarian Studies of the Academy of Sciences of Abkhazia, 44, Aidgylara str., Sukhum, 384900, Abkhazia, e-mail: suram_sakania@mail.ru

апостолов, первыми носителями веры были ссылаемые сюда христиане-мученики: земли Абхазии для Римской империи были далекой провинцией, местом ссылки. Но как быстро христианство стало распространяться по территории Абхазии, и какие районы оказались наиболее восприимчивы к новой религии? На эти вопросы может дать ответ только объективный источник — остатки материальных свидетельств христианизации. Учитывая, что не все материальные следы христианизации могут объективно сохраняться к нашему времени (к примеру, не сохраняются деревянные нательные крестики), опираться при анализе мы будем на однозначные свидетельства наличия сформированных христианских общин — остатки христианских храмов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методы исследования определяются состоянием источниковой базы и основываются на комплексном подходе: организация натурных разведок, заполнение баз данных, создание ГИС и пространственный анализ. Для работы использовалась лицензионная программа ArcGIS 9.2. Подробное описание методики проведения разведок и создания ГИС с ее характеристикой представлены в нашей более ранней статье [Требелева и др., 2022]. Созданная ГИС включает в себя все памятники Северо-Восточного Причерноморья, поэтому для исследования процесса христианизации из базы данных отдельно был выделен слой храмов и дополнительно детализирован: была добавлена информация о типе храма, количестве нефов, форме апсиды, площади наоса, наличия тех или иных архитектурных элементов: ниш, пилястр, притворов, нартекса и т. д. Всего база данных включает 149 храмов периода поздней античности и средневековья.

Дискуссионным и сложным является вопрос датировки храмов, учитывая то, что большинство храмов не исследовалось и не может быть однозначно датировано раскопками или сопутствующим материалом. В связи с этим хронологическая атрибуция опирается на комплексный подход. Основами для датировки служат:

- 1) подробная фиксация архитектурных особенностей храмов: отмечаются соответствия тем или иным архитектурным деталям, частота их встречаемости и особенности распространения на тех или иных территориях;
- 2) анализ связующего раствора в кладке памятников [Требелева и др., 2014];
- 3) анализ подъемного материала, в т. ч. характеристика плинф [Klemeshova et al., 2021];
- 4) данные раскопок на тех памятниках, где подобные исследования проводились.

Таким образом, датирование памятников базируется на комплексном подходе. В целом, в хронологическом плане храмы Абхазии укладываются в три основных хронологических периода:

- 1) самые ранние сооружения позднеантичного периода (IV–V в.), построенные до официального принятия христианства;
- 2) церкви Юстиниановской эпохи и чуть более позднего времени (VI–VII вв.), т. е. периода после официального принятия христианства;
- 3) храмы периода уже единого Абхазского царства (VIII–XII вв.).

Анализ данных в ГИС проводился в основном на основе выборок по тем или иным признакам для каждого отдельного периода.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранний период: IV–V вв.

Охватывает позднеантичный период. Стоит отметить, что сама христианская церковь в этот период переживает, по сути, этап своего становления [Протоиерей Серафим Соколов, 2007]. С одной стороны, церковь не просто «выходит из подполья», она становится одним из государственных институтов. Формируется ее организационная структура. С

другой — это период различных споров и разногласий, в процессе которых и выработывались ее официальные доктрины и каноны.

Широкому распространению христианства по всей территории Римской империи способствовала как непосредственно политика Константина Великого [Бриллиантов, 2006], так и деятельность христианских проповедников [Harnak, 1924, p. 539; Lordkipanidze, Brakmann, 1994].

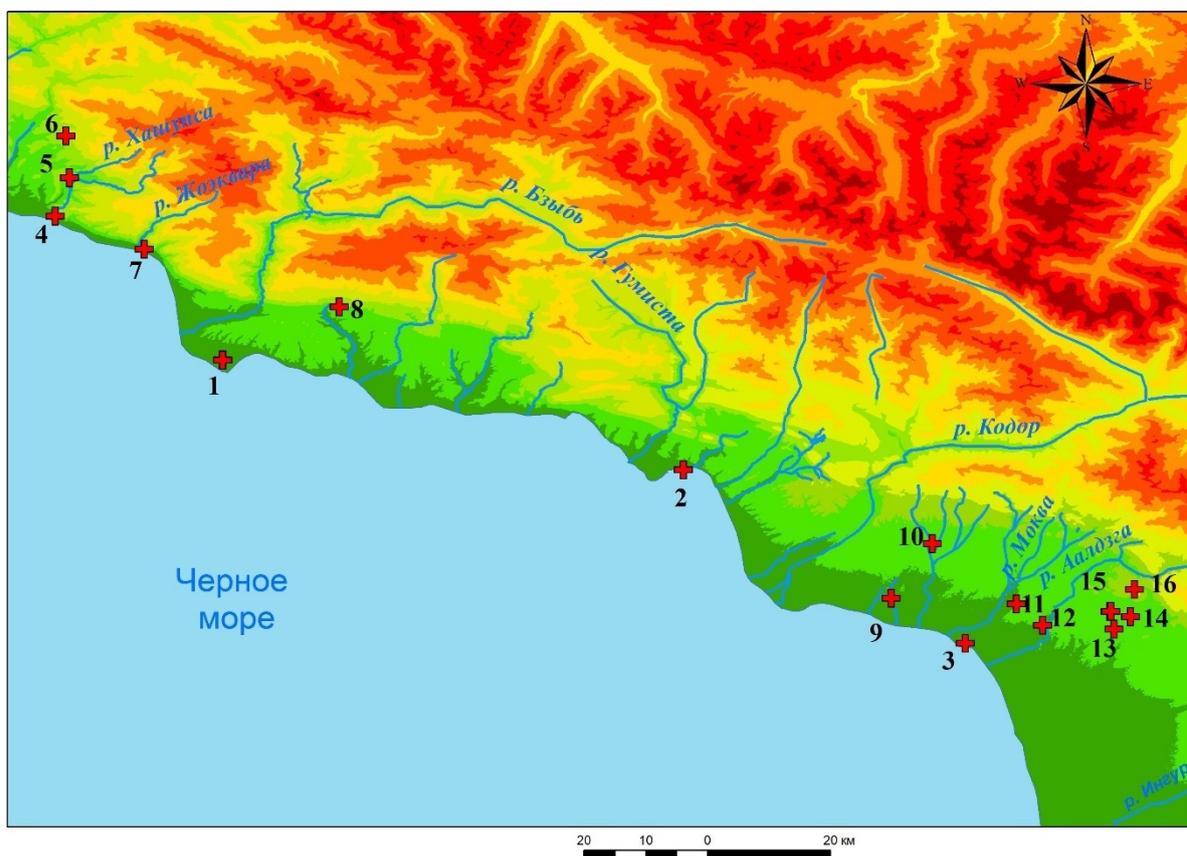


Рис. 1. Храмы ранней эпохи (IV–V вв.): 1 — храмы Питиунта; 2 — храмы Севастополис; 3 — Гюэнос; 4 — Цандрыпи (Мохадыр); 5 — Хашупса; 6 — Пшоухуа; 7 — Гагра (Нитика); 8 — Отхара I; 9 — Кындыгский; 10 — Акуапра; 11 — Маркульское городище; 12 — Беслахуба; 13 — Агубедия; 14 — храмы в Бедии; 15 — храмы в крепости Сочино; 16 — Уатица (крепость Нарчхоу)
Fig. 1. Temples of the early epoch (IV–V centuries): 1 — temples of Pitiunt; 2 — temples of Sebastopolis; 3 — Guenos; 4 — Tsandrypsh (Mohadyr); 5 — Khashupsa; 6 — Pshouhua; 7 — Gagra (Nitika); 8 — Otkhara I; 9 — Kyndygsky; 10 — Akuapra; 11 — Markul settlement; 12 — Beslahuba; 13 — Agubedia; 14 — temples in Bedia; 15 — temples in Sochino fortress; 16 — Uatietsa (Narchou fortress)

Нужно сказать, что еще до признания официального статуса христианская религия получила немалое распространение, в т. ч. в армейских частях [Свеницкая, 1980, С. 57–66]. Но поскольку она была гонимой, то ее последователей также старались сослать подальше от центра. Таким образом христиане попали на территорию Абхазии, которая в тот период была по сути далекой провинцией, северной окраиной Римской державы — удобным местом ссылки неугодных.

На основе письменных источников [Ruggieri, 1993, p. 335] известно, что уже в 325 г. епископ Питиунта Стратофил участвовал в Первом Вселенском Соборе, а следовательно, можно сделать вывод о существовании здесь достаточно крупной христианской общины, имеющей статус епископии, подчиняющийся архиепископу Кесарии Каппадокийской, который был главой Понтийской Церкви.

Опустим обсуждение вопроса о путях проникновения христианства в связи с тем, что ему посвящено немало литературы [Аджинджал, 1980, 2000]. Рассмотрим непосредственное расположение храмов на территории Абхазии в ранний период (рис. 1).

Без сомнения, первым храмом является храм № 1 в крепости Питиунт. Позднеантичным временем, IV–V вв., датируются и храмы в Себастополесе. Вызывает споры храм в третьем в античном центре на побережье Абхазии — в Гюэносе. Изначально исследователями он датировался VI в. [Кобахия и др., 1987; Шамба, 1985, 1988, с. 61, 1990], но раскопки, полученный материал, в т. ч. детальное исследование плинф [Скаков и др., 2020, 2021; Требелева и др., 2024], позволяют говорить, что существующий храм стоит на фундаменте более древнего храма, элементы строительных конструкций которого вошли в него.

Таким образом, мы видим, что в существующих античных центрах в IV в. сооружаются христианские храмы, и центральным, епископальным, является храм в крепости Питиунт. Но если обратиться к карте, то, кроме храмов в античных центрах, можно отметить наличие храмов в глубинной, не прибрежной Абхазии. Рассмотрим их подробнее.

Самым западным храмом является храм в крепости Хашупса. Л. Г. Хрушкова датирует крепость V–VII вв. Однако обращаясь к типу храма, мы увидим полуциркульную апсиду без заплечиков, поэтому мы склонны датировать храм ранним периодом: IV–V вв. Попробуем это обосновать.

Крепость археологически исследована крайне слабо. Основные ее исследователи [Кармов, 2012; Пищулина, Комарова, 2022] датируют ее VI–VII вв. и связывают с периодом соперничества на данной территории двух мировых держав: Византийской империи и Сасанидского Ирана [Кармов, 2012, с. 107]. Основное функциональное назначение крепости — прикрывать перевалы и связывать Абхазию с Аланией. Однако, относя ее к эпохе Юстиниана, исследователям приходится признать наличие здесь богатого и значительного могильника позднеантичной эпохи: II–IV вв., что однозначно свидетельствует о наличии здесь многочисленного населения в данный период, в т. ч. с высоким социальным статусом и активно контактирующего с античными центрами. По письменным источникам известно, что еще в первой половине II в. н. э. Рим сформировал вдоль черноморского побережья Кавказа сплошную цепь государств-«клиентов» при поддержке штатных армейских подразделений, осуществлявших охрану и контроль границы (Proc. Caes. De b. Goth., IV.4). Крупнейшим таким пунктом был Питиунт. Но, если следовать Периплу, то на запад от Питиунта следовали крепость Нитика, локализуемая в г. Гагре, и крепость Мохора, которая, по последним исследованиям А. В. Аргуна [2020, с. 20–21], локализуется в районе с. Цадрыпш. Это логично: такой значительный храм, как Цандрыпшский, не мог находиться вне стен крепости. На сегодняшний день Цандрыпшский храм датируется Юстиниановой эпохой [Леквинадзе, 1970, 1973; Хрушкова, 2002], но крепость датируется позднеантичным временем. Следовательно, учитывая два фактора (официальный государственный статус христианства в Римской империи с IV в., а также и фактор того, что епископство в Питиунте предполагает наличие более низких ступеней пресвитеров и диаконов, а следовательно и наличие храмов, где бы они служили, и где собирались бы их общины) можно обоснованно говорить, что Цандрыпшский храм, как и храм в Гюэносе, построен на фундаменте более раннего храма. Возможен и другой вариант — более ранний храм располагался где-то

недалеко, внутри крепости, но на сегодняшний день либо не сохранился, либо не выявлен ввиду неполного обследования территории.

От Цандрипша торговые пути ведут к Хашупсинской крепости, где во II–IV вв. на основании могильника фиксируется проживание значительного населения. Возведение здесь крепости логичнее всего отнести к периоду не позднее IV в. — периода максимального расцвета Питиунта, а значит, и интенсивных торговых связей. Следовательно, наличие здесь церкви в IV–V вв. вполне логично и не противоречит анализу особенностей архитектуры того храма, остатки которого мы фиксируем. Хашупсинская церковь скорее всего была в подчиненном отношении к церкви в крепости Моходыр (Цандрыпш), а та уже подчинялась главе Питиунтской епархии.

Кроме храма в Хашупсинской крепости на данной линии караванных путей располагается храм Пшоухуа. На первый взгляд данный храм более позднего времени, но при раскопках, а также анализе его архитектурных особенностей видны следы его множественных перестроек. Особый интерес вызывает наличие в фундаментных блоках глинистого скрепляющего раствора, не характерного для данной эпохи и не встреченного в стенах храма. Этот фактор можно объяснить возведением храма на фундаменте более раннего культового сооружения, а это значит, что территория была заселена издревле, и в интересующий нас период явно была активно включена в зону контактов. Наличие в известковом растворе всего лишь 7 % примеси песка позволяет отнести этот храм к позднеантичному периоду. Он, как и храм в Хашупсе, был напрямую связан с Цандрипшским, и входил в Питиунтскую епархию. Следующий храм данного периода располагался в крепости Нитика, ныне крепость Абаата в г. Гагре. Существующий сейчас здесь храм подвергался множественным перестройкам: на рисунке одного из первых его исследователей — приезжавшего в г. Гагру в 1833 г. Дюбуа де Монпере — можно увидеть главный неф с выступающей полуциркульной апсидой [*Dubois de Monpereux*, 1843, Pl. IV, 3, Pl. VI, 6]. Расположение данного храма на территории римской крепости, а также наличие в образце, взятом с восточной стороны под алтарным окном, всего лишь 5 % примеси песка в растворе позволяет отнести этот храм к позднеантичному времени.

Двигаясь дальше на запад, мы попадаем в Гудаутский район. Здесь на побережье не зафиксировано ни одной римской крепости или храма. Однако один из храмов в предгорной части данного района можно отнести именно к этому периоду. Это — храм Отхара 1. Раскопки здесь не проводились; к раннему периоду этот храм можно отнести на основании низкой концентрации песка в растворе и особенности архитектуры: отсутствие алтарного окна, уменьшение продольного пространства, асимметричность расположения дверей, специфичность конструкции алтаря и конхи, мощность толщины стен. Все эти факторы свидетельствуют о несовершенной разработанности самой формы храма. В Юстиниановскую и последующую эпохи храмы возводились по четким канонам, тогда как для периода IV–V вв. характерен поиск и разнообразие форм. Сложно сказать, подчинялась ли существующая здесь церковь непосредственно Питиунту, или мы встречаем здесь следы некой обособленной общины, живущей в землях Абазгии, население которой исповедует в указанный период в основном еще древние традиционные культы.

Вторым крупным церковным центром в позднеантичный период являлся Себастополис. В первой половине IV в., возможно, он еще подчинялся Питиунтской епархии, но к V в. здесь образовалась своя епархия, глава которой принимает участие в IV Вселенском Соборе [*Notitiae episcopatum*, 1981, p. 7–8, 205–212]. Логически рядом с епископальным центром должны быть храмы, входящие в данную епархию. Из известных в данном районе памятников привлекает к себе внимание храм Акапа 2. Он не исследовался и очень плохой сохранности, но на нем четко фиксируется полукруглая выступающая апсида, характерная для ранних форм, поэтому можно предположить, что возведен он в позднеантичное время.

Но в целом приходится констатировать, что ввиду слабой археологической изученности региона для воссоздания детальной картины нам не хватает данных. Нельзя исключать также и того, что высокая сейсмичность региона и урбанизация могли просто уничтожить следы более ранних храмов, часть из которых могла быть и деревянной. В любом случае епископская кафедра не организовывается на территории, где отсутствует достаточно значительная постоянная христианская община.

Иная картина возникает в восточной части Абхазии — древней Апсолии. На данной территории уверенно фиксируется 9 храмов позднеантичного времени, сгруппированных в несколько кластеров. В бассейне рр. Тамыш и Дгамш находятся два храма: Кындыгский, с прекрасно сохранившимся образцом кладки *opus mixtum*, и храм в Акуапра, который сохранился хуже, однако обильные остатки кирпичей в подъемном материале также свидетельствуют о наличии кладки *opus mixtum*. Примечательно, что храмы эти отстоят от побережья на значительном расстоянии. Непосредственно на побережье раннего храма пока не обнаружено. Следующая цепочка храмов располагается вдоль р. Моквы. Здесь, без сомнения, важнейшим является храм в Гюэносе — античном городище на побережье, о котором выше уже говорилось. Не вызывает сомнения датировка (не позднее конца IV в.) храма на Маркульском городище [Требелева и др., 2020]. Храм Беслахуба 2 в одноименном селе не исследовался; он сохранился на уровне фундамента, но датируется позднеантичным временем на основании состава раствора (малой примеси песка) и архитектурной формы.

Особое место, на наш взгляд, занимают храмы, расположенные в крепости Сочино: первый расположен на вершине плато, а второй, условно названный нами «солдатским» — между двумя линиями стен крепости. Оба храма сложены в технике *opus mixtum*. К сожалению, сама крепость Сочино абсолютно не исследована. Однако она расположена у дороги, ведущей в Бедию, где с северной и южной стороны от главного храма Влахской Божьей Матери раскопками были вскрыты фундаменты храмов позднеантичного периода. Таким образом, Бедия как культовый центр существовала уже в позднеантичное время. Далее от Бедии дорога ведет к г. Ткварчалу. Здесь, на горе Нарчхоу, расположена крепость античного времени, одна из башен которой (по данным разведок Маркульской экспедиции) сложена в технике перевязочных балок, описанной Витрувием (*Vitr. De architectura I, V. 3*). Подобная техника на территории Абхазии встречается лишь на остатках башен в Себастополесе [Трапи, 1969, с. 300] и на башне Алахаш-Абаа в Маркульском городище. На западной окраине данной крепости сохранились руины храма, который, без сомнения, претерпел немало этапов перестройки. Однако малый процент примеси песка вместе с подъемным материалом античного времени, обнаруженным в расщелине, отделившей данный храм от основы крепости, не оставляют сомнения, что возведен он был в позднеантичный период. Римская технология кладки башни дает основание предполагать расположение на территории крепости римского военного гарнизона. Но что же могли делать римские войска в столь глубинной части Абхазии? От г. Ткварчала, где расположена крепость Нарчхоу, дорога выходит в район расположения Джантухского могильника, раскопки которого убедительно показали, что здесь пролегал торговый путь, связывающий Колхиду с Центральным Кавказом. Таким образом, крепость Нарчхоу была важным пунктом, охраняющим основные пути коммуникаций. По этой причине концентрация здесь раннехристианских храмов не вызывает удивления. А значит и храм, расположенный чуть южнее Бедийского, в с. Агу-Бедия, вполне обосновано можно датировать позднеантичным временем. К сожалению, храм очень плохой сохранности и раскопки на нем не проводились, поэтому отнесение его к данному периоду предварительное, основано на логике, архитектурной форме и анализе раствора.

Таким образом, проведенный нами пространственный анализ показал, что христианство начало свое распространение от римских крепостей и шло по маршрутам торговых караванных путей.

Юстинианова эпоха: VI–VII вв.

При императоре Юстиниане Великом христианство становится официальной государственной религией в Абхазии [Хрушкова, 2002]. Это сразу нашло отражение в количестве храмов: их число возрастает практически вдвое (рис. 2).

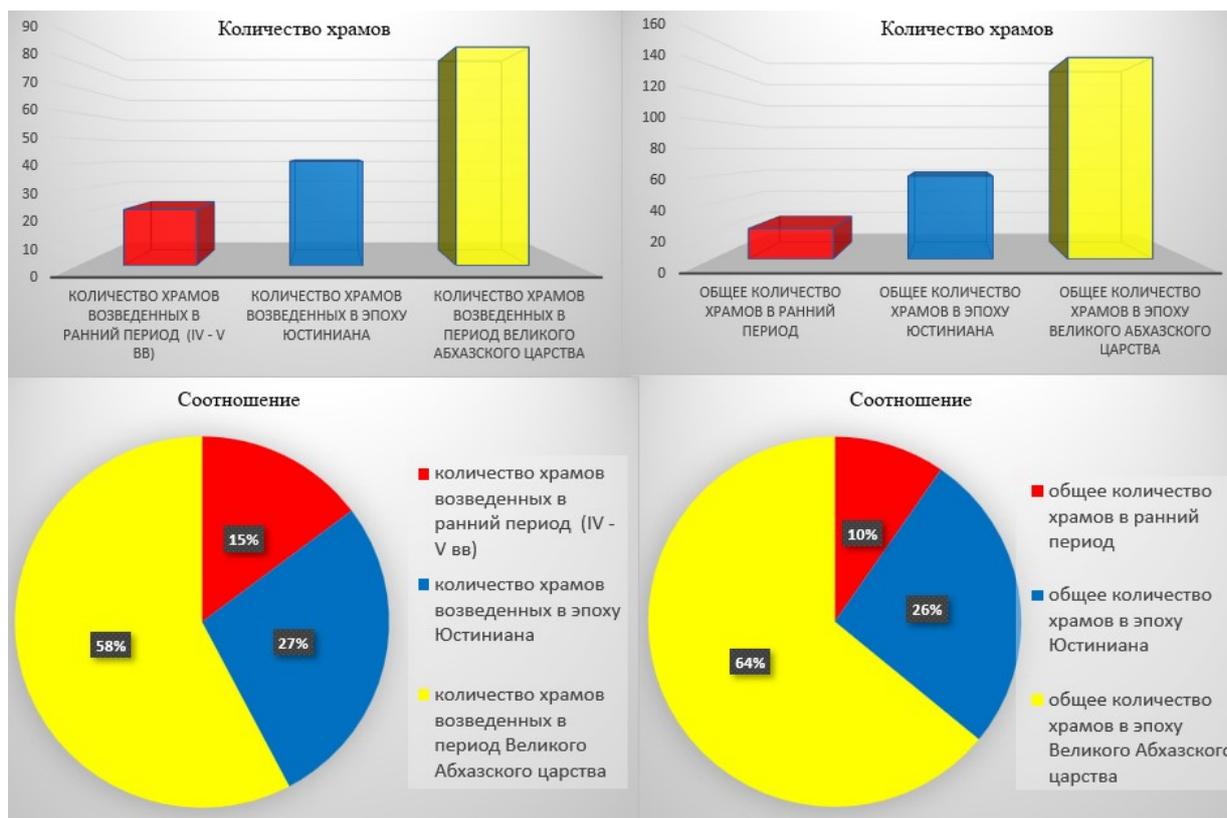


Рис. 2. Общее количество храмов в разные периоды и их соотношение
Fig. 2. The total number of temples in different periods and their ratio

Кроме возрастания числа храмов важным фактором является, с одной стороны, стандартизация архитектурных форм, а с другой — появление типа крестово-купольных храмов (рис. 3). Наиболее важным событием этого периода является постройка Драндского Собора. Этот храм был возведен в 20 км к юго-востоку от г. Сабастополиса на живописном возвышенном плато, на берегу древнего русла р. Кодор. Источники не сохранили нам исторического названия храма. Уникальность Драндского храма обусловлена тем, что его форма не находит аналогов на территории всего Закавказья. Храм по данным раскопок построен в VI в., и думается, что он мог быть возведен теми людьми, которые были свидетелями, а может и участвовали в возведении храма Святой Софии в Константинополе. На эту мысль наталкивают его конструктивные особенности: на территории Кавказа не встречается применение в конструкции ребер жесткости или гуртов, которые наблюдаются и в Святой Софии, и в Драндском храме. С некоторыми допущениями Драндский храм можно даже считать некой репликой храма Святой Софии. Конечно, Драндский храм меньше Константинопольского в 3 раза; храм Святой Софии — это соединение

базиликальности с доминирующим элементом купола, а Драндский храм — это ротонда с крестом, но и в том, и в другом храме внутреннее подкупольное пространство подавляет все остальное пространство храма, что концептуально сближает данные храмы. Драндский Собор был построен посередине или в западной части большой крепости римско-византийского времени: в 2018 г. во время земляных работ в западной части поляны, где расположен храм, были обнаружены остатки мощной крепостной стены. Толщина выявленной стены составляет 3–3,1 м. Не исключено, что крепость могла относиться к более раннему времени и быть недостающим звеном Понтийского лимеса в районе р. Кодор: холм, на котором возведено городище с храмом, запирает выход в Кодорское ущелье, что соответствует основным принципам расположения крепостей [Требелева, Кизилов, 2021].

Но был ли здесь храм в эпоху поздней античности? Наличие римской крепости логически позволяет предполагать наличие здесь храма, но полное отсутствие реальных артефактов, в т. ч. подтверждающих датировку крепости, и отсутствие упоминания ее в письменных источниках не позволяют пока делать подобного вывода. Исходя из отсутствия античного названия и упоминания в источниках данной крепости возникает второй вопрос: почему столь знаковый храм был возведен в безымянной крепости, а не в Себастополисе? Вывод византийских легионов из Себастополиса (Proc. Caes. De b. Goth., VIII.4.6) был кратковременным тактическим отступлением, уже в 555 г. в городе было развернуто широкое строительство (Proc. Caes. De aed., III.7): Себастополис был окружен мощной стеной, строятся и реконструируются храмы внутри. В этот период существует целая храмовая площадь со знаменитым Октагональным храмом [Хрушкова, 1995, 2002] и стоящей рядом базиликой (Базилика 2001). Примерно в этот же период возводится и крестовидный храм (храм № 7) в Пицунде. Сейчас сложно воссоздать иерархию данных храмов между собой, но в любом случае это были не рядовые храмы, а центральные, знаковые. Храм в Дранде стал, без сомнения, новым духовным центром, и это свидетельствует о массовом росте числа христиан: появилась необходимость создания третьего центра.

Еще одним знаковым фактором эпохи является появление монастырей. Эти памятники отличаются от обычных храмов тем, что представляют собой некую не очень большую территорию, огороженную стеной, иногда с башней, на которой расположены храм и помещение, которое можно интерпретировать как трапезную. К такому типу относятся Келасурский храмовый комплекс и комплекс Малая Аллрра.

Сооружаются храмы и в крепостях. В первую очередь, конечно, необходимо отметить появление христианских храмов в Анакопии. Кроме Анакопии, мы встречаем храмы в крепостях Абаанта, Атшаду, Колошона, Арасадзых 2 (Акапа), Поквеш 1, Джал-Акуаскиа, Маркула 2. Сооружение храмов в крепостях свидетельствует о христианизации высших слоев древнеабхазского общества.

Важной тенденцией, отмеченной для данного периода, является появление храмов на местах древних святилищ. Это такие храмы, как Чебурных, Лашкендар, Ацхыд, Речх. Сооружение храмов на местах святилищ — знаковый фактор, свидетельствующий о высоком уровне христианизации не просто знати, а именно широких народных слоев.

Пространственный анализ расположения храмов представляет нам следующую схему: крупные храмы расположены на побережье, и далее от них, вдоль рек, веерно расширяясь по мере отступления от берега, фиксируются более мелкие храмы; но изредка встречаются и крупные. Давайте эту схему рассмотрим подробнее. Прибрежные храмы — это храмы в основных античных городах и крепостях (Гюэнос, чуть отстоящая от побережья, крепость Дранда, Себастополис, Анакопия, Пицунда, Нитика), а также появляются такие храмы, как Тамыш и Мюссера, где следов крепости или городского поселения пока

не обнаружено. Если продолжить эту цепочку за р. Псоу, современную границу Абхазии с Россией, в то время не существовавшую, то можно отметить такие храмы, как Россия 1, Южные культуры, храм в крепости Сочи.

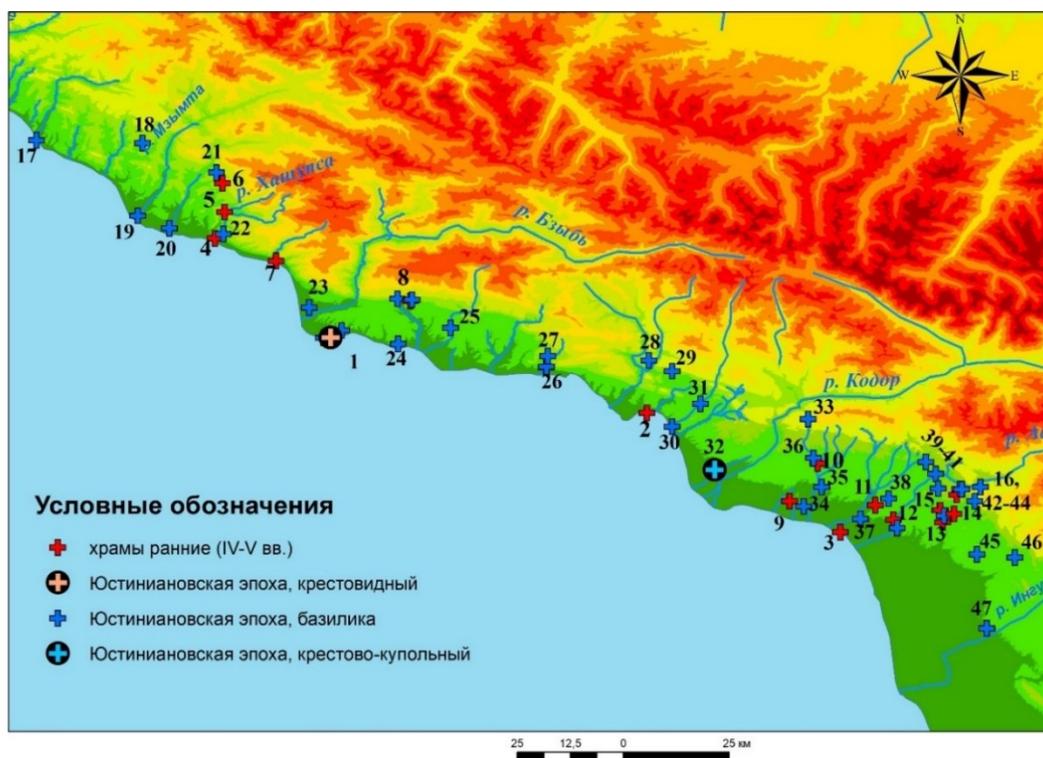


Рис. 3. Храмы ранней эпохи (IV–V вв.) (значки красного цвета) и Юстиниановой эпохи (значки синего цвета и круги с крестом внутри): 1 — храмы Питиунта; 2 — храмы Себастополис; 3 — Гюэнос; 4 — Цандрыпш (Мохадыр); 5 — Хашупса; 6 — Пшоухуа; 7 — Гагра (Нитика); 8 — храмы в Отхара; 9 — Кындыгский; 10 — Акуапра; 11 — Маркульское городище; 12 — Беслахуба; 13 — Агубедия; 14 — храмы в Бедии; 15 — храмы в крепости Сочино; 16 — Уатиеца (крепость Нарчхоу); 17 — Сочи; 18 — Лесичанская; 19 — Южные Культуры; 20 — Россия 1; 21 — Микельрипш; 22 — Чыбурных; 23 — Алахадзы; 24 — Мюссера; 25 — Абаанта; 26 — храмы в Анакопии; 27 — храмы в Анухва; 28 — Беренаика; 29 — Акапа; 30 — Тхобын; 31 — Келасурский монастырь; 32 — **Дранда**; 33 — Кячский; 34 — Тамышский; 35 — Лабра 2; 36 — Джгерда-школа; 37 — Маркула 2; 38 — Джал-Акуаския; 39 — Ачапара; 40 — Гуп; 41 — Атиаду; 42 — храмы в Ацхыд; 43 — Лашкendar; 44 — Малая Аллрра; 45 — Мухур; 46 — Речх; 47 — Цамхар

Fig. 3. Temples of the early epoch (IV–V centuries) (the icons are red) and the Justinian epoch (blue icons and circles with a cross inside): 1 — temples of Pitiant; 2 — temples of Sebastopolis; 3 — Gyuenos; 4 — Tsandrypsh (Mohadyr); 5 — Khashupsa; 6 — Pshouhua; 7 — Gagra (Nitika); 8 — temples in Otkhara; 9 — Kyndyg; 10 — Akuapra; 11 — Markul settlement; 12 — Beslahuba; 13 — Agubedia; 14 — temples in Bedia; 15 — temples in the Sochino fortress; 16 — Uatiets (Narchhou fortress); 17 — Sochi; 18 — Lesichanskaya; 19 — Southern Cultures; 20 — Russia 1; 21 — Mikelripsh; 22 — Chyburnykh; 23 — Alakhadze; 24 — Musser; 25 — Abaanta; 26 — temples in Anakopia; 27 — temples in Anukhva; 28 — Berenaika; 29 — Aqapa; 30 — Thobyn; 31 — Kelasur monastery; 32 — **Dranda**; 33 — Kyachsky; 34 — Tamyshsky; 35 — Labra 2; 36 — Dzhgerda school; 37 — Markula 2; 38 — Jal-Akuaskia; 39 — Achapara; 40 — Gup; 41 — Atshad; 42 — temples in Atshid; 43 — Lashkendar; 44 — Malaya Allrra; 45 — Mukhur; 46 — Rechkh; 47 — Tsamkhar

Наибольшее число храмов фиксируется в Восточной Абхазии, на территории древней Апсилии. От Гюэноса, расположенного на левом берегу р. Моквы, вдоль самой реки и на восток от нее, но уже не в прибрежной зоне, а на расстоянии около 10 км от берега, на возвышенных участках и далее, вдоль р. Аалдзга и вдоль предгорий до р. Ингур протянулась цепочка храмов, расположенная некими блоками, число которых увеличивается по мере приближения к предгорьям, достигая максимальной концентрации в районе современных сел Река, Бедия и г. Ткварчала. Следующая цепочка храмов протянулась от Тамышского и Кындыгского храмов вдоль рр. Тамыш и Дгамш, и венчает ее величественный Кячский храм, однозначно знаковый для данного региона, расположенный на возвышении и значительный по площади.

Двигаясь на запад и пересекая р. Кодор, мы встречаем Драндский храм. Интересно то, что являясь, без сомнения, центральным и знаковым, рядом с ним на расстоянии 15 км не отмечено ни одного храма. Найти объяснение этому пока не удастся, можно лишь выдвинуть разные гипотезы: он возводился на участке, где реально не проживало христианизированное население, именно с целью ускорить его христианизацию. Храмы на данной территории просто не сохранились; остатки этих храмов еще просто не обнаружены археологами. Продолжая западное направление, мы выходим к Тхобынскому храму, стоящему у Великой Абхазской (Келасурской) стены, на левом берегу р. Келасур. На правом берегу этой же реки, выше по течению, расположен уже упомянутый нами Келасурский монастырь, живописно зажатый между крутыми берегами на мысу у самой реки. В предгорьях над Сухумом, тогдашним Севастополисом, отмечается наличие минимум 3-х храмов: Беренаика в Ахалшени; не обнаруженный нами, но известный по литературе храм в Акапа; и вновь выявленный храм Акапа 2.

На пространстве между рр. Гумиста и Хипста христианские храмы фиксируются только в Анакопии и в непосредственно примыкающем к ней с севера современном с. Анухва. Одинокó смотрится и величественный храм в крепости Абаанта, на берегу р. Хипста. Это может отражать то, что население на данной территории в этот период было еще слабо христианизировано: новую религию приняла, скорее всего, лишь знать. Но зато значительное число храмов обнаруживается в предгорьях Мчишты — современном с. Отхара. Хочется отметить, что именно здесь в предыдущий период мы встречали слабо разработанный в архитектурном плане храм Отхара 1. В Юстиниановскую эпоху здесь фиксируется уже 3 храма. Торгово-караванные пути из этого района спускаются на побережье к Мюссерскому храму.

Несомненно богат храмами район Великого Питиунта. Это не только храмы в самой крепости, но и храмы в Лдзаа, а также храм в Алахадзы, который мог быть возведен еще в предыдущий период.

Следующая цепочка храмов наблюдается вдоль р. Хашупса и ведет по караванным путям в сторону р. Псоу. Христианские храмы на данном пути нам уже встречались в предыдущем периоде.

Ввиду высокой плотности населения и сильной урбанизации Сочинский регион изучен значительно хуже. Но, опираясь на имеющиеся данные, можно отметить, что основные храмы расположены вдоль побережья; исключение составляет только церковь Лесичанская 1. Думается, что кроме нее здесь могли располагаться иные храмы на протяжении караванных путей также, как и в районе р. Хашупсы, однако до нас не сохранившиеся или пока не обнаруженные.

Завершая обзор пространственного расположения храмов в данную эпоху, необходимо выделить следующие моменты: максимальная христианизация наблюдается в Восточной части Абхазии, восточнее р. Кодор. В западной части основные храмы в этот период еще концентрируются либо вокруг непосредственного крупного центра на побережье, либо

вдоль караванных путей. Наименее затронута христианизацией оказалась территория Бзыбской Абхазии (современный Гудаутский район), совпадающая с древней Абазгией. Этот фактор, отмеченный на основе пространственного анализа, коррелируется с письменными источниками. Прокопий Кесарийский в своей работе пишет, что абазги приняли веру при императоре Юстиниане (Proc. Caes. De b. Goth., IV.3.19), а вот апсилы издавна были христианами (Proc. Caes. De b. Goth., IV.3.17).

Из нашего обзора выпал обзор храмов вдоль Военно-Сухумской дороги: Цебельда и иные крепости. Связано это с тем, что нам не удалось провести полноценных разведок по причине особого политического и военного статуса данного участка. Но опираясь на работы предшественников мы обязаны отметить, что в VI в. здесь фиксируется целая цепочка храмов. Этот факт полностью укладываются в схему распространения христианизации вдоль караванных торговых путей, которую мы явственно наблюдаем в Гагрском районе, в долине р. Хашупсы. Но распространение христианства шло быстрыми темпами. В письменных источниках того периода Абхазские цари величаются «христолюбивые государи», и в VII в. епархия Константинопольской Церкви в Абхазии удостоилась статуса автокефалии [Аджинджал, 2000].

Период Абхазского царства VIII–XII вв.

В VIII в. Абхазия превращается в мощное единое царство (рис. 4), идеологической опорой которого является христианство, а абхазская церковь в это время подчиняется напрямую Константинопольскому патриарху [Аджинджал, 2000].

Этот процесс, реконструируемый на основе письменных источников, находит свое отражение и в церковной археологии, в частности в пространственном анализе расположения храмов: по сравнению с прошлыми периодами количество храмов увеличивается более чем вдвое (рис. 2), при этом возрастает и число крестово-купольных храмов. Кроме продолжающего функционировать Драндского храма, возводятся также:

- Бедийский и Моквский в восточной Абхазии (историческая Апсилия);
- Мсыгхуа, Симона Кананита, Лыхненский и Бзыбский в Гудаутском районе (историческая Абазгия);
- новые крестово-купольные храмы в Пицунде и Алахадзы в Гагрском районе (историческая Санигия).

Анализ пространственного расположения крестово-купольных храмов позволяет выделить ряд групп. Для наглядного отображения расстояния между храмами использовался инструмент «буфер» (рис. 5). Первая группа — это Пителиунт, Алахадзы и Бзыбский храм. Данные храмы расположены в углах почти равностороннего треугольника (8,5; 9; 10 км). Храм в Пителиунте — центральная кафедра, связан с высшими должностными лицами и напрямую с Константинополем. И хотя значение Пителиунта как военной крепости и порта к данному периоду уже фактически сошло на нет, как духовный и административный центр он продолжает функционировать. Рядом с Пителиунтом в еще более ранний период возник крупный храмовый комплекс в Алахадзы. Здесь в данный период первый значительный по своим размерам храм по типу базилика перестраивается в более мелкую базилику и возводится рядом более крупный крестово-купольный храм. Таким образом, параллельно здесь функционируют сразу два храма, что может свидетельствовать о том, что Алахадзы стал одним из духовных центров для местного населения. Третий же храм данной группы — Бзыбский — напрямую связан с крепостью, одной из функций которой было контролировать проход между долиной и горной частью. Именно у основания этой крепости начинается проход в нагорную часть Бзыбского ущелья. Выше по ущелью нами в ходе разведок был обнаружен довольно значительный по своим размерам (площадь 48 м²)

христианский храм в форме базилик — Бзыбский 2, что свидетельствует о немалом населении в данной местности.

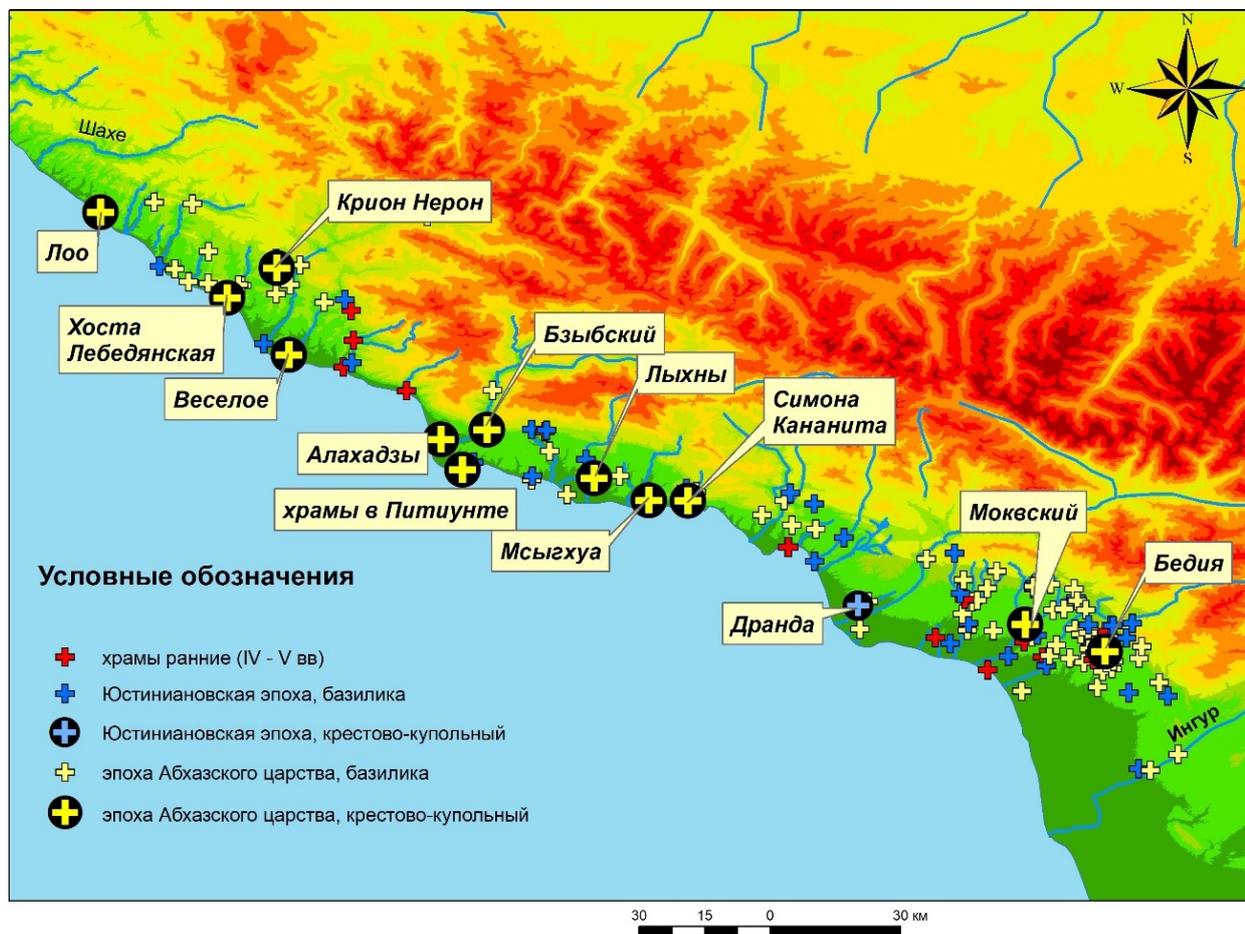


Рис. 4. Храмы, функционирующие в эпоху Великого абхазского царства (VIII–XII вв.)
Fig. 4. Temples functioning in the era of the Great Abkhazian Kingdom (VIII–XII centuries)

Вторая группа храмов — это храмы Бзыбской Абхазии: Лыхны, Мсыгхуа, Симона Кананита. Они расположены на почти равном расстоянии друг от друга (10 и 7 км по прямой). Интересно, что крайние храмы имеют площадь около 200 м², Мсыгхуа — в два раза меньше. Площадь храма, думается, связана не только с количеством прихожан, но и со статусом этих культовых сооружений.

Третьей группой можно условно назвать фактически независимые друг от друга храмы в Севастополисе и в Дранде. К сожалению, о внутренней организации и структуре Абхазской церкви данного периода мало что известно. Имеющиеся источники фрагментарны и оставляют множество вариантов толкований.

Четвертая группа — это храмы Восточной Абхазии: Моквский и Бедийский.

Интересно в этом плане посмотреть на ситуацию, которая сложилась в районе Сочи — самом северном и отдаленном регионе Колхиды. Здесь храмы начинают появляться лишь в Юстиниановскую эпоху, но в период Абхазского царства рост их количества и появление крестово-купольных храмов в прибрежной зоне (храм в селах Веселом, Хосте Лебедянской и Лоо), и храм типа «вписанный крест» в предгорьях (Крион Нерон). Расстояние между храмами в Веселом и Хосте Лебедянской составляет около 15 км, а храм

в Лоо отстоит от них в 2 раза (около 30 км).

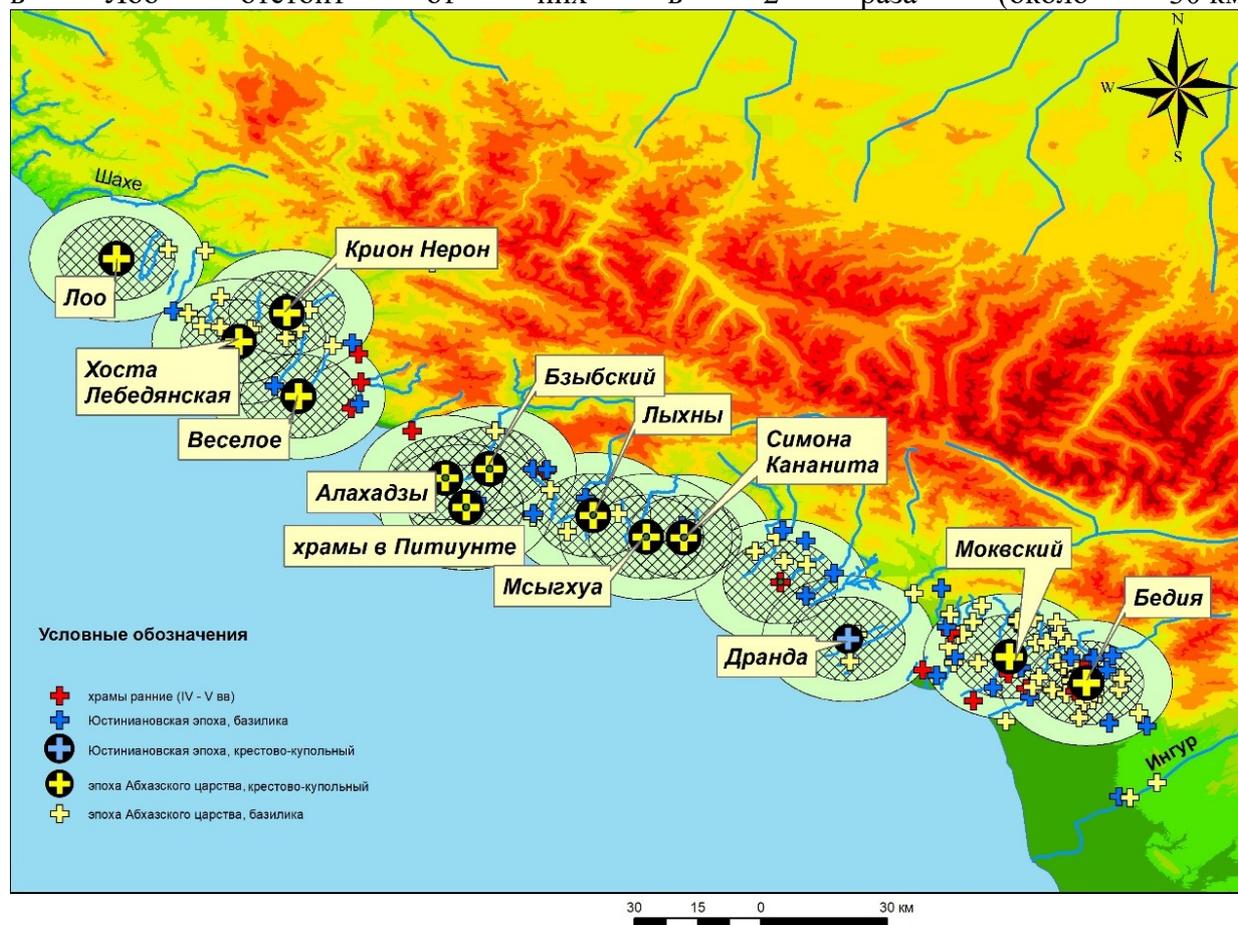


Рис. 5. Анализ пространственного расположения крестово-купольных храмов в период Абхазского царства (VIII–XII вв.). Инструмент «буфер»: 15 и 10 км
Fig. 5. Analysis of the spatial location of the cross-domed temples in the period of the Abkhazian kingdom (VIII–XII centuries). Buffer tool: 15 and 10 km

Таким образом, в данный период по всему побережью на расстоянии от 10 до 30 км друг от друга возникает серия крестово-купольных храмов, которые скорее всего являются центрами не только духовными, но и административными, а также отражают внутреннюю организацию Церкви. Мы констатируем этот факт, но достаточного количества данных для выстраивания четкой иерархичной структуры пока не существует, поэтому не будем излишне фантазировать, ограничившись только данным упоминанием.

Кроме крестово-купольных в данный период перестраивается множество старых храмов типа базилика, а также сооружаются новые. Необходимо отметить, что ведущим типом храма в данный период становится храм с прямоугольной снаружи апсидой. На востоке Абхазии встречается ряд храмов с прямоугольной не только снаружи, но и внутри апсидой (рис. 6): как с полностью прямыми (Джинджолия, Джгериан Абаа, Бедия Нижний северный храм, Чебурхинджи/Хьяцха), так и слегка закругленными углами (Маркула 3, Мур-Абаа, Поквеш-Абааж, Река-Джиха, Река-дорога). Можно предположить, что эти храмы возводились одной или двумя строительными бригадами в короткий промежуток времени.

Еще одна группа храмов, теперь уже в центральной части (на участке от Сухума до Кутола), которая, возможно, возводилась одной бригадой (по крайней мере, здесь прос-

леживается близкая традиция по форме и близкая территориальная локализация) — это малые храмы с полукруглой вписанной в прямоугольный абрис апсидой и с двумя полукруглыми нишами по обеим сторонам апсидного полукружия, к каковым относятся храмы Яштвух, Кутол 1 и Пскальский.

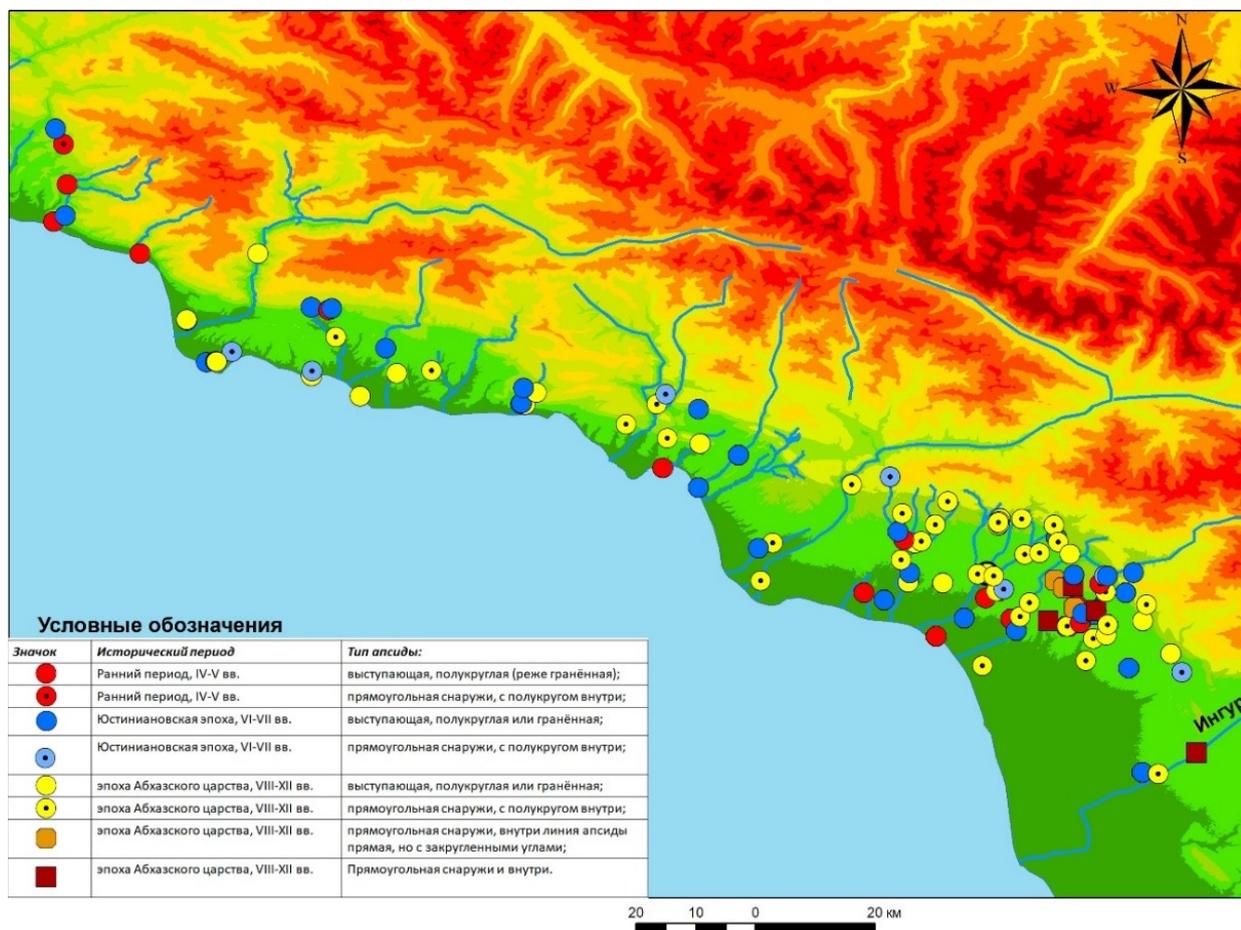


Рис. 6. Распределение храмов на территории Абхазии по периодам и типу апсиды
 Fig. 6. The distribution of temples on the territory of Abkhazia by period and type of apse

В целом следует отметить, что в этот период многие храмы богато украшаются каменной резьбой и фресками. У части храмов мы видим развитую систему пристроенных помещений, как нартекса, так и боковых — северных и южных. Это свидетельствует об усложнении литургий. Усложнение планировки начинает появляться в более ранний период, но именно в период Абхазского царства оно становится массовым. Пристраиваются дополнительные помещения и к более ранним храмам, где ранее они отсутствовали. Появляются двуапсидные церкви: храм Кацихабла в с. Поквеш в Очамчирском районе, Нижний Скит Драндского монастыря. В какой-то мере они являются продолжением традиции двойной церкви в Пицунде (храм № 5), но отличаются от нее тем, что залы в них уже не равнозначны и нет выраженной снаружи апсиды. Появление таких церквей отражает именно сложность литургических служб.

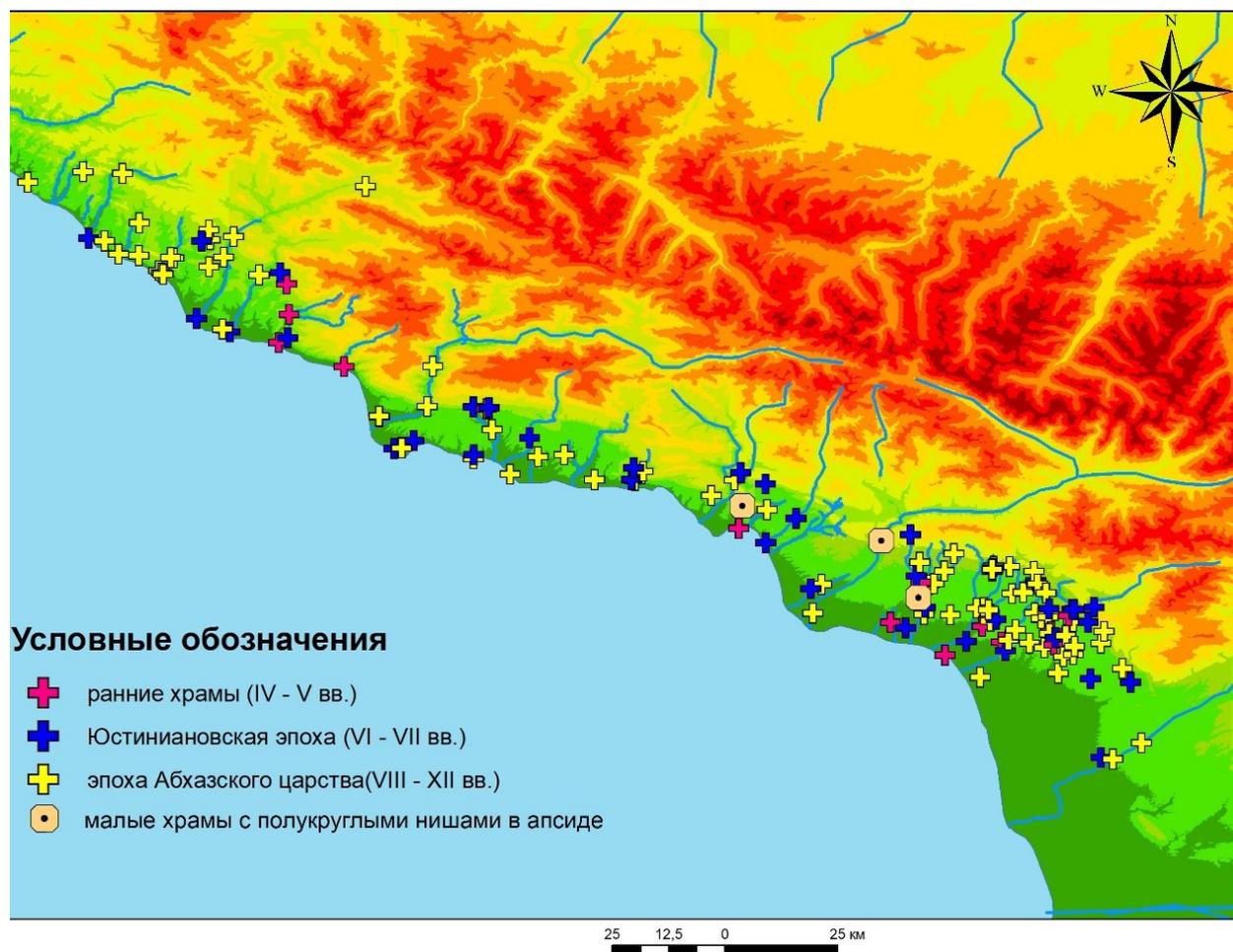


Рис. 7. Расположение малых храмов с полукруглой вписанной в прямоугольный абрис апсидой и с двумя полукруглыми нишами по обеим сторонам апсидного полукружия
Fig. 7. Location of small temples with a semicircular apse inscribed in a rectangular outline and with two semicircular niches on both sides of the apse semicircle

ВЫВОДЫ

Обобщая полученные результаты, необходимо отметить, что проведенный пространственный анализ расположения храмов для отдельных исторических периодов позволил как подтвердить часть ранее высказанных предположений (в частности, что распространение христианства на территории Абхазии напрямую связано с римскими военными гарнизонами), так и дополнить их. В науке существует две основные версии о том, как христианство попало в Колхиду [Хрушкова, 2002, с. 45–47]. Первая связана с миссионерской деятельностью. Вторая же версия опирается на мнение, что не миссионеры принесли христианство, а именно римские солдаты. Проведенный нами пространственный анализ показал, что христианство начало свое распространение от римских крепостей и шло по маршрутам торговых караванных путей. Поэтому нам видится, что можно с уверенностью говорить: римские крепости были отправной точкой в вопросе распространения христианской религии, но способствовали ее распространению торговые контакты с местным населением, которые обусловили культурное взаимодействие. Не исключено, что свою роль сыграли и проповедники, поскольку в первую очередь они перемещались по

активно функционирующим дорогам и явно шли в места массового пребывания людей, а значит — на рынки, торговые точки. Как итог — пути распространения христианства были завязаны на торговые транспортные артерии, но проповеди и культурный обмен могли идти из разных источников, от разных носителей: от проповедников, солдат, купцов. С этим же фактором, как нам кажется, связано и то, что на территории Бзыбской Абхазии, т. е. в современном Гудаутском районе, в ранний период мы фактически не встречаем следов христианизации (исключение — храм Отхара 1). Население сохраняет свои традиционные верования вплоть до обращения в христианство при Юстиниане Великом. Особенностью данной территории является ее некая замкнутость: отсутствие больших караванных путей по ту сторону Кавказа, а значит, и менее интенсивные контакты. Слабая степень христианизации на данной территории нашла свое отражение и в пространственном распределении храмов в следующий период: они концентрируются возле главной крепости — Анакопии-Трахей, но слабо распространены в глубь территории. Анализ архитектурных форм ранних храмов показал, что еще не существовало четких канонов. Для самого раннего периода характерно большое разнообразие архитектурных форм — они как будто отражают развитие самих идей, сам духовный и творческий поиск этой эпохи становления ортодоксального христианства.

Анализ пространственного расположения храмов и их типов позволил проследить эволюцию Церкви и в последующие периоды. Важной особенностью юстиниановского периода (VI–VII вв.) является появление монастырей и четких канонов в архитектуре. Выделяются центральные храмы — крестово-купольные, а также храмы меньшего значения, сохраняющие базиликальность. В целом для данного периода характерны:

- значительный рост числа храмов;
- стандартизация их внешней формы;
- усложнение литургической службы, что отразилось в более сложной организации внутреннего пространства храмов (появление пилястр, большего числа нефов, притворов).

В данный период закрепляется форма базилики с выступающей полукруглой (реже граненой) апсидой. Количество храмов значительно возрастает, особенно в тех районах, где распространение христианства отмечалось значительным в предыдущую эпоху.

В последующий период — время Абхазского царства — отмеченные для юстиниановой эпохи тенденции усиливаются. Выстраивается четкая иерархическая структура внутри самой Церкви. Для данного периода характерно, с одной стороны — появление величественных купольных храмов (Моквский, Лыхненский, Бзыбский и др.), а с другой — массовое распространение форм базилик с невыраженной снаружи апсидой (апсида вписана в общий прямоугольный абрис храма). Центральные, купольные храмы строились на месте епископатов; они символизировали своими куполами главу церкви: в религиозно-семантическом плане — самого Господа, в земном плане — главу управления церковной иерархией. А массовые базиликальные церкви получают более простой, приземистый вид — скорее это символ Дома. Но при всем этом внутренняя организация пространства храма остается достаточно сложной (пилястры, притворы), а в чем-то даже и усложняется — для данного периода характерно появление ритуальных ниш в апсиде, что свидетельствует о дальнейшем развитии и усложнении литургических служб. Многие храмы украшаются резьбой и фресками. Получают распространение дваапсидные церкви. Появление таких церквей связано с усложнением литургических служб. Эволюция форм храмов отражает развитие как самой христианской религии, так и христианской организации во времени.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФ, грант № 22-18-00466.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Science Foundation, grant No. 22-18-00466.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аджинджал Е. К. К вопросу проникновения христианства в Абхазии. Труды Абхазского государственного музея. Вып. 5. Сухуми, 1980. С. 152–165.

Аджинджал Е. К. Из истории христианства Абхазии. Сухумо-Абхазская Епархия. Сухум: Издательство «Стратофил», 2000. Электронный ресурс: https://azbyka.ru/otechnik/Istorija_Tserkvi/iz-istorii-hristianstva-abhazii/#source (дата обращения 02.05.2024).

Аргун А. В. Проблемы локализации пунктов из античных «Периплов» в северо-восточном Причерноморье. Исторические, культурные, межнациональные, религиозные и политические связи Крыма со Средиземноморским регионом и странами Востока: Материалы IV Международной Научной Конференции (Севастополь, 6–10 октября 2020 г.). Т. 1. М.: ИВ РАН, 2020. С. 16–24.

Бриллиантов А. И. Император Константин Великий и Миланский Эдикт 313 г. СПб.: Издательство Олега Абышко, 2006. 336 с.

Кармов Т. М. Хашупсинская крепость в контексте изучения раннесредневековых древностей Абхазии: проблемы и перспективы. Исторические, философские, политические и юридические науки, культурология и искусствоведение. Вопросы теории и практики. Тамбов: Грамота, 2012. № 11. Ч. 2. С. 106–108.

Кобахия Б. С., Хрушкова Л. Г., Шамба С. М. Новая раннехристианская церковь на городище Гюзнос (Абхазия). Вестник Древней Истории, 1987. № 1. С. 126–146.

Леквинадзе В. А. Гантиадская базилика. Советская археология, 1970. № 3. С. 162–174.

Леквинадзе В. А. О постройках Юстиниана в Западной Грузии. Византийский Временник, 1973. Т. 34. С. 169–186.

Пищулина В. В., Комарова С. Е. Особенности пространственной организации памятника Средневековья VII–VIII вв. крепости Хашупсе, Республика Абхазия. Инженерный вестник Дона, 2022. № 7. Электронный ресурс: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7821> (дата обращения 02.05.2024).

Протоиерей Серафим Соколов. История восточного и западного христианства (IV–XX века). Учебное пособие. М.: Издательство Московского Института Духовной Культуры, 2007. 257 с.

Свенцицкая И. С. Тайные писания первых христиан. М., 1980. 202 с.

Скаков А. Ю., Джоуа А. И., Акоюн А. В., Ендольцева Е. Ю. Ранневизантийский храм на городище древнего Гиеноса (Абхазия): новые находки. Архитектурная археология. № 2. М.: ИА РАН, 2020. С. 39–50. DOI: 10.25681/IARAS.2020.978-5-94375-327-5.39-50.

Скаков А. Ю., Скакова И. В., Джоуа А. И. Плинфа раннесредневекового храма в Гиеносе (г. Очамчира, республика Абхазия): публикация материалов раскопок 2019–2021 гг. ByzantinoCaucasica. Сборник статей. М., 2021. С. 9–54. DOI: 10.31696/978-5-907384-95-8-009-053.

Трапи М. М. Древний Сухуми. Труды в 4-х томах. Т. 2. Сухуми: Алашара, 1969. 375 с.

Требелева Г. В., Глазов К. А., Юрков В. Г., Кизилов А. С. Археологическая ГИС Северо-Западной Колхиды: инструмент для сохранения и исследования объектов историко-культурного наследия. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы международной конференции. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 2. С. 484–498. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-484-498.

Требелева Г. В., Кизилов А. С. Еще раз к вопросу о «Понтийском лимесе», или О географических и геополитических принципах расположения древних фортификационных сооружений черноморского побережья в античное время. Древние и традиционные культуры во взаимодействии со средой обитания: проблемы исторической реконструкции. Материалы I Международной междисциплинарной конференции. Челябинск: Челябинский государственный университет, 2021. С. 51–60.

Требелева Г. В., Клемешова М. Е., Скакова И. В., Джопуа А. И. Плинфа из храма в Гиеносе (Гюэнос): результаты тестовых исследований с помощью метода А. А. Бобринского и рентгенофазового анализа. История, археология и этнография Кавказа, 2024. Т. 20. № 4.

Требелева Г. В., Сакания С. М., Шведчикова Т. Ю., Япрынцев А. Д. К проблеме датировки погребений из некрополя Маркульского городища при храме (Абхазия, IV–XIV века): на основе анализа инвентаря, украшений, а также корреляции инвентарных и безынвентарных погребений, их стратиграфии и анализов изотопов. Вещь в контексте погребального обряда. Материалы международной научной конференции. М., 2020. С. 242–250.

Требелева Г. В., Юрков Г. Ю., Горлов Ю. В., Цвинария И. И., Агумаа А. С., Кайтан Ш. Г. Использование физико-химических методов в исследованиях технологии строительства в средневековой Абхазии и проблемы датировки. Краткие сообщения института археологии, 2014. Вып. 232. С. 219–227.

Хрушкова Л. Г. Раннехристианские памятники Восточного Причерноморья (IV–VII века). Москва: Наука, 2002. 500 с.

Хрушкова Л. Г. Новая октогональная церковь в Севастополисе в Абхазии и ее литургическое устройство. Литургия, архитектура и искусство византийского мира. Труды XVIII Международного конгресса византинистов и другие материалы, посвященные памяти о. Иоанна (Мейендорфа). СПб., 1995. С. 201–235.

Шамба С. М. Гюэнос-1. Тбилиси: Мецниереба, 1988. 133 с.

Шамба С. М. Раскопки на городище Гюэнос. Археологические открытия в Абхазии (1986–1987). Тбилиси: Мецниереба, 1990. С. 16–30.

Шамба С. М., Шамба Г. К. Раскопки древнего Гюэноса. Археологические открытия 1981–1982 гг. в Абхазии. Тбилиси: Мецниереба, 1985. С. 19–22.

Dubois de Monpereux F. Voyage autour du Caucase chez les Tcherkesses et les Abkhases en Colchide, en Georgie, en Armenie et en Crimée. Paris, 1839. V. 1. P. 210–211. Atlas. Neuchatel, 1843. Ser. II. Pl VI, 6; Ser. III. Pl. IV, 3 (in French).

Harnak A. Die Mission und Ausbreitung des Christentums in den ersten drei Jahrhunderten: I–II Bd. Leipzig, 1924. 561 s. (in German).

Klemeshova M. E., Trebeleva G. V., Kizilov A. S., Glazov K. A., Sokolov S. V., Yurkov G. Y. Application of the Method of A. A. Bobrinsky to Study the Brick Paste Composition from Eastern Abkhazian Medieval Temples and Fortresses. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Cham: Springer. Geoarchaeology and Archaeological Mineralogy, 2021. DOI: 10.1007/978-3-031-16544-3_17.

Lordkipanidze O., Brakmann H. Iberia II (Georgien). Reallexikon für Antike und Christentum. 1994. No. 17. S. 70–106 (in German).

Notitiae episcopatum Ecclesiae Constantinopolitanae. Texte critique, introduction et notes. Paris, 1981. 521 p. (in Italian).

Peeters P. Les débuts du christianisme en Géorgie d'après les sources hagiographiques'. *Analecta. Bollandiana* 50, 1932. P. 5–58 (in French).

Ruggieri Vincenzo S. I. The IV Century Greek Episcopal Lists in the Mardin Syriac 7 (Olim Mardin Orth. 309/9). *Orientalia Christiana Periodica*, 1993. V. 59, II. P. 315–3.

REFERENCES

Ajinjal E. K. On the issue of the penetration of Christianity in Abkhazia. *Proceedings of the Abkhazian State Museum. Iss. 5. Sukhumi*, 1980. P. 152–165 (in Russian).

Ajinjal E. K. From the history of Christianity in Abkhazia. *Sukhum-Abkhazian Diocese. Sukhum: Stratophil Publishing House*, 2000. Web resource: https://azbyka.ru/otechnik/Istorija_Tserkvi/iz-istorii-hristianstva-abhazii/#source (accessed 02.05.2024) (in Russian).

Archpriest Serafim Sokolov. The history of Eastern and Western Christianity (IV–XX centuries). Textbook. Moscow: Publishing House of the Moscow Institute of Spiritual Culture, 2007. 257 p. (in Russian).

Argun A. V. Problems of localizing points from ancient “Peripheries” in the northeastern Black Sea region. Historical, cultural, interethnic, religious and political ties of Crimea with the Mediterranean region and the countries of the East: *Proceedings of the IV International Scientific Conference (Sevastopol, October 6–10, 2020)*. V. 1. Moscow: IOS RAS, 2020. P. 16–24 (in Russian).

Brilliantov A. I. Emperor Constantine the Great and the Edict of Milan, 313. St. Petersburg: Oleg Abyshko Publishing House, 2006. 336 p. (in Russian).

Dubois de Monpereux F. Voyage autour du Caucase chez les Tcherkesses et les Abkhases en Colchide, en Georgie, en Armenie et en Crimee. Paris, 1839. V. 1. P. 210–211. Atlas. Neuchatel, 1843. Ser. II. Pl VI, 6; Ser. III. Pl. IV, 3 (in French).

Harnak A. Die Mission und Ausbreitung des Christentums in den ersten drei Jahrhunderten: I–II Bd. Leipzig, 1924. 561 s. (in German).

Karmov T. M. Khashupsin fortress in the context of studying the Early Medieval antiquities of Abkhazia: problems and prospects. Historical, philosophical, political and legal sciences, cultural studies and art criticism. Questions of theory and practice. Tambov: Gramota, 2012. No. 11. Part 2. P. 106–108 (in Russian).

Khrushkova L. G. The new octagonal Church in Sebastopolis in Abkhazia and its liturgical structure. The Liturgy, architecture and art of the Byzantine world. *Proceedings of the XVIII International Congress of Byzantinists and other materials dedicated to the memory of fr. John (Meyendorff)*. St. Petersburg, 1995. P. 201–235 (in Russian).

Khrushkova L. G. Early Christian monuments of the Eastern Black Sea region (IV–VII centuries). Moscow: Nauka, 2002. 500 p. (in Russian).

Klemeshova M. E., Trebeleva G. V., Kizilov A. S., Glazov K. A., Sokolov S. V., Yurkov G. Y. Application of the Method of A. A. Bobrinsky to Study the Brick Paste Composition from Eastern Abkhazian Medieval Temples and Fortresses. *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Cham: Springer. Geoarchaeology and Archaeological Mineralogy, 2021. DOI: 10.1007/978-3-031-16544-3_17.

- Kobakhia B. S., Khrushkova L. G., Shamba S. M.* The new Early Christian Church on the settlement of Gyuenos (Abkhazia). *Bulletin of Ancient History*, 1987. No. 1. P. 126–146 (in Russian).
- Lekvinadze V. A.* Gantiada Basilica. *Soviet Archeology*, 1970. No. 3. P. 162–174 (in Russian).
- Lekvinadze V. A.* On the buildings of Justinian in Western Georgia. *The Byzantine Chronicle*, 1973. V. 34. P. 169–186 (in Russian).
- Lordkipanidze O., Brakmann H.* Iberia II (Georgien). *Reallexikon für Antike und Christentum*. 1994. No. 17. P. 70–106 (in German).
- Notitiae episcopatum Ecclesiae Constantinopolitanae.* Texte critique, introduction et notes. Paris, 1981. 521 p. (in Italian).
- Peeters P.* Les débuts du christianisme en Géorgie d'après les sources hagiographiques'. *Analecta Bollandiana* 50, 1932. P. 5–58 (in French).
- Pishchulina V. V., Komarova S. E.* Features of the spatial organization of the monument of the Middle Ages of the VII–VIII centuries. The fortress of Khashupse, Republic of Abkhazia. *Engineering Bulletin of the Don*, 2022. No. 7. Web resource: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7821> (accessed 02.05.2024) (in Russian).
- Ruggieri Vincenzo S. I.* The IV Century Greek Episcopal Lists in the Mardin Syriac 7 (Olim Mardin Orth. 309/9). *Orientalia Christiana Periodica*, 1993. V. 59, II. P. 315–3.
- Shamba S. M.* Guenos-1. Tbilisi: Metsniereba, 1988. 133 p. (in Russian).
- Shamba S. M.* Excavations at the Guenos settlement. *Archaeological discoveries in Abkhazia (1986–1987)*. Tbilisi: Metsniereba, 1990. P. 16–30 (in Russian).
- Shamba S. M., Shamba G. K.* Excavations of ancient Gyuenos. *Archaeological discoveries of 1981–1982 in Abkhazia*. Tbilisi: Metsniereba, 1985. P. 19–22 (in Russian).
- Skakov A. Yu., Jopua A. I., Hakobyan A. V., Endoltseva E. Yu.* Early Byzantine temple on the ancient settlement of Hyenos (Abkhazia): new findings. *Architectural Archaeology*. No. 2. Moscow: IA RAS, 2020. P. 39–50 (in Russian). DOI: 10.25681/IARAS.2020.978-5-94375-327-5.39-50.
- Skakov A. Yu., Skakova I. V., Jopua A. I.* The plinth of the early Medieval temple in Hyenos (Ochamchira, Republic of Abkhazia): publication of excavation materials 2019–2021. *ByzantinoCaucasica*. Collection of articles. Moscow, 2021. P. 9–54 (in Russian). DOI: 10.31696/978-5-907384-95-8-009-053.
- Sventsitskaya I. S.* The Secret writings of the first Christians. Moscow, 1980. 202 p. (in Russian).
- Trapsh M. M.* Ancient Sukhumi. Works in 4 volumes. V. 2. Sukhumi: Alashara, 1969. 375 p. (in Russian).
- Trebeleva G. V., Glazov K. A., Yurkov V. G., Kizilov A. S.* Archaeological GIS of Northwestern Colchis: a tool for the preservation and research of objects of historical and cultural heritage. *InterCarto. InterGIS. Geoinformation support for sustainable development of territories: Proceedings of the International Conference*. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2022. V. 28. Part 2. P. 484–498 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-484-498.
- Trebeleva G. V., Kizilov A. S.* Once again to the question of the “Pontic Limes”, or the geographical and geopolitical principles of the location of ancient fortifications of the Black Sea coast in ancient times. Ancient and traditional cultures in interaction with the environment: problems of historical reconstruction. *Proceedings of the I International Interdisciplinary Conference*. Chelyabinsk: Chelyabinsk State University, 2021. P. 51–60 (in Russian).

Trebeleva G. V., Klemeshova M. E., Skakova I. V., Jopua A. I. Plinth from the temple in Hyenos (Guenos): the results of test studies using the method of A. A. Bobrinsky and X-ray phase analysis. *History, Archeology and Ethnography of the Caucasus*, 2024. V. 20. No. 4 (in Russian).

Trebeleva G. V., Sakania S. M., Shvedchikova T. Yu., Yapryntsev A. D. On the problem of dating burials from the necropolis of the Markulsky settlement at the temple (Abkhazia, IV–XIV centuries): based on the analysis of inventory, jewelry, as well as correlation of inventory and non-inventory burials, their stratigraphy and isotope analyses. A thing in the context of a funeral rite. *Proceedings of the International Scientific Conference. Moscow, 2020*. P. 242–250 (in Russian).

Trebeleva G. V., Yurkov G. Yu., Gorlov Yu. V., Tsvinaria I. I., Agumaa A. S., Kaitan Sh. G. The use of physico-chemical methods in the research of construction technology in medieval Abkhazia and the problems of dating. *Brief Reports of the Institute of Archaeology*, 2014. Iss. 232. P. 219–227 (in Russian).

УДК: 912.4

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-384-396

М. В. Грибок¹

**ПОДХОДЫ
К РАЗРАБОТКЕ АНИМИРОВАННОЙ ИНФОГРАФИКИ
О РЕГИОНАХ РОССИИ В РАМКАХ РЕАЛИЗАЦИИ
ПРОСВЕТИТЕЛЬСКОГО ПРОЕКТА**

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена разработке подходов к отбору, обработке и визуализации информации о регионах России для демонстрации широкому кругу зрителей при помощи анимированной инфографики. Исследование проведено на основе систематизации опыта по созданию видеороликов для выставки-форума «Россия», проходившей в Москве с 4 ноября 2023 г. по 8 июля 2024 г. Видеоинфографика, разработанная автором статьи, демонстрировалась посетителям выставки и давала общее представление об отдельных субъектах РФ, в т. ч. об их населении, природных ресурсах и экономическом развитии. На примере данного проекта выявлены основные информационные блоки, которые могут быть включены в инфографику, и представлены примеры оформления отдельных кадров видео. Сделаны выводы о том, что при написании сценариев анимированной инфографики для просветительских проектов необходимо учитывать цели и задачи проекта, особенности демонстрации видеоинфографики зрителям, особенности ее визуального восприятия, заданный хронометраж, а также индивидуальные особенности регионов. Даны рекомендации по информационному наполнению видеоинфографики в зависимости от характеристик субъектов РФ. В качестве ключевого элемента первых секунд хронометража каждого видеоролика рекомендуется использовать анимированное геоизображение, представляющее собой контур России с последующим налетом на соответствующий регион и его цветовым выделением. Такая анимация представляется оптимальным решением для показа в составе первого кадра видеоинфографики и может быть дополнена появлением герба рассматриваемого региона, а также одной или двух коротких ключевых фраз о данном субъекте РФ. Дальнейший сценарий видеоинфографики зависит от особенностей населения (динамики численности, этнического состава, соотношения численности городских и сельских жителей и др.), ключевых отраслей экономики, природно-климатических и других особенностей, составляющих в совокупности уникальный портрет каждого региона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: инфографика, видеоинфографика, регионы России, популяризация знаний, просветительский проект

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991,
e-mail: gribok.marina@gmail.com

Marina V. Gribok¹

APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF ANIMATED INFOGRAPHICS ABOUT THE REGIONS OF RUSSIA IN THE FRAMEWORK OF THE OUTREACH PROJECT

ABSTRACT

The article is devoted to the development of approaches to the selection, processing and visualization of information about Russian regions for demonstration to a wide range of viewers using animated infographics. The study was conducted on the basis of systematization of experience in creating videos for the exhibition-forum “Russia”, held in Moscow from November 4, 2023 to July 8, 2024. The video infographics developed by the author of the article were shown to visitors of the exhibition and gave a general idea of the regions, including their population, natural resources and economic development. Using this project, the main information blocks of infographics are identified, and examples of video frame design are presented. It is concluded that in the scenario of animated infographics for outreach projects, it is necessary to take into account the goals and objectives of the project, the peculiarities of demonstrating video infographics to viewers, the peculiarities of its visual perception, the set timekeeping, and the individual characteristics of the regions. Depending on the characteristics of the regions, we have given recommendations on the information content of the video infographics. As a key element of the first seconds of the timing of each video, it is recommended to use an animated geographic image of Russia with zooming to the region and its color highlighting. Such animation seems to be the optimal solution for displaying as part of the first frame of the video infographics and can be supplemented by the appearance of the regional coat of arms and one or two short key phrases about the region. The further scenario of the video infographics depends on the characteristics of the population (dynamics, ethnic composition, ratio of urban and rural residents, etc.), key sectors of the economy, natural and climatic and other features that together make up a unique portrait of each region.

KEYWORDS: infographics, video infographics, regions of Russia, popularization of knowledge, outreach project

ВВЕДЕНИЕ

Считается, что мозг человека лучше распознает и понимает взаимосвязи и закономерности, если представленные ему данные закодированы в визуальные формы [Cleveland, 1994]. Графическое представление информации, предназначенное для быстрой и качественной ее передачи аудитории, получило название «инфографика» [Newsom, Haynes, 2004; Smiciklas, 2012]. Использование инфографики может увеличить эффективность восприятия информации пользователем, т. к. облегчает зрительной системе задачу узнавания различных закономерностей и тенденций [Heer et al., 2010; Siricharoen, 2013].

Выделяют следующие виды инфографики:

- статичная — предназначенная для использования в печатном или цифровом виде без использования каких-либо движущихся или анимированных элементов;
- интерактивная — с использованием элементов взаимодействия или каких-либо функций управления, которые позволяют пользователю отображать информацию на экране в соответствии с его предпочтениями;

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: gribok.marina@gmail.com

- анимированная, т. е. разработанная с целью воспроизведения в видеоформате. Ее элементы находятся в постоянном движении и создаются с помощью программного обеспечения для компьютерной анимации [Hassan, 2016].

Анимированная инфографика (или видеоинфографика) обычно используется на телевидении [Симакова, 2016] (в новостных сюжетах, научно-популярных, и образовательных программах, рекламе и т. д.), в музейных экспозициях [Терехина, 2019], бизнес-презентациях [Яу, 2013], а также в различных просветительских [Норсеева, Дегтярева, 2015] и образовательных проектах, в т. ч. как дополнение к школьным урокам или лекциям в вузах [Манжура, 2017; Jaleniauskiene, Kasperuniene, 2023]. При ее разработке необходимо учитывать хронометраж видео, разрешение экрана, возраст и другие характеристики аудитории, а также особенности восприятия анимированной графики человеческим мозгом. В частности, для наиболее эффективного и легкого восприятия анимированной инфографики необходимо соблюдать принцип управления вниманием зрителя. Согласно этому принципу, все элементы графики должны анимироваться последовательно, чтобы у зрителя не возникало непонимания, в какую часть кадра ему нужно смотреть в данный момент и не приходилось следить сразу за двумя или более областями экрана [Грибок, 2021].

Инфографику по географической тематике, важной частью которой является одно или несколько геоизображений, называют геоинфографикой. Это направление часто рассматривается отдельно, т. к. в производстве геоинфографики, как правило, участвуют не только дизайнеры и специалисты по визуализации данных, но и картографы [Сератинас, Прохорова, 2015]. По определению А. М. Берлянта [2005], геоизображения — это любые пространственно-временные, масштабные, генерализованные модели земных объектов или процессов, представленные в графической образной форме. Образность, как одно из свойств геоизображений, наделяет их возможностью вызывать в памяти или создавать у пользователя узнаваемый образ географического объекта, тогда как другие составляющие геоинфографики помогают наполнить этот образ дополнительными деталями и смыслами.

В последние годы в России реализуется большое количество просветительских проектов, направленных на популяризацию знаний населения о своей стране и регионах. По определению Российского общества «Знание», просветительский проект — это результат творческой просветительской деятельности, направленный на повышение научного, образовательного и культурного уровня граждан (в т. ч. фильм, книга, блог, платформа, комплекс мероприятий и другие просветительские форматы)¹. К просветительским проектам по географической тематике можно отнести многие мероприятия, которые проводит Русское географическое общество: «Географический диктант»², «НЕурок географии»³, фотоконкурс «Самая красивая страна»⁴, географические фестивали, праздничные мероприятия ко Дню географа и др.

Множество мероприятий, направленных на повышение уровня знаний посетителей о регионах страны и развитие внутреннего туризма было проведено в рамках выставки-форума «Россия», проходившей на ВДНХ в Москве с 4 ноября 2023 г. по 8 июля 2024 г.

¹ Сайт Российского общества «Знание». Электронный ресурс: <https://award.znaniarussia.ru/> (дата обращения 10.04.2024)

² Географический диктант. Электронный ресурс: <https://dictant.rgo.ru/> (дата обращения 10.04.2024)

³ Просветительский проект «НЕурок географии». Электронный ресурс: <https://rgo.ru/activity/project-list/prosv-etitel'skiy-proekt-neurok-geografii/> (дата обращения 10.04.2024)

⁴ Фотоконкурс «Самая красивая страна». Электронный ресурс: <https://photo.rgo.ru/> (дата обращения 10.04.2024)

В анонсе выставки сообщалось, что она «проводится в целях демонстрации важнейших достижений России в различных отраслях экономики, в т. ч. промышленности, энергетики, агропромышленного комплекса, транспорта, строительства, науки и культуры. Также будет отмечен положительный опыт развития регионов страны»¹. Демонстрация анимированной геоинфографики на подобных мероприятиях — хороший способ наглядно представить информацию о субъектах РФ для широкой аудитории и повысить ее уровень знаний об особенностях и достижениях регионов.

В настоящее время опубликовано большое количество научных работ, посвященных применению геоинфографики для образовательных целей [Серापина, Прохорова, 2015; Кузнецова, 2016; Кузнецова, Лукашова, 2017], однако для просветительских проектов, рассчитанных на широкую аудиторию, подобные публикации практически отсутствуют. Целью данного исследования является разработка подходов к отбору, обработке и визуализации информации о субъектах РФ для демонстрации широкому кругу зрителей при помощи видеоинфографики без закадрового голоса в рамках реализации просветительских проектов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основным материалом для исследования стала ранее разработанная автором статьи серия из 30 инфографических видеороликов, посвященных отдельным субъектам РФ. Ролики создавались по заказу ВГТРК для показа во время проведения международной выставки-форума «Россия», а также демонстрировались в эфире телеканала «Россия-24» как часть серии «Россия в цифрах» [Грибок, 2023].

Помимо собственных разработок был изучен опыт проектирования инфографики о регионах и городах России в рамках других проектов и исследований [Веселицкий, 2015; Павлова, 2016; Бажукова, Александрова, 2019; Жихарева, 2021].

Удачным примером разработки инфографики об отдельных субъектах РФ нам представляются серии статических изображений, которые публикуются в социальных сетях Росстата². Пример такой серии представлен на рис. 1 и посвящен Ростовской области.

Как мы видим, первое изображение в серии — закрашенный контур региона с основными объектами гидрографии и столицей области. Рядом расположена подпись площади региона и доли сельхозугодий, т. е. сразу подчеркивается сельскохозяйственная специализация региона. На рис. 2 представлена информация о населении, а на рис. 3 и 4 — основные показатели сельского хозяйства. Рис. 5 и 6 рассказывают об уникальных объектах области, которые могли бы привлечь туристов. Таким образом, инфографика содержит 4 информационных составляющих: геоизображение, основная информация о населении, информация о достижениях в сельском хозяйстве и информация о выбранных туристических объектах. Все вместе они способствуют продвижению имиджа Ростовской области как региона с развитым сельским хозяйством и уникальными достопримечательностями.

Инфографика Росстата о других регионах построена похожим образом. Первые два изображения во всех сериях почти аналогичны тем, что представлены на рис. 1, а остальные зависят от специализации региона либо от наличия в нем каких-либо уникальных объектов, о которых разработчик инфографики по каким-либо причинам считает важным упомянуть. Например, в инфографике о Республике Мордовии идет речь о ее предприятиях и уникальной продукции, которую они производят, а в инфографике о Карачаево-Черкесской Республике — о горе Эльбрус, Тебердинском национальном парке, курорте «Архыз» и научной обсерватории САО РАН.

¹ Анонс выставки-форума «Россия» на сайте Минобрнауки России. Электронный ресурс: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/announcements/72716/> (дата обращения 10.04.2024)

² Телеграм-канал Росстата. Электронный ресурс: https://t.me/s/rosstat_official (дата обращения 21.07.2024)



Рис. 1. Инфографика Росстата о Ростовской области
Fig. 1. Infographics about the Rostov region made by Rosstat

Анимированная инфографика о регионах для выставки-форума «Россия» создавалась по похожим принципам, однако с учетом того, что продуктом разработки является видеоролик, а не набор статических изображений, необходимо было существенно сократить объем текста в ее составе. Для подсчета объема текста, который зритель может успеть прочитать в течение заданного хронометража, удобно использовать онлайн-сервис «Хрономер»¹. Дизайн инфографики разрабатывался в соответствии с фирменным стилем выставки. Контрастность цветов и размер шрифта выбирались с учетом возможности просмотра инфографики с расстояния нескольких метров от экрана.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обобщая опыт разработки видеороликов о субъектах РФ для выставки-форума «Россия», можно сформулировать основные принципы написания сценариев для данной серии инфографики.

Каждый видеоролик состоит из 3–5 кадров. Функция первого (вводного) кадра — сконцентрировать внимание зрителя на рассматриваемом регионе и кратко представить какую-либо важную информацию, выделяющую его среди других субъектов РФ. Оптимальным выбором способа визуализации для решения этой задачи является использование геоизображения в виде закрашенного контура региона и одного либо двух коротких текстовых пояснений. Это может быть просто подпись численности населения или указание на какое-либо явное отличие данного региона от других (например, «Сахалинская область — единственный островной регион России»). Для увеличения наглядности сначала зрителю демонстрировался контур всей России с границами регионов, а затем

¹ Хрономер. Электронный ресурс: <https://hronomer.com/> (дата обращения 21.07.2024)

производился анимированный налет на нужный регион. Примеры первых кадров видеороликов для форума «Россия» представлены на рис. 2. Во многих видеороликах данной серии частью первого кадра также становился герб региона. При этом для цвета окраски региона на картографическом изображении, как правило, выбирался основной цвет его герба.

Наиболее логичным выбором для второго кадра видеоинфографики представляется показ информации о численности населения региона, как одной из важнейших его характеристик.

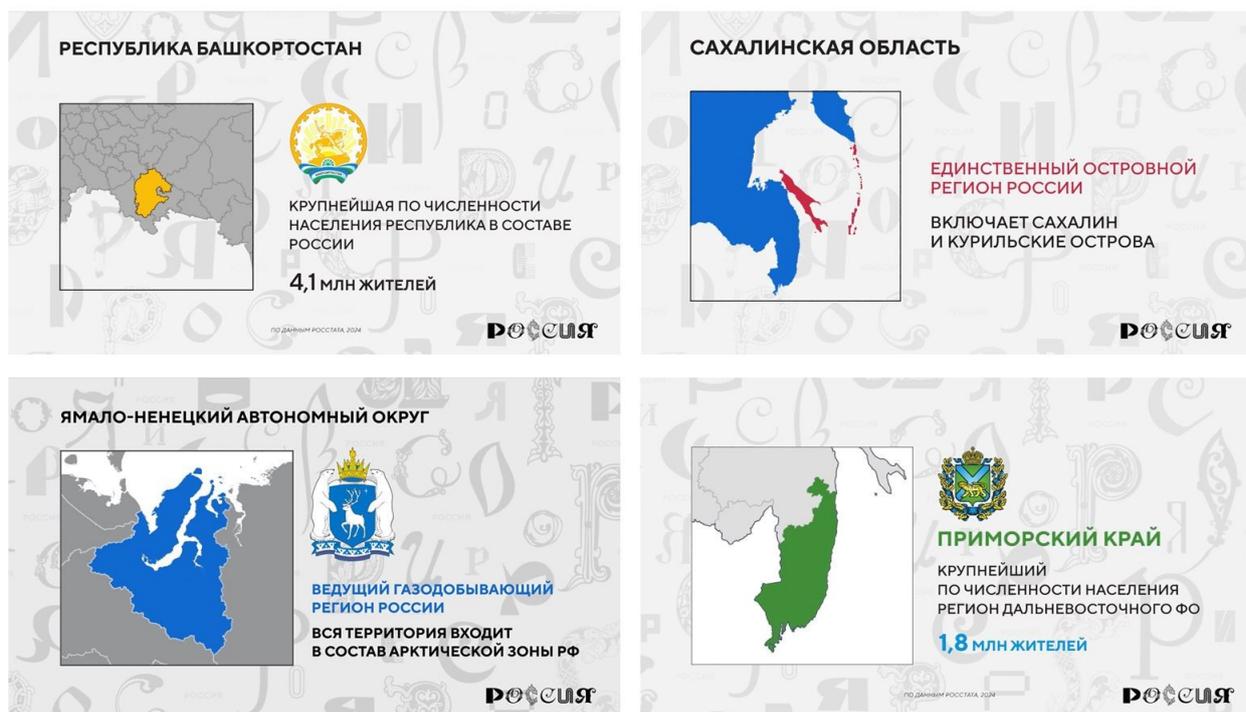


Рис. 2. Примеры первых кадров видеоинфографики о субъектах РФ для выставки-форума «Россия»

Fig. 2. Examples of the first frames of video infographics about the subjects of the Russian Federation for the exhibition-forum "Russia"

По теме населения могут быть следующие варианты кадров на основе данных Росстата:

- о динамике численности населения региона (для выставки «Россия» такой кадр добавлялся только в том случае, если численность населения выросла за последние 10–20 лет, т. к. согласно концепции данного проекта необходимо было акцентировать внимание на положительных изменениях и достижениях регионов);
- о доле городского и сельского населения;
- о столице региона (в т. ч. с выделением доли населения региона, проживающего в ней);
- о национальном составе населения (если регион не является моноэтническим);
- о крупнейших городах.

Визуализация динамики численности населения осуществлялась при помощи столбчатой диаграммы, т. к. слева направо по горизонтальной оси удобно воспринимать

шкалу времени. Для визуализации состава населения по какому-либо признаку чаще всего использовалась группа схематичных фигур людей (обычно 100, 50 или 25 фигур), которая делилась на части с соответствующими подписями. Население крупнейших городов региона изображалось при помощи горизонтальных столбцов, к которым часто добавлялись дополнительные текстовые пояснения. Примеры кадров о населении регионов России представлены на рис. 3.

После окончания показа данных о населении определено два основных варианта дальнейшего сценария для видеороликов: это переход к информации об экономике региона либо о его природно-климатических особенностях. Если регион характеризуется какими-либо ключевыми отраслями промышленности или уникальными природными богатствами, в видеоинфографику включались соответствующие кадры.

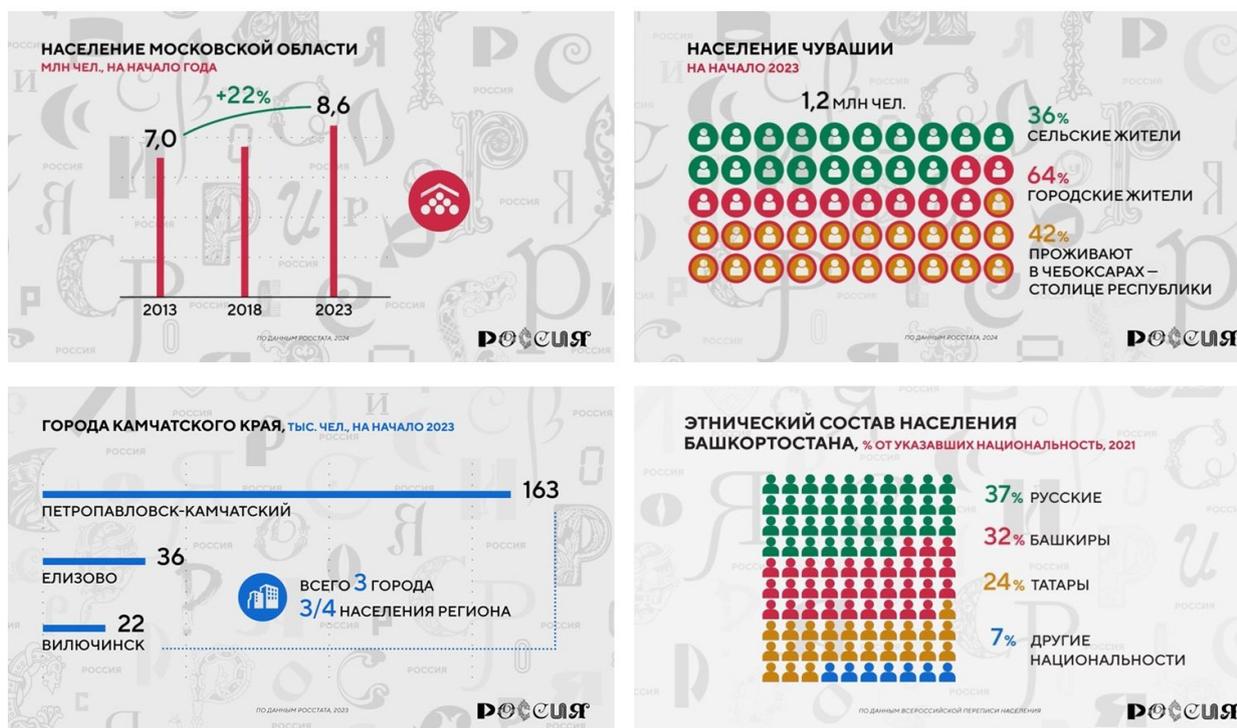


Рис. 3. Примеры кадров видеоинфографики о населении субъектов РФ для выставки-форума «Россия»
Fig. 3. Examples of video infographic frames about the population of Russian regions for the exhibition-forum “Russia”

Как правило, в инфографике более предпочтительно визуализировать данные, выраженные в числовой форме. Например, в видеоролике о Мурманской области показана доля данного региона в объеме российского производства некоторых видов минерального сырья (в т. ч. здесь сосредоточено 100 % добычи апатитового и нефелинового концентрата). В инфографике о Ямало-Ненецком АО показана доля этого региона в мировой и российской газодобыче. Однако можно обойтись и без числовых данных, составив кадр в виде перечня каких-либо подписей — например, основных природных ресурсов или основных сфер экономики. Визуальными «помощниками» для восприятия информации в этом случае могут являться наглядные иконки, которые используются в дополнение к тексту. Примеры кадров об экономике и промышленности регионов представлены на рис. 4.

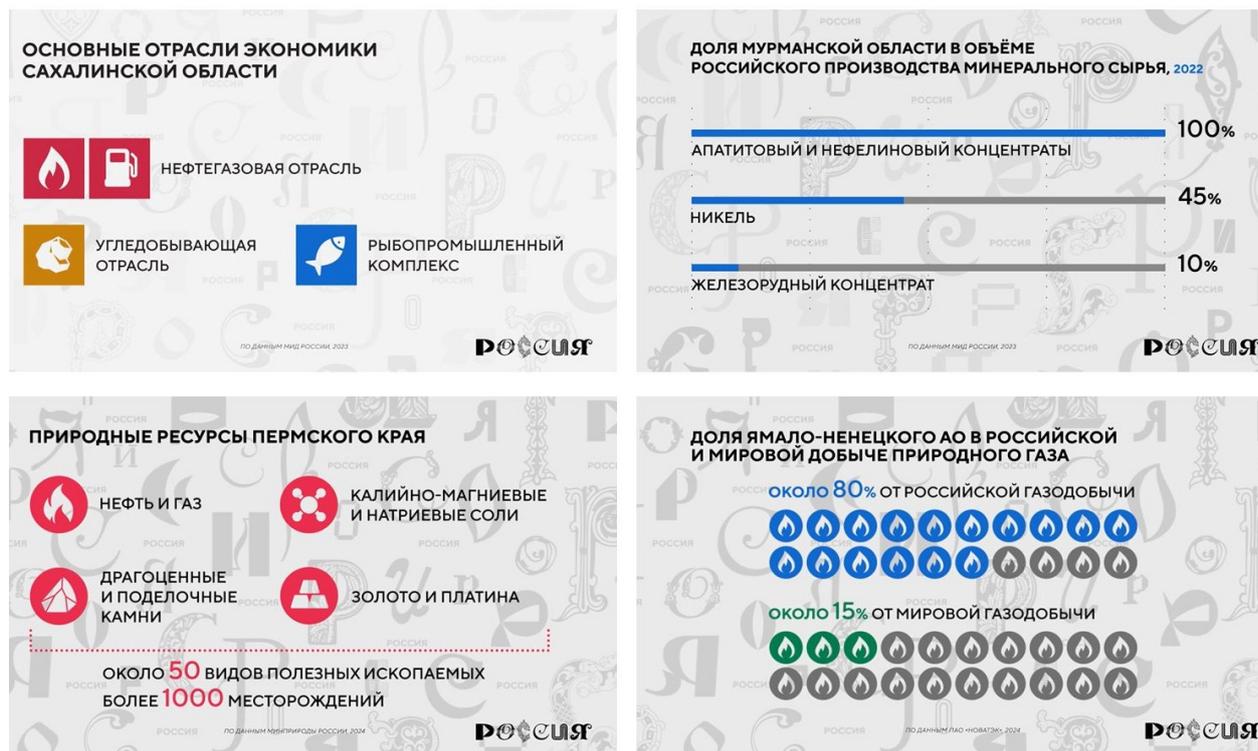


Рис. 4. Примеры кадров видеоинфографики об экономике и природных ресурсах субъектов РФ для выставки-форума «Россия»
Fig. 4. Examples of video infographic frames about the economy and natural resources of Russian regions for the exhibition-forum “Russia”

Что касается показа природно-климатических особенностей регионов, можно сделать это при помощи геоизображения, максимально генерализованного и простого для восприятия. Например, один из кадров инфографики о Мурманской области демонстрирует деление территории этого региона на две природные зоны с подписями: «тундра» и «лесотундра и северная тайга».

На природную уникальность региона, которую важно продемонстрировать зрителю, может указывать наличие на его территории объектов всемирного природного наследия ЮНЕСКО. Кадры об этих объектах добавлены в видеоинфографику о Республике Коми и Камчатском крае. Для повышения наглядности использованы иконки с логотипом ЮНЕСКО. Перечисленные выше и некоторые другие примеры кадров об природно-климатических особенностях субъектов РФ представлены на рис. 5.

Таким образом, все разработанные видеоролики для выставки-форума «Россия» содержат геоизображение региона и информацию о его населении, и некоторые — об экономике или природных особенностях в зависимости от наличия каких-либо уникальных черт региона, знания о которых представляются наиболее важными для показа широкому кругу зрителей.

Для облегчения подбора кадров видеоинфографики, целями которой являются общее повышение уровня знаний аудитории просветительского проекта о регионах России и улучшение их образов в массовых представлениях, составлен перечень вопросов и рекомендаций, представленный в табл. 1.

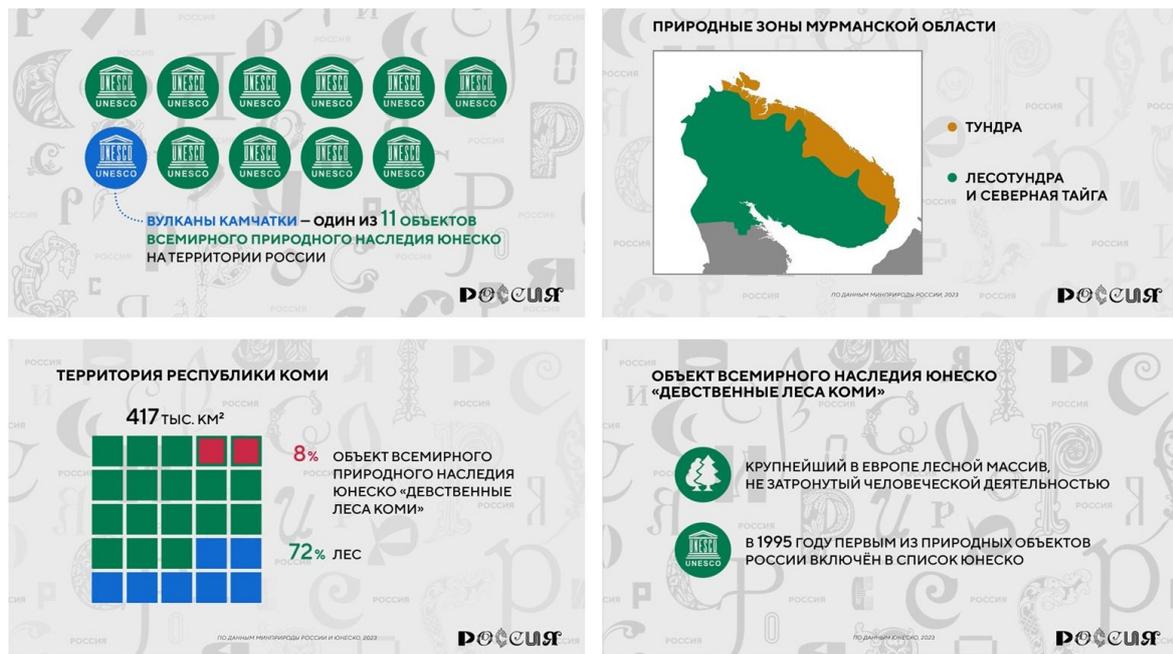


Рис. 5. Примеры кадров видеoinфографики о природно-климатических особенностях субъектов РФ для выставки-форума «Россия»

Fig. 5. Examples of video infographics frames about the natural and climatic features of Russian regions for the exhibition-forum “Russia”

Табл. 1. Рекомендации по подбору кадров для видеoinфографики о регионах России (с учетом необходимости представления позитивного контекста)

Table 1. Recommendations for the selection of frames for video infographics about Russian regions (if it is necessary to present a positive context)

№	Вопрос	Рекомендация
1	Как менялась численность населения региона за последние 10–20 лет?	Если увеличивалась, рекомендуется добавить кадр о динамике населения.
2	Является ли регион моноэтническим?	Если нет, рекомендуется добавить кадр об этническом составе населения.
3	Входит ли регион в число лидеров по какой-либо отрасли промышленности или сельского хозяйства?	Если да, рекомендуется добавить кадр об этой отрасли.
4	Обладает ли регион какими-либо уникальными природными ресурсами?	Если да, рекомендуется добавить кадр о разведанных запасах или добыче этих ресурсов.
5	Есть ли у региона какие-либо природно-климатические особенности, не характерные для большинства других регионов России?	Если да, рекомендуется добавить кадр с информацией об этих особенностях.
6	Есть ли в регионе какие-либо уникальные природные или другие объекты? Например, объекты Всемирного наследия ЮНЕСКО.	Если да, рекомендуется добавить кадр с информацией об этих объектах.

Однако если цели разработки анимированной инфографики отличаются от перечисленных выше, принципы подбора кадров могут быть другими. Например, в том случае, если нет необходимости придерживаться позитивного контекста, характерного для видеороликов к выставке-форуму «Россия», в инфографику может быть включена информация о каких-либо актуальных проблемах регионов. Если же инфографика и соответствующий просветительский проект должны быть направлены на повышение туристической привлекательности регионов, необходимы кадры о ключевых достопримечательностях, культурных мероприятиях и т. п.

ВЫВОДЫ

Анимированная инфографика представляет собой наглядный и эффективный способ представления информации для широкого круга зрителей в рамках реализации просветительских проектов. При ее разработке необходимо учитывать ряд факторов, таких как особенности демонстрации анимированной графики (в т. ч. разрешение и размер экрана, его расстояние до зрителя), заданный хронометраж и особенности визуального восприятия информации в видеоформате. Необходимо соблюдать принцип управления вниманием зрителя, а также убедиться в том, что неподготовленный зритель может успеть прочитать все надписи и зафиксировать происходящее на экране в процессе просмотра видео, не имея возможности поставить паузу и более внимательно рассмотреть каждый кадр. Вся информация должна быть максимально доступной для понимания без дополнительных разъяснений. Это обстоятельство, а также ограниченный хронометраж видеоролика определяют необходимость тщательного отбора информации, которая будет включена в инфографику.

При разработке анимированной инфографики для просветительских проектов, направленных на повышение уровня знаний населения о регионах России, помимо перечисленных факторов важно учитывать индивидуальные особенности каждого представляемого региона (развитие ключевых отраслей экономики, природно-климатические особенности, наличие уникальных природных или культурных объектов), а также цели и задачи проекта, в рамках которого создается инфографика.

На примере разработанной серии видеороликов для выставки-форума «Россия» выявлены основные информационные блоки, из которых может состоять видеоинфографика, и даны рекомендации по их информационному и визуальному наполнению.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность компании «Меркатор» за плодотворное сотрудничество по реализации проекта «Россия в цифрах» и предоставленные видеоматериалы.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author is grateful to “Mercator” for cooperation in the implementation of the “Russia in figures” project and the provision of video materials.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бажукова Н. В., Александрова Н. М.* Визуализация характеристик горнолыжных комплексов Пермского края методами геоинфографики. География и туризм, 2019. № 2. С. 17–23.
- Берлянт А. М.* Геоиконика — наука о геоизображениях. Известия РАН. Серия географическая, 2005. № 1. С. 121–127.
- Грибок М. В.* Образ России в телевизионной инфографике (на примере проекта «Россия в цифрах» телеканала «Россия 24»). Образ Родины: содержание, формирование, актуализа-

ция. Материалы V Международной научной конференции. М.: Московский художественно-промышленный институт, 2021. С. 502–505.

Грибок М. В. Об опыте разработки телевизионной инфографики по итогам Всероссийской переписи населения. Современная Евразия: общественно-географический анализ. Материалы Международной научной конференции (XIV научная Ассамблея АРГО). Улан-Удэ: Бурятский научный центр Сибирского отделения РАН, 2023. С. 296–298.

Жихарева О. И. Анализ возможности использования инфографики для отражения специфики демографических процессов в регионе. Естественное: исследования и обучение. Материалы конференции «Чтения Ушинского». Ярославль: Ярославский государственный педагогический университет им. К. Д. Ушинского, 2021. С. 106–112.

Кузнецова Е. Ю. Геоинфографика как средство наглядности в современной школе. Научная дискуссия современной молодежи: педагогика и психология. Сборник статей Международной научно-практической конференции. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г. Ю.), 2016. С. 96–98.

Кузнецова Е. Ю., Лукашова О. П. Геоинфографика как современное средство обучения в школьном курсе региональной географии. VI Семеновские чтения: наследие П. П. Семёнова-Тян-Шанского и современная наука. Материалы Международной научной конференции, посвященной 190-летию со дня рождения П. П. Семёнова-Тян-Шанского. Липецк: Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семёнова-Тян-Шанского, 2017. С. 100–102.

Лантев В. В. Инфографика: основные понятия и определения. Terra Linguistica. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Гуманитарные и общественные науки, 2013. № 4(184). С. 180–187.

Манжура Л. Н. Инфографика как один из методов визуализации учебного материала. Санкт-Петербургский образовательный вестник, 2017. № 2(6). С. 72–74.

Норсеева М. Е., Дегтярева А. В. Применение инфографики для подготовки населения в области безопасности жизнедеятельности. Технологии гражданской безопасности, 2015. Т. 12. № 3(45). С. 64–68.

Павлова А. И. Моушн-дизайн в северном городе. Арктический дизайн. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Мурманск, 16–18 ноября 2015 года. Мурманск: Мурманский арктический государственный университет, 2016. С. 38–44.

Сератина Б. Б., Прохорова Е. А. Геоинфографика как современное направление геовизуализации в обучении студентов-картографов. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2015. № 5. С. 94–99.

Симакова С. И. Инфографика на телевидении. Вестник Челябинского государственного университета, 2016. № 9(391). С. 158–165.

Терехина Т. В. Информативная графика в музеях и на выставках. Гуманитарный трактат, 2019. № 59. С. 4–7.

Ю Н. Искусство визуализации в бизнесе. Как представить сложную информацию простыми образами. М.: МИФ, 2013. 352 с.

Cleveland W. S. The Elements of Graphing Data. Revised Edition. New Jersey: Hobart Press, 1994. 314 p.

Hassan H. G. Designing Infographics to support teaching complex science subject: A comparison between static and animated Infographics. Graduate Theses and Dissertations, 2016. 117 p. DOI: 10.31274/etd-180810-5344.

Heer J., Bostock M., Ogievetsky V. A tour through the visualization zoo. Communications of the ACM, 2010. No. 53(6). P. 59–67.

Jaleniauskiene E, Kasperuniene J. Infographics in higher education: A scoping review. E-learning and Digital Media, 2023. No. 20(2). P. 191–206.

Newsom D., Haynes J. Public Relations Writing: Form and Style. Business & Economics, 2004. 441 p.

Siricharoen W. V. Infographics: the new communication tools in digital age. In the International Conference on E-technologies and Business on the Web (ebw2013), 2013. V. 169174.

Smiciklas M. The Power of Infographics: Using Pictures to Communicate and Connect with Your Audience. Que Publishing, 2012. 199 p.

REFERENCES

Bazhukova N. V., Alexandrova N. M. Visualization of the characteristics of ski complexes of the Perm region by geoinfographic methods. Geography and Tourism, 2019. No. 2. P. 17–23 (in Russian).

Berlyant A. M. Geoiconics — the science of geo-images. Izvestia RAN. Seriya Geograficheskaya (News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series), 2005. No. 1. P. 121–127 (in Russian).

Cleveland W. S. The Elements of Graphing Data. Revised Edition. New Jersey: Hobart Press, 1994. 314 p.

Gribok M. V. On the experience of developing television infographics based on the results of the All-Russian Population Census. Modern Eurasia: Socio-geographical analysis. Proceedings of the International Scientific Conference (XIV Scientific Assembly of ARGO). Ulan-Ude: Buryatia Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS, 2023. P. 296–298 (in Russian).

Gribok M. V. The image of Russia in television infographics (on the example of the project “Russia in figures” of the TV channel “Russia 24”). The Image of the Motherland: Content, Formation, Actualization. Proceedings of the V International Scientific Conference. Moscow: Moscow Institute of Art and Industry, 2021. P. 502–505 (in Russian).

Hassan H. G. Designing Infographics to support teaching complex science subject: A comparison between static and animated Infographics. Graduate Theses and Dissertations, 2016. 117 p. DOI: 10.31274/etd-180810-5344.

Heer J., Bostock M., Ogievetsky V. A tour through the visualization zoo. Communications of the ACM, 2010. No. 53(6). P. 59–67.

Jaleniauskiene E, Kasperuniene J. Infographics in higher education: A scoping review. E-learning and Digital Media, 2023. No. 20(2). P. 191–206.

Kuznetsova E. Yu. Geoinfographics as a means of visualization in a modern school. Scientific discussion of modern youth: pedagogy and psychology. Collection of articles from the International scientific and practical conference. Penza: Science and Education (IE Gulyaev G. Yu.), 2016. P. 96–98 (in Russian).

Kuznetsova E. Yu., Lukashova O. P. Geoinfographics as a modern teaching tool in the school course of regional geography. VI Semenov Readings: the collection of P. P. Semenov-Tyan-Shansky and new Science. Proceedings of the International Scientific Conference dedicated to the

190th anniversary of the birth of P. P. Semenov-Tyan-Shansky. Lipetsk: Lipetsk State Pedagogical University named after P. P. Semenov-Tyan-Shansky, 2017. P. 100–102 (in Russian).

Lapteva V. V. Infographics: basic concepts and definitions. *Terra Linguistica. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Humanities and Social Sciences*, 2013. No. 4(184). P. 180–187 (in Russian).

Manzhura L. N. Infographics as one of the methods of visualization of educational material. *St. Petersburg Educational Bulletin*, 2017. No. 2(6). P. 72–74 (in Russian).

Newsom D., Haynes J. *Public Relations Writing: Form and Style. Business & Economics*, 2004. 441 p.

Norseeva M. E., Degtyareva A. V. The use of infographics for training the population in the field of life safety. *Civil Security Technology*, 2015. V. 12. No. 3(45). P. 64–68 (in Russian).

Pavlova A. I. Motion design in the northern city. *Arctic Design. Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, Murmansk, November 16–18, 2015. Murmansk: Murmansk Arctic University*, 2016. P. 38–44 (in Russian).

Serapinas B. B., Prokhorova E. A. Geoinfographics as a modern direction of geovisualization in teaching cartography students. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5. Geografiya (Lomonosov Geography Journal. Series 5. Geography)*, 2015. No. 5. P. 94–99 (in Russian).

Simakova S. I. Infographics on television. *Bulletin of Chelyabinsk State University*, 2016. No. 9(391). P. 158–165 (in Russian).

Siricharoen W. V. Infographics: the new communication tools in digital age. In the *International Conference on E-technologies and Business on the Web (ebw2013)*, 2013. V. 169174.

Smiciklas M. *The Power of Infographics: Using Pictures to Communicate and Connect with Your Audience. Que Publishing*, 2012. 199 p.

Terekhina T. V. Informative graphics in museums and exhibitions. *Humanitarian Treatise*, 2019. No. 59. P. 4–7 (in Russian).

Yau N. *The art of visualization in business. How to present using formalized representations. Moscow: MIF*, 2013. 352 p. (in Russian).

Zhikhareva O. I. Analysis of the possibility of using infographics to reflect the specifics of demographic processes in the region. *Natural Science: Research and Education. Proceedings of the conference “Ushinsky Readings”*. Yaroslavl: Yaroslavl State Pedagogical University named after K. D. Ushinsky, 2021. P. 106–112 (in Russian).

УДК: 528.9(479.22)

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-397-409

Т. П. Гордезиани¹, С. Г. Элбакидзе²

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ИСТОРИКО-РЕЛИГИОЗНЫХ ПАМЯТНИКОВ КАРЕЛЬСКОГО МУНИЦИПАЛИТЕТА (ГРУЗИЯ)

АННОТАЦИЯ

В последнем 30-летнем периоде в Грузии одним из приоритетных направлений тематической картографии является атласное картографирование историко-религиозных памятников отдельных регионов Грузии. Целью данной статьи является классификация по разным признакам и картографирование историко-религиозных памятников Карельского муниципалитета. В процессе работы использовались материалы, полученные в полевой экспедиции, а также имеющиеся фондовые материалы. Использовались также литературные и картографические источники. В полевых условиях был произведен опрос духовенства об историко-религиозных памятниках на территории исследуемого муниципального образования. Собранные записи были использованы для составления текстовой части статьи и итоговой карты. В качестве картографической основы использовалась топографическая карта м-ба 1: 200 000, по которой расположение памятников определялось по гипсометрическим шагам. Ландшафтная карта Грузии м-ба 1: 200 000 использовалась и при определении родов ландшафтов, в которых расположены историко-религиозные памятники Карельского муниципалитета. В процессе исследования были использованы картографический метод исследования, описательный метод и метод сравнительного анализа. Конечным результатом работы является карта историко-религиозных памятников Карельского района м-ба 1: 200 000. Муниципалитет Карели и особенно находящаяся на его территории долина р. Дзама, считаются богатейшим регионом с точки зрения наличия историко-религиозных памятников Грузии. Именно по этой причине этот муниципалитет был выбран объектом картографирования. Составленная карта историко-религиозных памятников является частью комплексного электронного атласа Карельского муниципалитета. В полевых условиях были собраны следующие материалы об историко-религиозных памятниках Карельского муниципалитета: географические координаты, дата образования, тип и архитектурные особенности, функциональное назначение, физическое состояние, местонахождение памятника. При анализе составленной карты были выявлены некоторые географические особенности расположения историко-религиозных памятников по гипсометрическим ступеням и по ландшафтам. Карта историко-религиозных памятников Карельского муниципалитета может быть с успехом использована для планирования новых туристических маршрутов на территории муниципалитета и составления полноценных туристических путеводителей. В какой-то степени карта также может использоваться службой охраны памятников для целей мониторинга этих объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: историческая картография, историко-религиозный памятник, база данных, историко-географическая карта

¹ Тбилисский государственный университет имени Иване Джавахишвили, пр-т Чавчавадзе, д. 3, Тбилиси, Грузия, 0179, *e-mail*: tengiz.gordeziani@tsu.ge

² Тбилисский государственный университет имени Иване Джавахишвили, пр-т Чавчавадзе, д. 3, Тбилиси, Грузия, 0179, *e-mail*: salomesalo13@gmail.com

Tengiz P. Gordeziani¹, Salome G. Elbakidze²

MAPPING OF HISTORICAL AND RELIGIOUS MONUMENTS OF THE KARELIAN MUNICIPALITY (GEORGIA)

ABSTRACT

In the last 30-year period in Georgia one of the priority directions of thematic cartography is atlas mapping of historical and religious monuments of individual regions of Georgia. The purpose of this article is classification by various features and mapping of historical and religious monuments of the Kareli municipality. In the process of work the materials obtained during the field expedition, as well as the available archive materials, were used. Literary and cartographic sources were also used. In the field conditions the clergy was surveyed about historical and religious monuments in the territory of the studied municipality. The collected records were used to compile the text part of the article and the final map. As a cartographic basis the topographic map of scale 1: 200 000 was used, according to which the location of monuments was determined by hypsometric steps. Landscape map of Georgia of scale 1: 200 000 was also used in determining the types of landscapes in which the historical and religious monuments of the Kareli municipality are located. In the process of the research the cartographic method of research, the descriptive method and the method of comparative analysis were used. The final result of the work is the map of historical and religious monuments of the Kareli Region on the scale of 1: 200 000. The Kareli municipality and especially the valley of the Dzama River located on its territory are considered the richest region in terms of historical and religious monuments of Georgia. It is for this reason that this municipality was chosen as the object of mapping. The compiled map of historical and religious monuments is a part of the complex electronic atlas of the Kareli municipality. In the field conditions the following materials on historical and religious monuments of the Kareli municipality were collected: geographic coordinates, date of foundation of the monument, type and architectural features of the monument, functional purpose of the monument, physical condition of the monument, location of the monument. During the analysis of the compiled map some geographic features of the location of historical and religious monuments by hypsometric steps and by landscapes were revealed. The map of historical and religious monuments of the Kareli municipality can be successfully used for planning new tourist routes on the territory of the municipality and compiling full-fledged tourist guides. To some extent, the map can also be used by the monument protection service for the purposes of monitoring these objects.

KEYWORDS: historical cartography, historical and religious monument, database, historical and geographical map

ВВЕДЕНИЕ

Среди направлений современной картографии одно из важных мест занимает историческая картография. Это научная дисциплина, основной задачей которой является создание карт и атласов исторического содержания и разработка соответствующих методов.

По Александру Асланикашвили, предметом исследования картографии является специфическое пространство предметов и событий объективной действительности и его временная изменчивость. Конкретное пространство определяется как порядок взаимного

¹ Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, 3, Chavchavadze ave., Tbilisi, 0179, Georgia,
e-mail: tengiz.gordeziani@tsu.ge

² Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, 3, Chavchavadze ave., Tbilisi, 0179, Georgia,
e-mail: salomesalo13@gmail.com

расположения объектов и событий действительности как относительно друг друга, так и относительно пространственной системы (геоидной координатной сетки) [Асланикашвили, 1974]. По этой причине становится возможным сформулировать определение предмета исследования исторической картографии: специфическое пространство исторических фактов и процессов действительности и его временная изменчивость, которая непосредственно связана с порядком взаимной последовательности этих фактов и процессов.

Развитие картографического метода научного исследования в науках исторического цикла (история Грузии, этнология, археология) привело к использованию исторических карт и других видов историко-картографических изображений в статьях, монографиях, учебниках исторического содержания.

Историческая картография существует в виде целого арсенала исторических карт и атласов. Это направление не может обойти стороной такое растущее направление картографии, как атласная картография. С этой точки зрения в Грузии большое внимание уделяется геоинформационному картографированию историко-религиозных памятников.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Грузия — богатая страна со своим историческим и культурным наследием. Историко-религиозные памятники составляют важную часть богатых туристических ресурсов Грузии. Мы наблюдаем растущее развитие туризма в Грузии. Картография историко-религиозных памятников разных регионов и муниципалитетов страны считается очень актуальным направлением для страны. Карты этой тематики являются своего рода первоисточником для создания туристических справочников и планирования новых перспективных туристических маршрутов.

Новизна исследования заключается в том, что подобные исследования и крупномасштабная картография проводились впервые на территории Карельского муниципалитета. Все расположенные здесь историко-религиозные памятники были детально изучены в полевых условиях.

В результате исследования впервые была составлена карта архитектурно-исторических и историко-религиозных памятников Карельского муниципального образования, чему предшествовало создание базы данных такого содержания. Созданный картографо-геоинформационный продукт является визитной карточкой Карельского муниципалитета для будущих посетителей.

Исходя из приведенного выше определения общей картографии и исторической картографии, объектом исследования представленной статьи является муниципалитет Карели, а предметом — историко-религиозные памятники, имеющиеся в изобилии на территории этого муниципалитета. В процессе исследования использовались литературные, картографические и религиозно-культурные источники.

Площадь территории Карельского муниципалитета составляет 1 094 км². Он примерно в 2,7 раза меньше крупнейшего муниципалитета Грузии — Местии и является вторым по величине среди муниципалитетов Шида Картли после муниципалитета Гори.

По территориальному устройству Грузии муниципалитет Карели административно входит в состав области Шида Картли (административный центр — Карели). На территории Карельского муниципалитета находится 1 город — Карели, 2 поселка (Агара, Корниси), 23 сельских общины (Абиси, Авлеви, Ахалсофели, Бебниси, Брети, Бредза, Гиганти, Двани, Дирби, Земо Хедурети, Чехери, Кехийвари, Мохис, Руис, Урбанис, Пца, Знаури, Авневи, Балта, Дзвилети, Корнис, Тереван, Тигва) и 165 сел [Кекелия и др., 2004; Национальный атлас Грузии, 2012].

Географически большая часть всей территории муниципалитета расположена на равнине Шида Картли [География Грузии, 2000]. Граничит с муниципалитетами Ява на

севере, Боржоми на юге, Хашури на западе и Гори на востоке [Национальный атлас Грузии, 2012].

Наивысшая точка Карельского муниципалитета — гора Муркневи (координаты: $X = 4873215.828$; $Y = 5130624.800$), высота 2 342 м н. у. м. Она расположена в южной части муниципалитета, на Гвиргвинском хребте, который является северо-западной ветвью Триалетского хребта. Самая низкая точка муниципалитета расположена на р. Мтквари — долина к востоку от деревни Урбниси на высоте 591 м н. у. м. (координаты: $X = 4901864.807$; $Y = 5161282.183$). Крайняя северная точка Карельского района находится на Лихском хребте, м. Рустави, на высоте 1 936 м н. у. м. (координаты: $X = 4876782.541$; $Y = 5212380.397$). Крайняя южная точка находится на Триалетском хребте, в 1 км от Муркневи, на высоте 2 336 м н. у. м., в юго-восточной части (координаты: $X = 4874721.130$; $Y = 5130119.226$). Крайняя западная точка находится на Лихском хребте, м. Босели, высота 1 182,7 м н. у. м. (координаты: $X = 4853323.241$; $Y = 5192407.641$), а крайняя восточная точка — на Руис Сер, в 200 м от восточной части Горийского тоннеля скоростной магистрали, на высоте 777 м н. у. м. (координаты: $X = 4904138.936$; $Y = 5162631.835$).

По данным епархий Грузинской православной церкви, муниципалитет Карели относится к епархии Руис-Урбнис¹.

Исходя из представленных выше определений общей картографии и исторической картографии, объектом исследования и картографирования в данной статье являются историко-религиозные памятники Карельского муниципалитета. В процессе исследования использовались литературные, картографические и религиозные источники^{2,3}.

Процессу картографирования предшествовала полевая экспедиция в район исследований с целью получения фактического материала. Следующим шагом была классификация материала и создание базы данных, в которую вносились следующие характеристики историко-религиозных памятников изучаемой территории: название памятника, прихода, абсолютная высота, географические координаты, удаленность от городского центра, название населенного пункта, епархия, дата основания, характер подъездной дороги, периодичность функционирования (обслуживания) памятника, физическое состояние памятника, близлежащие населенные пункты, окружающий ландшафт (растительность, рельеф, геодинамические процессы), архитектурный стиль, функциональное назначение (культовый или исторический) [Лаошвили, 2021].

Исследование показало, что Карельский муниципалитет является одним из самых богатых муниципалитетов Грузии с исторической и религиозной точки зрения. Его историко-религиозные памятники могут привлечь большое количество посетителей⁴. Ниже представлена информация из базы данных.

Историко-религиозные памятники г. Карели

Город **Карели** расположен в самом сердце Восточной Грузии, на правом берегу р. Мтквари на высоте 600–700 м н. у. м. В центре Карели находится Троицкая церковь, построенная в XXI в. и представляющая собой крестово-купольное сооружение. Мы также находим в Карели недавно построенный храм того же века, названный в честь Георгия Мтацминдели⁵. Церковь Богородицы расположена в северной части города. Согласно

¹ Атлас епархии Грузии. Фондовые материалы, 2018 (на груз. яз.)

² Перспективы Карели. Фондовые материалы, 2020 (на груз. яз.)

³ Топографические карты, м-бы: 1: 50 000 и 1: 200 000. Выпуск 2017–2018 (на груз. яз.)

⁴ Портал Национального агентства культурного наследия Грузии. Электронный ресурс: <https://memkvidreoba.gov.ge/> (дата обращения 12.10.2024)

⁵ Афонский святой грузинского происхождения, писатель, переводчик, филолог, церковно-политический деятель XI в., отстаивал автокефальность Грузинской православной церкви (*прим. ред.*)

надписи, она была построена в 1850 г. по приказу Фанаскертеля-Цицишвили, сына Эстатиса. Церковь восстановлена.

Село **Абано**. Археологические и архитектурные памятники находятся на стороне села, расположенной на левом берегу р. Фроне. Они относятся к эпохе ранней и поздней бронзы. Поселения выявлены на холме Цихиани, там есть также Св. Георгиевская и Св. Морская церкви.

Село **Ткемлована**. Оно расположено в южной части Карельского муниципалитета, по обеим сторонам р. Ткемлована-Цкаро, на высоте 1 100–1 200 м н. у. м. Комплекс Гугам расположен на высокой горе, в 3 км к западу от села. Комплекс включает в себя пять церквей и постройки различного назначения. Все пять церквей зального типа. Они относятся к XIII в.

Село **Мухилети**. Оно расположено на высоте 1 100–1 500 м н. у. м. Комплекс Церкви Богородицы расположен в центре села. Он относится к эпохе развитого феодализма. На правом берегу р. Сатибе, в с. Сатердзе, расположенном на высоте 900–1 400 м н. у. м., находится зальная церковь. Она названа в честь св. Георгия, расположена на высоте 1 220 м н. у. м. и построена в XIII в. В настоящее время церковь повреждена. К северу от с. Сатердзе находится с. Цихисгверди, оно расположено на левом берегу р. Сатибе.

В селе **Цихисгверди** находится комплекс оборонительных сооружений. Его называют «замком крови». Относится к феодальной эпохе. Замковый зал включает в себя ряд жилых построек, а также башню и вал.

Село **Элбакиантқари** расположено к северо-юго-востоку от с. Цихессиде, расположено по обеим сторонам р. Дзама. В селе сохранилось пять церквей. Церковь Иоанна Крестителя Элбакиани расположена в 5 км к югу от села, следом за Ортубнисцкали, по склону горы на высоте 900 м н. у. м. Она относится к XVIII–XIX вв. Храм представляет собой зал. Вторая церковь названа в честь Спаса, она стоит на южной стороне села, на правом берегу реки. Она относится к временам развитого феодализма. Третья церковь, церковь Богородицы Эльбакиантқари, стоит в центре села, относится к позднефеодальным временам. Храм представляет собой зал. Свято-Георгиевская церковь расположена в 1 км южнее села, в долине р. Дзама, на краю обрыва, на высоте 1 200 м н. у. м. В Эльбакиантқари также есть церковь св. Шио Мгвимского¹, построенная на территории Саркинетского мужского монастыря, вырубленная в скале, не имеющая аналогов. На территории упомянутого монастыря есть церковь Святителя Николая.

Мзоврети, бывший Зорети, расположен в долине р. Дзама, в 12 км к югу от Карели. Деревня была заселена с позднего бронзового века. Здесь был древний город Згудери. Мзоврети (Мдзоврети) — замок-зал, монастырь и монастырский комплекс расположен в с. Ортубани, в долине р. Дзама, недалеко от монастыря Кинцвиси. В настоящее время комплекс отреставрирован, на территории действуют 3 храма. В состав комплекса входят: церковь, колокольня, замковый зал.

Саркинский монастырский комплекс Святого Георгия расположен в 0,5 км от села **Згудери**. Он расположен на высоте 850 м н. у. м. Главный храм комплекса крестово-купольный. Он был построен в XVII в. В настоящее время действует. Монастырь несколько раз реставрировался. Он восходит к позднему бронзовому и раннему железному векам.

Село **Ортубани** расположено в долине р. Дзама, на высоте 850–1 200 м н. у. м. Здесь расположен комплекс Ортубанского Рождественского монастыря. Он является памятником

¹ Святой Шио (Симеон) Мгвимский (Мгвимели) — один из наиболее почитаемых святых Грузинской православной церкви, живший в VI в., основатель монашества в Грузии, чудотворец (*прим. ред.*)

позднефеодальной эпохи, относящимся к XVI–XVII вв., и включает в себя: церковь Ортубанской Божией Матери, колокольню, терем, стену и жилой дом.

В селах **Окросопели, Сукити, Ведреба, Ткемала, Трехви, Хеоба, Чандреби, Земо Хведурети, Кода, Авлеви** находятся поселения позднефеодальной эпохи, в селах **Тахтисдири и Церониси** находятся поселения, относящиеся к феодальной эпохе. В селе **Кнолеви** выявлены поселения эпохи поздней бронзы и раннего железного века. В селе **Тамарашени**, где находится церковь XVIII–XIX вв., выявлено поселение древней эпохи. В селе **Гогети** есть церковь XVIII–XIX вв. В селе **Бредза** видны также два поселения феодальной эпохи. В селах **Мохиси и Пца** находятся две церкви; в с. Пца выявлено поселение позднефеодальной эпохи и башня Пцы 1799–1800 гг. В селах **Земо Дзагине** и **Кехиджвари** есть церкви зального типа. Все храмы в основном построены в X, XI, XIII вв., большинство из них повреждены. К югу от с. Земо Дзагине находится село **Тигва**. Здесь сохранился крестово-купольный храм Богородицы. Храм был построен в 1152 г.; в настоящее время сильно поврежден. Село **Санбели** расположено на высоте 600–800 м н. у. м., на левом берегу р. Дзама. В селе сохранилась крестово-купольная церковь святого Георгия на высоте 700 м н. у. м.

В селе **Авневи**, сохранился ряд комплексов. Церковь Богородицы расположена на высоте 860 м н. у. м. Здесь сохранились остатки Авневской крепости. В селе также были обнаружены две разваленные церкви.

Село **Двани** находится южнее с. Авневи. В селе, на высоте 640 м н. у. м. находится крестово-купольная церковь святого Георгия. Храм был построен в VI в. и поврежден. В селе выявлены археологические памятники и ряд поселений. Раскопано 6 поселений разного времени и эпох, преимущественно феодального времени.

Кинцвиси, резиденция Гуго, стоит в деревне, в долине р. Дзама, на возвышенном месте. Она относится к XVII в., повреждена. Комплекс Кинцвиси расположен в 2–3 км к востоку от села, в долине. Комплекс включает в себя церкви святого Николая, Богородицы и церквушки, стены, колокольни. Комплекс Кинцвиси отреставрирован, в настоящее время еще ведутся реставрационные работы. Он построен из кирпича, датируется XII–XIII вв. Церковь Богородицы — зальное сооружение, стоит на северо-востоке Свято-Николаевской церкви, возле берега р. Дзама, на склоне. Она датируется XII–XIII вв. Небольшая церковь стоит на западе церкви святого Николая у стены. Она была построена в позднефеодальный период, является церковью зального типа. Рядом с комплексом Кинцвиси находится мужской монастырь имени Благоразумного разбойника, строительство которого началось в 2011 г., в виде башни, в котором в настоящее время находится храм. На территории монастыря находятся два заново построенных храма, названных в честь Благовещения Богородицы и Спиридона Тримифунтского¹, строительство которых началось в 2014 г.

Замковый комплекс **Самцвериси** расположен на возвышенном месте на западе, рядом с селом. Он относится к феодальной эпохе. В комплекс входят: большая башня, церковь, вал, дворец и фрагменты различных построек. Общая площадь составляет около 2 000 м². На валу есть башня XVI–XVIII вв. В комплексе есть церковь зального типа XVII в., а также дворец, который несколько раз перестраивался. Купольный собор Самцвериси в честь святого Георгия относится к вольному крестовому типу. Он расположен на левом берегу р. Дзама и датируется 1-й половиной VI в. Поврежден землетрясением 8 мая 1940 г. Развалились купол, камера и стены. Реставрационные работы проводились в 1950–1952 гг.

¹ Тримифунтели — груз. (прим. ред.)

Руиси, село — памятник истории, расположено в 5 км от Карели, на шоссе Гори-Хашури. Здесь была большая библиотека, где хранилось множество рукописей, но самая важная из них — Евангелие XI в. Памятник архитектуры церковь Квирацховели стоит на севере села, у кладбища. Она относится к XVIII–XIX вв., является церковью зального типа. В северной части села находится церковь Квирикецминда, относящаяся к позднефеодальному периоду. В направлении к югу на окраине села расположена Церковь Богородицы. Она восходит к периоду позднего феодализма. Комплекс собора Богородицы находится в центре села. В комплекс входят церковь, башня, колокольня и вал. Строительство Урбаниси, наряду с другими городами Картли, по поэме «Картлис цховреба» приписывается сыну Мцхетоса Уплосу. Урбаниси упоминается в связи с деятельностью проповедницы христианской религии св. Нины. Нина (Нино¹) пробыла здесь месяц, а после этого последовала за купцами, идущими в Мцхету. На значение Урбаниси в более раннее феодальное время указывает учреждение здесь епископства и строительство большого христианского храма на рубеже V–VI вв., а чуть позже — большой стены городской аллеи. В 1104 г. Давид IV Строитель провел церковное собрание в Руиси. Город был крупнейшим культурным и просветительным центром. Важное значение имеет Евангелие, переписанное в X в. Иоанном Татанели. Восточную и центральную часть Накалакари Урбаниси занимает нынешнее с. Урбаниси. Первые археологические раскопки были проведены в 1893 г. В 50-х гг. XX в. под руководством Н. Бердзенишвили систематически проводились археологические работы. В Накалакари обнаружены захоронения эпохи поздней бронзы. Также идентифицируются: стена, акведуки, сельскохозяйственные водные каналы, базилика — Сиони Урбаниси (конец V–VI вв.), колокольня (XVIII в.), баня (III в.), погреб (VI–VII вв.) и др. Урбанисский Сиони стоит в восточной части Накалакари.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате анализа материалов, полученных в полевых условиях, архитектурно-исторические и культурно-религиозные памятники, выявленные на территории Карельского муниципалитета, были классифицированы по следующим признакам: название, местонахождение, тип и архитектурные особенности, функциональное назначение, физическое состояние, возраст памятника (табл. 1).

После этого были нанесены на карту архитектурно-исторические и историко-религиозные памятники исследуемого муниципалитета в м-бе 1: 200 000 (рис. 1). В качестве общей географической основы использовалась карта рельефа Карельского муниципалитета. Картографическая основа до отображения специального содержания получила вид карты Карельского муниципалитета с рельефной основой. Это облегчает получение информации о гипсометрическом размещении памятников. Система изобразительных средств была разработана для трех видов картографического содержания:

- 1) религиозные памятники (церкви, монастыри и соборы);
- 2) крепости;
- 3) руины и городища.

¹ Святая равноапостольная Нина (Нино в грузинском произношении и написании) — кападокийская дева, просветительница Грузии христианской религией, получившая от Богородицы крест из виноградной лозы (*прим. ред.*)

Табл. 1. Классификация архитектурно-исторических и культурно-религиозных памятников Карельского муниципалитета
 Table 1. Classification of architectural-historical and cultural-religious monuments of the Karelian municipality

№	Название памятника	Тип и архитектурные особенности памятника	Функциональное назначение памятника	Физическое состояние памятника	Возраст памятника	Местонахождение памятника
1	Церковь Самеба	Крест куполообразный	Православный, круглогодичный	Идеальный	XXI в.	Город Карели
2	Собор Георгия Мтацминдели	Крест куполообразный	Православный, круглогодичный	Идеальный	XX в.	
3	Церковь Богородицы	Крест куполообразный	Православный, круглогодичный	Реставрированный	XIX в.	
4	Археологические и архитектурные памятники				Бронзовый век	Село Абано
5	Церковь Святого Георгия	Базилика	Православный, сезонный	Средний	Бронзовый век	
6	Церковь в честь Святой Марине	Базилика	Православный, сезонный	Средний	Бронзовый век	
7	Комплекс Гугам (5 церквей)	Зального типа	Православный, сезонный	Средний	XIII в.	Село Ткемлована
8	Комплекс церкви Девы Марии	Базилика	Православный, сезонный	Средний	Развитая феодальная эпоха	Село Мухилети
9	Церковь Святого Георгия	Зального типа	Православный, сезонный	Поврежденный	XIII в.	Село Сатердзе
10	Комплекс зданий	Зального типа, башня, Стена	Оборонительное сооружение	Поврежденный	Феодальная эпоха	Село Цихисгверди
11	Церковь Иоанна Крестителя	Зального типа	Православный, сезонный	Средний	XVIII–XIX вв.	Село Элбакиантқари
12	Церковь Спасителя	Зального типа	Православный, сезонный	Средний	Развитая феодальная эпоха	
13	Церковь Девы Марии	Зального типа	Православный, сезонный	Средний	Поздний феодальный век	
14	Церковь Святого Георгия	Зального типа	Православный, круглогодичный	В хорошем состоянии	Развитая феодальная эпоха	

15	Церковь в честь Шио Мгвимели (Шио Мгвимского)	Зального типа	Православный, круглогодичный	В хорошем состоянии	Развитая феодальная эпоха	
16	Монастырский комплекс Мзоврети (3 храма)	Зального типа	Православный, круглогодичный	Обновленный	Бронзовый век	Село Ортубани
17	Монастырский комплекс Рождества Богородицы	Крест куполообразный	Православный, круглогодичный	В хорошем состоянии	XVI–XVII вв.	
18	Монастырский комплекс Святого Георгия Сарки	Крест куполообразный	Православный, круглогодичный	Идеальный	XVI–XVII вв.	Село Згудери
19	Поселения				Поздний феодальный век	Села: Окросопели, Сукиги, Ведреба, Ткемала, Трехви, Хеоба, Чандреби, Земо Хведжурети, Кода, Авлеви, Тахтидзири, Церониси
20	Поселения				Поздний бронзовый и ранний железный век	Село Кнолеви
21	Клады				Древние времена	Село Тамарашени
22	Церковь	Базилика	Православный, сезонный	Средний	XVIII–XIX вв.	
23	Церковь	Базилика	Православный, сезонный	Средний	XVIII–XIX вв.	Село Гогети
24	2 поселения				Феодальная эпоха	Село Бредза
25	Церковь	Базилика	Православный, сезонный	Средний	XVIII в.	Село Мохиси
26	Церковь	Базилика	Православный, сезонный	Средний	XVIII в.	Село Пца
27	Церковь	Базилика	Православный, сезонный	Поврежденный	X–XI вв.	Село Земо Дзагина
28	Церковь	Базилика	Православный, сезонный	Поврежденный	XII–XIII вв.	Село Кехиджвари
29	Церковь Девы Марии	Крест куполообразный	Православный, сезонный	Сильно поврежденный	XII в.	Село Тигва
30	Церковь Святого Георгия	Крест куполообразный	Православный, сезонный	Поврежденный	XIII в.	Село Санебели
31	Замковый зал, 2 церкви				Феодальная эпоха	Село Авневи

32	Церковь Святого Георгия	Крест куполообразный	Православный, сезонный	Поврежденный	VI в.	Село Двани
33	Археологические участки поселения				Феодальная эпоха	
34	Сиденье Гуго	Базилика	Православный, сезонный	Поврежденный	XVII в.	Село Кинцвиси
35	Комплекс Кинцвиси (Святителя Николая, Богородицы и малые церкви, валы, колокольня)	Крест куполообразный Зального типа	Православный, круглогодичный	Реставрированный	XII–XIII вв.	
36	Мужской монастырь в честь Благоумного разбойника	Крест куполообразный	Православный, круглогодичный	Недавно построенный	XXI в.	
37	Церковь Благовещения Пресвятой Богородицы	Крест куполообразный	Православный, круглогодичный	Недавно построенный	XXI в.	Село Кинцвиси
38	Церковь в честь св. Спиридона Тримифунтского (Тримифунтели)	Крест куполообразный	Православный, круглогодичный	Недавно построенный	XXI в.	
39	Замковый комплекс Самцвериси (большая башня, церковь, вал, дворец и фрагменты различных построек)	Крест куполообразный Зального типа	Православный, круглогодичный	Реставрированный, несколько раз реконструированный	XVI–XVIII вв.	
40	Георгиевский купольный храм Самчикриси, Святого Георгия	Крест куполообразный Крестного типа	Православный, круглогодичный	Реставрированный	I половина VI в.	
41	Церковь Квирацховели	Базилика Зального типа	Православный, сезонный	В хорошем состоянии	XVIII–XIX вв.	Село Руиси
42	Церковь Квирикецминда	Базилика	Православный, сезонный	Средний	Поздний феодальный век	
43	Церковь Квирикецминда	Крест куполообразный	Православный, сезонный	Средний	Поздний феодальный век	
44	Церковь Богородицы	Крест куполообразный	Православный, сезонный	Средний	Поздний феодальный век	
45	Великий христианский собор — Урбнисский Сиони	Крест куполообразный	Православный, круглогодичный	Средний	V–VI вв.	Село Урбниси

КАРЕЛЬСКИЙ МУНИЦИПАЛИТЕТ

ИСТОРИКО-РЕЛИГИОЗНЫЕ ПАМЯТНИКИ



Рис. 1 Карта историко-религиозных памятников Карельского муниципалитета
 Fig. 1. Map of historical and religious monuments of the Karelian municipality

ВЫВОДЫ

Анализ карты показал нам следующее:

1. Карельский муниципалитет, исходя из его площади, является самым богатым историко-религиозными памятниками муниципалитетом в Грузии; памятники располагаются почти на всех гипсометрических уровнях.
2. Памятникам уделяется значительное внимание со стороны государства, большинство из них надежно отреставрированы.
3. По типу памятника и архитектурным особенностям на территории муниципалитета преобладают базиликанские и крестово-купольные религиозные памятники.
4. На территории муниципалитета преобладают сезонно действующие религиозные памятники.
5. Существует определенная связь между культурным наследием и природным ландшафтом. Все это позволяет в будущем выделить культурные ландшафты на территории Карельского муниципалитета и рекомендовать места расположения монастырских комплексов для учета соответствующим международным организациям.
6. Как видно из карты, большинство религиозных памятников расположено в гипсометрическом диапазоне 600–1 000 м, а наименьшее количество памятников находится в гипсометрическом диапазоне выше 1 400 м.
7. Особенным обилием архитектурных и религиозных памятников отличаются следующие эрозионно-денудационные ландшафты:
 - а) среднегорные с буковыми и дубовыми лесами, лесозамещающей луговой и лесостарниковой растительностью;
 - б) среднегорные с буковыми и редкими сосновыми (кедровыми) лесами;
 - в) среднегорные с буково-хвойными и редко встречающимися сосновыми (кедровыми) лесами;
 - г) высокогорные с широколиственными (дубовыми) лесами.

Исследование архитектурно-исторических и историко-религиозных памятников Карельского муниципалитета и конечный результат этого исследования — карта историко-религиозных памятников Карельского муниципалитета могут быть с успехом использованы для планирования новых туристических маршрутов на территории муниципалитета и составления полноценных туристических путеводителей. В какой-то степени карта также может использоваться службой охраны памятников для целей мониторинга памятников.

На основе проведенных полевых и камеральных исследований, классификации памятников и составленной карты можно планировать новые туристические маршруты на территории Карельского муниципалитета, что увеличит количество как иностранных, так и местных посетителей исторических и религиозных достопримечательностей муниципалитета.

Результаты исследования сами представляют собой своеобразный путеводитель по местным и центральным туристско-рекреационным ресурсам.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке Национального научного фонда имени Шота Руставели, проект № MR-21-679, который предусматривал написание и защиту магистерской работы перед комиссией.

Авторы выражают благодарность Тедо Горгодзе, доктору географических наук, консультанту магистерской работы.

Авторы также благодарны мэрии Карельского муниципалитета, от которой они получили необходимые материалы для полноценного выполнения работы.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the Shota Rustaveli National Science Foundation, project No. MR-21-679, which included writing and defending a master's thesis before a committee.

The authors would like to thank Tedo Gorgodze, PhD in Geographical Sciences, who was a consultant for the master's thesis.

The authors would also like to thank the Kareli Municipality, from which she received the necessary materials to fully complete the work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Асланикашвили А. Ф. Метакартография. Основные проблемы. Тбилиси: Мецниереба, 1974. 125 с.

География Грузии (физическая география). Тбилиси, 2000. 332 с. (на грузинском языке).

Кекелия Д. И. Территория Грузии и населенные пункты. Тбилиси: Интеллект, 2004. 201 с. (на грузинском языке).

Лаошвили З. Д. Географические информационные системы. Тбилиси: Клио, 2021. 375 с. (на грузинском языке).

Национальный атлас Грузии. Тбилиси: Картография, 2012. 146 с. (на грузинском языке).

REFERENCES

Aslanikashvili A. F. Metacartography: Main Problems. Tbilisi: Metsniereba, 1974. 125 p. (in Russian).

Geography of Georgia (physical geography). Tbilisi: 2000. 332 p. (in Georgian).

Kekeliya D. I. Territory of Georgia and Populated Areas. Tbilisi: Intellect, 2004. 201 p. (in Georgian).

Laoshvili Z. D. Geographic information systems. Tbilisi: Klio, 2021. 375 p. (in Georgian).

National Atlas of Georgia. Tbilisi: Kartografiya (Cartography), 2012. 146 p. (in Georgian).

А. В. Кочетова¹, Д. А. Игнатенко², И. Е. Сидорина³

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ МЕСТНОСТИ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДОТОКА

АННОТАЦИЯ

Глобальные цифровые модели местности (ЦММ) и рельефа (ЦМР) среднего пространственного разрешения (30 м) традиционно используются для извлечения векторной гидрографической основы на большие территории. В статье рассмотрена возможность выделения водотока инструментами геоинформационных систем применительно к региональной цифровой модели местности ArcticDEM высокого (2 и 10 м) и среднего (32 м) пространственного разрешения для оценки корректности и целесообразности такого подхода в моделировании гидрографии. Поскольку алгоритм выделения водотока зависит от рельефа прилегающих территорий, для исследования выбраны три объекта — р. Северная Двина, р. Мойеро и р. Мома, протекающие в различных физико-географических условиях. Для валидации результатов выделения водотоков по ЦММ и ЦМР построены их эталонные объекты. Рассмотрен фактор производительности персонального компьютера при обработке данных высокого пространственного разрешения. Выявленная зависимость времени расчета промежуточных слоев для выделения водотока от пространственного разрешения цифровой модели местности предоставляет возможность оценить предполагаемую нагрузку на конкретный персональный компьютер при проведении схожих исследований. Установлено, что выделение водотока по моделям высокого пространственного разрешения не может гарантировать увеличение корректности векторной гидрографической основы. На примере участка р. Северной Двины по ЦММ и ЦМР построены продольные профили рельефа местности, которые позволяют судить о качестве исходных данных перед использованием алгоритма выделения водотока. По продольным профилям можно идентифицировать артефакты моделей в местах нехарактерно больших перепадов высот. Эти же участки будут наиболее некорректными в результирующей векторной гидрографической основе, а значит, в прикладных географических исследованиях им стоит уделять повышенное внимание.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: векторная гидрографическая основа, моделирование гидрографических объектов, ArcticDEM, производительность ПК при выделении гидрографии

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра картографии и геоинформатики, Университетская наб., д. 7-9, Санкт-Петербург, Россия, 199034,

e-mail: st110592@student.spbu.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра картографии и геоинформатики, Университетская наб., д. 7-9, Санкт-Петербург, Россия, 199034,

e-mail: st110672@student.spbu.ru

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра картографии и геоинформатики, Университетская наб., д. 7-9, 199034, Санкт-Петербург, Россия, 199034,

e-mail: i.sidorina@spbu.ru

Alisa V. Kochetova¹, Daria A. Ignatenko², Inessa E. Sidorina³

USE OF HIGH SPATIAL RESOLUTION DIGITAL SURFACE MODELS TO WATERLINE DELINEATION

ABSTRACT

Global digital surface (DSM) and elevation (DEM) models of medium spatial resolution (30 m) are traditionally used for extraction of vector hydrography for large areas. The article considers the possibility of waterline delineation by the tools of geographic information systems in relation to the regional digital surface model ArcticDEM of high (2 and 10 m) and medium (32 m) spatial resolution to assess the correctness and feasibility of this approach in hydrographic modeling. Since the algorithm of waterline delineation depends on the relief of the adjacent territories, three objects were selected for the study — the Northern Dvina River, the Moyero River and the Moma River, flowing in different geographical conditions. In order to validate the results of waterline delineation using DSM and DEM, their reference vector objects were created. Computer performance was considered in terms of processing high spatial resolution data. The revealed dependence of the calculation time of auxiliary layers on model's spatial resolution makes it possible to estimate the expected load on a particular personal computer when conducting similar studies. It has been established that the usage of high spatial resolution models for waterline delineation cannot guarantee an increase in the correctness of the resulting vector hydrography. On the example of the part of the Northern Dvina River, longitudinal profiles of the terrain were constructed using DSM and DEM, which allow us to judge the quality of the initial data before using the waterline delineation algorithm. The longitudinal profiles can be used to identify model artifacts in places of unusually high elevation differences. These same areas will be the most incorrect in the resulting vector hydrographic objects, which means that they should be given more attention when performing automated delineation and validating its results.

KEYWORDS: vector hydrographic networks, modeling of hydrographic, ArcticDEM, computer performance for hydrography delineation

ВВЕДЕНИЕ

Одной из общих проблем в области картографии, геоинформатики и дистанционного зондирования Земли является проблема получения корректных исходных данных. Векторная гидрографическая основа является важным элементом общегеографического и тематического картографирования. Ее используют для проведения гидрологических исследований и гидрографических расчетов, для пространственно-временного моделирования речных систем, в т. ч. для автоматизированного определения порядка водотоков сети и др.

Векторные гидрографические основы можно получить несколькими способами:

- с помощью оцифровки топографических карт и/или дешифрирования и оцифровки ДЗЗ;

¹ Saint-Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, 7-9, Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia, *e-mail: st110592@student.spbu.ru*

² Saint-Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, 7-9, Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia, *e-mail: st110672@student.spbu.ru*

³ Saint-Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, 7-9, Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia, *e-mail: i.sidorina@spbu.ru*

- используя векторные данные с электронных ресурсов (например, такие, как OSM, HydroSHEDS, Natural Earth, ВСЕГЕИ и др.);
- применяя автоматизированное выделение сети водотоков по цифровым моделям местности и рельефа;
- используя искусственный интеллект (методы машинного и глубокого обучения).

К модели векторной гидрографической сети, полученной одним из вышеперечисленных способов, предъявляются определенные требования по достоверности и соответствию объектов своему реальному положению в пространстве. Зачастую исследователи не уделяют должного внимания этапу оценки корректности полученных данных, что приводит к неверной интерпретации пространственной информации об объектах и явлениях.

Опыт гидрографического моделирования огромен. На эту тему написано множество научных статей, учебно-методических пособий, монографий и диссертаций. Быстрое развитие науки и техники, появление новых, современных, вычислительных геоинформационных технологий для пространственного анализа, совершенствование базы исходных данных ДЗЗ, увеличение ее качества — все это позволяет проводить исследования, о которых раньше нельзя было даже помыслить. Так, классический вариант извлечения векторной гидрографической основы из глобальных ЦММ уже не может обеспечить необходимую точность исследований¹. Часто в этом случае речь идет о недостаточном пространственном разрешении исходных данных. С течением времени в открытом доступе появляются и будут появляться более подробные данные о рельефе местности, которые являются малоисследованными для уже тривиальных задач и алгоритмов обработки. Одной из таких моделей, покрывающей значительные территории РФ, является региональная ЦММ арктических территорий высокого пространственного разрешения (2 м) ArcticDEM² — проект Национального агентства геопространственной разведки (National Geospatial-Intelligence Agency, NGA) и Национального научного фонда (National Science Foundation, NSF).

В российском научном сообществе опыт извлечения векторной гидрографической основы по ArcticDEM описан слабо. По гидрологической тематике опубликованы единичные работы, например, об определении морфометрических характеристик водосборов рек Арктической зоны РФ [Решин и др., 2020] или статьи, оценивающие статистические характеристики ранних версий модели ArcticDEM [Полякова и др., 2020].

Зарубежный опыт извлечения векторной гидрографической основы из ЦММ ArcticDEM описан главным образом в работе [Lu et al., 2020]. Предлагается методика выделения водотока, заключающаяся в совместном использовании данных космической съемки и ЦММ. Подробные данные ЦММ ArcticDEM дополняют конвертированные из раstra векторные гидрографические данные, полученные при помощи автоматизированного дешифрирования изображений Sentinel-2. В результате исследования была получена объединенная речная сеть Sentinel-ArcticDEM (SARN) 10 м пространственного разрешения на бассейн р. Котуй (РФ) площадью 12 000 км² и р. Колин площадью 10 000 км² (США). В работе взяты небольшие площади исследования, что не дает возможности оценки применимости предлагаемой методики на более крупных реках. А результирующая векторная гидрографическая основа соответствует не самому высокому пространственному разрешению.

¹ СТО ГГИ 52.08.48–2020 Выбор цифровой картографической основы для определения гидрографических характеристик

² ArcticDEM — Mosaics, Version 4.1. Электронный ресурс: <https://dataverse.harvard.edu/dataset.xhtml?PersistentId=doi:10.7910/DVN/3VDC4W> (дата обращения 27.03.2023)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для создания общегеографических и тематических карт современная картографическая наука использует методы геоинформационного картографирования. Выделяется два основных направления [Лурье, 2008]: создание аналитических карт по данным атрибутивных таблиц баз данных и создание тематических карт на основе методов пространственного моделирования. Тема настоящего исследования относится ко второму направлению и его методам.

Пространственное моделирование в ГИС основано на применении специальных инструментов геоинформационных систем к данным о рельефе территории для составления карт углов наклона, экспозиции и крутизны склонов, эрозионной сети и т. д., в т. ч. для выделения водотока. В работе использованы инструменты пространственного моделирования водотока, реализованные в геоинформационной системе ArcGIS¹ (ArcMap) в модуле Spatial Analyst – Hydrology. Схема выделения водотока приведена на рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм выделения водотока инструментами геоинформационных систем
Fig. 1. Algorithm of waterline delineation by tools of geographic information systems

Говоря о конкретных алгоритмах, существуют разные методы создания гидрологически корректной модели, расчета направления стока и суммарного стока [Энтин, 2019]. В ArcGIS инструмент заполнения локальных понижений (англ. Fill) использует алгоритм Дженсон-Доминго [Jenson, Domingue, 1988], в результате работы которого на месте локального понижения формируется горизонтальная поверхность путем увеличения высот его ячеек. Алгоритм расчета направления стока (англ. Flow Direction) по методу D8 (англ. Deterministic Eight-Neighbor) [O'Callaghan, Mark, 1984] для каждой ячейки определяет максимальный по модулю отрицательный уклон, представленный в виде линий, соединяющих центральную ячейку с восьмью соседними ее окружающими ячейками в соответствии с закодированными значениями направлений под углом 45°. Суммарный сток

¹ ESRI ArcGIS Desktop: Release 10.8 Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA

(Flow Accumulation) по методу D8 представляет собой растр, в котором каждая ячейка, находящаяся вниз по склону, принимает n-ое количество потоков. Для выделения водотоков по растру суммарного стока необходимо определить пороговое значение, представляющее собой размер элементарной водосборной ячейки, способной генерировать постоянный водоток. Затем выполняется классификация растра суммарного стока с заданным пороговым значением. К классифицируемому растру применяется инструмент идентификации водотока (Stream Link), который присваивает уникальные значения каждому отрезку. На окончательном этапе производится конвертирование растрового представления водотока в векторный формат.

Исследование проведено на примере северных рек России, поскольку цифровая модель местности ArcticDEM является региональной и охватывает арктические территории от 60° с. ш. Для оценки производительности и применения алгоритма выделения водотока использованы файлы мозаики ArcticDEM высокого пространственного разрешения (2 м) в виде листов размером 50 x 50 км в 32-битном формате GeoTIFF, а также версии с уменьшенным средним пространственным разрешением (10 и 32 м), доступные в виде листов размером 100 x 100 км.

Для сравнения также подобраны свободно распространяемые глобальные ЦММ и ЦМР, которые обычно используются для выделения водотока. В табл. 1 приведены основные сведения об используемых в настоящей работе моделях, а также их горизонтальная (англ. Circular Error, CE), вертикальная (англ. Linear Error, LE) точности и средняя квадратическая ошибка (англ. Root Mean Square Error, RMSE) по данным разработчиков. Отмечено, что не все из них проводят оценку точности и предоставляют такую информацию о своих моделях.

Рельеф территории играет решающую роль в формировании речных систем. От особенностей строения речных долин, их морфологических типов зависит корректность работы алгоритма выделения водотоков. Для исследования выбраны три разнородных участка, соответствующие генетическим классам равнинных и горных рек (табл. 2).

Для валидации результатов выделения водотоков по ЦММ и ЦМР по данным OpenStreetMap и космическим снимкам, находящихся в открытом доступе, построены эталонные модели исследуемых рек (рис. 2).

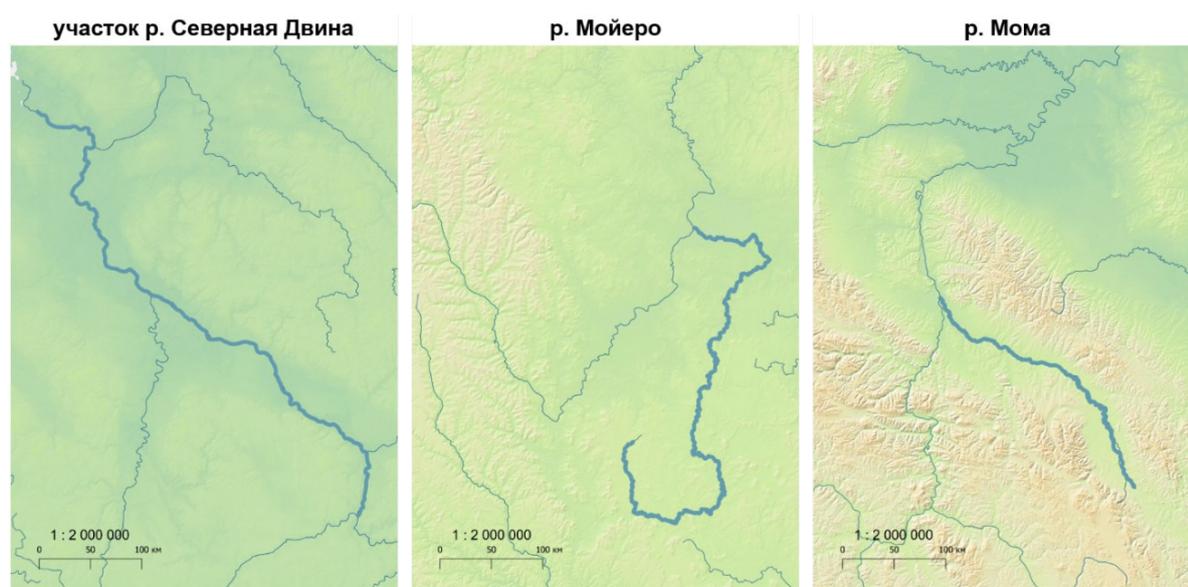


Рис. 2. Эталонные участки рек (визуализация векторных данных)
Fig. 2. Reference river sections (visualization of vector data)

Табл. 1. Цифровые модели местности и рельефа и их характеристики
 Table 1. Digital surface and elevation models and their characteristics

Набор данных	AW3D30 версия 3.2 (2022)	ArcticDEM версия 4.1 (2023)	GLO-30 версия (2021)	FABDEM версия 1.2 (2023)
Исходные данные для построения модели	Панхроматический прибор дистанционного зондирования для стереокартографирования (PRISM), оптический датчик на борту космического аппарата «ALOS».	Отдельные стереоскопические цифровые модели рельефа (ЦМР), полученные на основе пар спутниковых снимков Махаг субметрового пространственного разрешения (от 0,32 до 0,5 м), включая данные «WorldView-1», «WorldView-2», «WorldView-3» и «GeoEye-1»	Радарные данные «WorldDEM» с двух спутников «TerraSAR-X» и «TanDEM-X». Радиолокационная интерферометрия (InSAR), использующая бистатический режим «InSAR StripMap».	Использование методов машинного обучения для удаления зданий и растительности из цифровой модели рельефа «Copernicus Digital Elevation Model»
Разработчик	Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA), Япония	Национальное агентство геопространственной разведки; Национальный научный фонд, США	Европейское космическое агентство (ESA)	Компания «Fathom»; Бристольский университет, Великобритания
Покрытие	82° ю. ш. – 82° с. ш.	Выше 60° с. ш.	90° ю. ш. – 90° с. ш.	
Временной диапазон получения исходных данных	2006–2011	2007–2022	2011–2015	
Сенсор	Оптический	Оптический	Радарный (SAR X Band)	
Пространственное разрешение (м)	30	2, 10, 32	30	30
Абсолютная горизонтальная точность	–	Характеристики абсолютной горизонтальной и вертикальной точностей не были оценены ¹	CE90 — < 6 м	Характеристики абсолютной горизонтальной и вертикальной точностей не были оценены
Абсолютная вертикальная точность	LE90 — 5,37 м RMSE — < 3,28 м		LE90 — < 4 м RMSE — 1,68 м	
Относительная вертикальная точность	–		LE90 для уклонов меньше или равных 20 % — < 2 м; LE90 для уклонов >20 % — 4 м	

¹ Guides PGC DEM Products — ArcticDEM, REMA, and EarthDEM. Web resource: <https://www.pgc.umn.edu/guides/stereo-derived-elevation-models/pgc-dem-products-arcticdem-rema-and-earthdem/> (accessed 15.05.2024)

Табл. 2. Морфометрические характеристики рек
Table 2. Morphometric characteristics of rivers

Название реки	участок р. Северной Двины	р. Мойеро	р. Мома
Тип рельефа	Равнинный	Плоскогорный	Горный
Площадь бассейна (S), км ²	357 052	30 900	30 200
Длина (L), км	664	825	460
Высота истока (H_1), м	98	490	703
Высота устья (H_2), м	0	150	206
Падение (h), м $H_1 - H_2$	98	340	497
Уклон водотока (i), ‰ ($\frac{h}{L} * 100$)	13,7	41	108

Критическим моментом является процедура оценки точности, причем как исходного растрового слоя, так и векторной основы. В первом случае необходимо иметь эталонную поверхность, чтобы вычислить показатели точности, значения которой производителем ArcticDEM не оценены. Сложность заключается в том, что данные о координатах с геодезических пунктов для составления такой поверхности недоступны, а пространственное разрешение ArcticDEM настолько высоко, что нет возможности подобрать более подробные материалы о рельефе территории для сравнения. Во втором случае отсутствует система оценки как таковая. Часто оцениваемыми показателями являются длина реки и площадь водосбора [Пьянков, Шихов, 2017]. Однако фактически такая оценка не может учесть все особенности речных систем и формы их русел.

Поскольку алгоритм выделения водотока зависит от качества исходных данных и рельефа территории, для анализа корректности исходных данных используются продольные профили местности — графики, которые отражают изменения значений высот каждой ЦММ или ЦМР по длине реки от истока до устья. Условием проведения такого анализа является использование одной и той же векторной гидрографической модели водотока (эталонного объекта) для построения продольных профилей по разным источникам данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Учет производительности персонального компьютера при обработке данных высокого пространственного разрешения

При обработке данных высокого пространственного разрешения неизбежно возникают проблемы технического характера, связанные с фактической возможностью осуществления таких вычислений. Исследование производительности персонального компьютера проведено на примере системы с указанными характеристиками (табл. 3).

Установлено, что временные затраты на обработку зависят от нескольких факторов:

- во-первых, от количества файлов мозаики (листов), покрывающих необходимую территорию исследования, которые впоследствии объединяются в единую мозаику;
- во-вторых, от способа сохранения промежуточных слоев, т. е. если производить сохранение на локальной среде компьютера, а не во временные файлы, расчет будет производиться быстрее (к примеру, для одного листа высокого пространственного разрешения (2 м) суммарная разница вычислений промежуточных слоев при разных способах сохранения составляет около четырех минут);
- в-третьих, одновременная работа сторонних программ и выполнение процессов создают дополнительную нагрузку и приводят к возрастанию затрачиваемого на расчет промежуточных слоев времени.

Табл. 3. Системные характеристики персонального компьютера
Table 3. System characteristics of a personal computer

Название компонента	Параметры компонента
Видеоадаптер	Radeon RX 580 Series 8 Гб
Центральное процессорное устройство	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2640 v3 @ 2.60ГГц
Емкость оперативной памяти	16 Гб
Емкость жесткого диска	1 Тб
Емкость твердотельного накопителя	250 Гб
Тип системы	Windows 10, 64-разрядная операционная система, процессор x64

С учетом вышеперечисленных факторов были созданы условия максимальной производительности ПК. На вход подавались данные разного пространственного разрешения. На рис. 3 изображены результаты расчета некоторых промежуточных слоев для выделения водотока по одному листу ($50 \times 50 \text{ км}^2$) цифровой модели местности ArcticDEM различного пространственного разрешения.

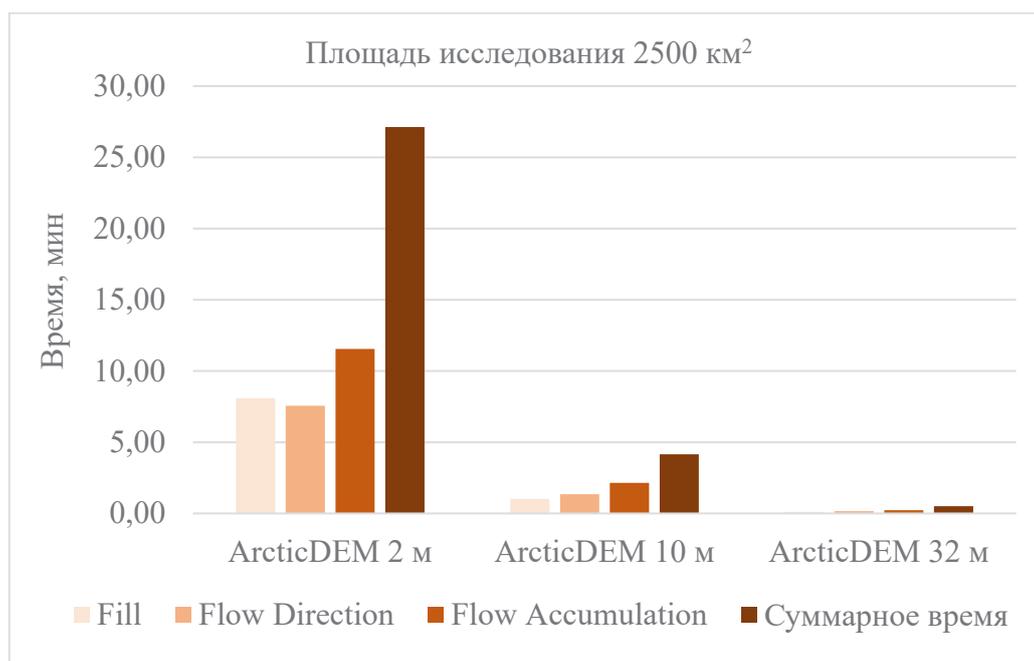


Рис. 3. Зависимость времени расчета промежуточных слоев для выделения водотока от пространственного разрешения ЦММ ArcticDEM
Fig. 3. Dependence of the calculation time of auxiliary layers on the spatial resolution of the ArcticDEM

Аналогичные расчеты проведены для участка р. Северной Двины (рис. 4). Площадь исследования составила $45\,000 \text{ км}^2$ или восемнадцать листов высокого пространственного разрешения (2 м) и девять листов среднего пространственного разрешения (10 и 32 м). Перед выполнением процедуры выделения водотока исходные листы были объединены в единую бесшовную мозаику.

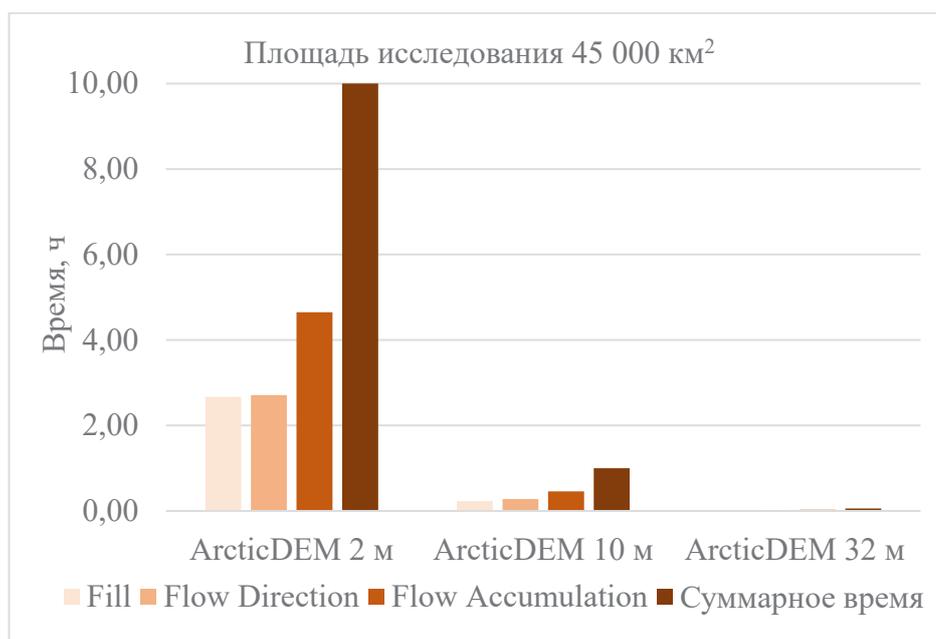


Рис. 4. Зависимость времени расчета промежуточных слоев для выделения водотока от пространственного разрешения ЦММ ArcticDEM на примере участка р. Северной Двины
 Fig. 4. Dependence of the calculation time of auxiliary layers on the spatial resolution of the ArcticDEM on the example of the part of the Northern Dvina River

Проведенные работы позволяют определить приблизительные временные затраты на обработку той или иной территории исследования в зависимости от ее площади, путем умножения времени, затрачиваемого на обработку одного листа на их суммарное количество по формуле (1):

$$T = t * n \quad (1),$$

где t — время, затрачиваемое на обработку одного листа мозаики,
 n — количество листов мозаики.

На основании этого рассчитаны предполагаемые значения времени, затрачиваемого на вычисление промежуточных слоев на примере участка р. Северная Двина. В табл. 4 приведено сравнение предполагаемых и фактических значений, а также разница между ними. Предполагаемое время в каждом случае оказывается меньше фактического, но все же может быть использовано для общей оценки производительности ПК при выделении водотока по полноценным файлам мозаики ЦММ ArcticDEM высокого пространственного разрешения (2 м). Также есть основания полагать, что при обработке цельной мозаики, состоящей из n -го количества листов, алгоритм выделения водотока работает иначе, нежели для одного листа. Вероятно, это связано с краевыми областями, поскольку при присоединении каждого нового листа ($n + 1$) краевые области становятся стыковыми и для них появляется такая же возможность расчета направления стока из центральной в восемь соседних ячеек, что приводит к увеличению нагрузки на ПК. В среднем, если судить по разнице суммарного времени из табл. 4, эта нагрузка выражается в дополнительных 8,4 мин ко времени обработки с добавлением каждого нового листа.

Табл. 4. Предполагаемые и фактические времязатраты для выделения водотока участка р. Северной Двины по бесшовным файлам мозаики ЦММ ArcticDEM высокого пространственного разрешения (2 м)

Table 4. Estimated and actual time required for waterline delineation of the part of the Northern Dvina River using seamless high spatial resolution (2 m) ArcticDEM mosaic files

Название слоя	$t_{\text{предполагаемое}}, \text{ч}$	$t_{\text{фактическое}}, \text{ч}$	$\Delta t, \text{ч}$
Fill	2,42	2,66	-0,24
Flow Direction	2,26	2,71	-0,45
Flow Accumulation	3,47	4,65	-1,18
Суммарное время	8,1	10,02	-1,92

В результате экспериментально было установлено, что для задачи выделения одного лишь участка главной реки (без притоков) системных характеристик среднестатистического персонального компьютера недостаточно. Такая же ситуация наблюдается с р. Мойеро, для обработки которой необходимо задействовать шестнадцать листов (40 000 км²) высокого пространственного разрешения. Извлечь водоток из файлов мозаики удалось лишь для р. Момы ввиду небольшой длины водотока, которая помещается в восьми листах (20 000 км²) высокого пространственного разрешения.

Упомянув другие ЦММ и ЦМР, используемые в настоящей работе, можно сделать вывод о том, что для выделения водотока они, как и ArcticDEM в среднем пространственном разрешении, не требуют высокой производительности ПК, даже при обработке больших по площади территорий.

Дополнительно рассматривалась возможность выделения водотока при помощи облачной платформы Google Earth Engine [Gorelick et al., 2017]. Такой подход представлялся рациональным при учете обработки данных такого объема. GEE сочетает в себе наборы открытых данных, а также алгоритмы и методы, которые можно использовать для их обработки посредством пользовательского интерфейса на языке программирования JavaScript через редактор программного кода или Python в другой среде разработки, к примеру, в Google Colab (Colaboratory). Однако при проведении исследования было выяснено, что GEE на настоящий момент не поддерживает операции с многоитерационными вычислениями. К таким вычислениям как раз относятся алгоритмы определения направления и суммарного стока, поэтому произвести выделение водотоков по ЦММ на этой платформе не представляется возможным.

Результаты выделения водотоков

На рис. 5 показаны участки, соответствующие максимальному отклонению водотоков, полученных по различным ЦММ и ЦМР, от эталонного объекта. Как можно заметить, для участка р. Северной Двины наиболее некорректные участки расположены хаотично по всему протяжению, а для р. Мойеро и р. Момы они находятся преимущественно в верхнем течении, т. е. все исследуемые ЦММ и ЦМР ошибочно выделяли водоток именно в этих местах. Верховья р. Мойеро являются заболоченными территориями, а на р. Моме в верхнем и среднем течении периодически возникают ледовые явления — наледи, кроме постоянной Большой Момской наледи. Два этих фактора отрицательно влияют на алгоритм выделения водотока независимо от типа рельефа прилегающих ландшафтов.

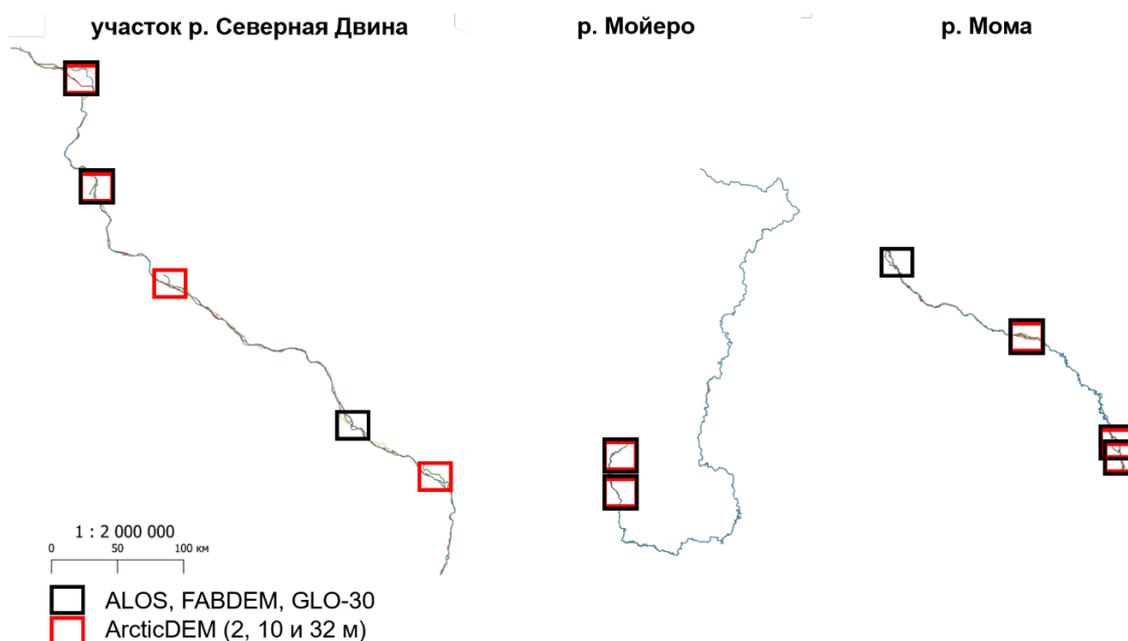


Рис. 5. Участки максимального отклонения водотоков от эталонного объекта
Fig. 5. Areas of maximum deviation of waterlines from the reference object

Результирующие модели водотоков не отличаются высокой точностью, наблюдаются множественные геометрические и топологические ошибки [Polidori, Hage, 2020], даже при выделении по ЦМР или по ЦММ высокого пространственного разрешения (на примере р. Момы). При бифуркации река разделяется на два рукава, соответственно, по ЦММ не всегда верно определен наиболее водный из них, который принимается за основное русло реки, причем второй рукав обычно не идентифицируется. Для всех моделей характерны ложные завороты, нереалистичные (угловатые) формы, смещение русла реки на сушу. Участок р. Северной Двины, смоделированный по ЦММ среднего пространственного разрешения ArcticDEM (10 и 32 м) и GLO-30 характеризуется нарушением целостности потока (невозможная топология). Это связано с тем, что уклон реки очень мал ввиду равнинного характера ее течения. Вероятно, в некоторых местах разница значений высот настолько мала, что алгоритм не может правильно определить направление стока. При визуальном осмотре для р. Мойеро и р. Момы наиболее некорректной выступает модель, полученная по ЦММ ALOS.

Неудовлетворительные результаты выделения водотока по ЦМР и ЦММ как высокого, так и среднего пространственного разрешения требуют необходимости проведения оценки точности исходного растрового слоя и полученной векторной гидрографической основы.

Оценка корректности исходных данных о рельефе и векторной гидрографической основы

Вычисление длин полученных моделей — непоказательная оценка при частичном отсутствии данных. Сравнение длины полученных объектов без учета нецельных моделей, а также моделей, которые не были извлечены вовсе, не позволит установить зависимости в оценке корректности выделения водотока.

В настоящей работе было проанализировано лишь три участка (эталонные объекты) и шесть вариантов ЦММ и ЦМР, что в совокупности представляет собой двадцать одну модель. Автоматизированный процесс выделения водотоков, визуальный анализ каждой

модели (визуальное программирование ModelBuilder), их сравнение между собой и представление результатов в виде картосхемы являются трудоемкими и времязатратными манипуляциями (рис. 6).

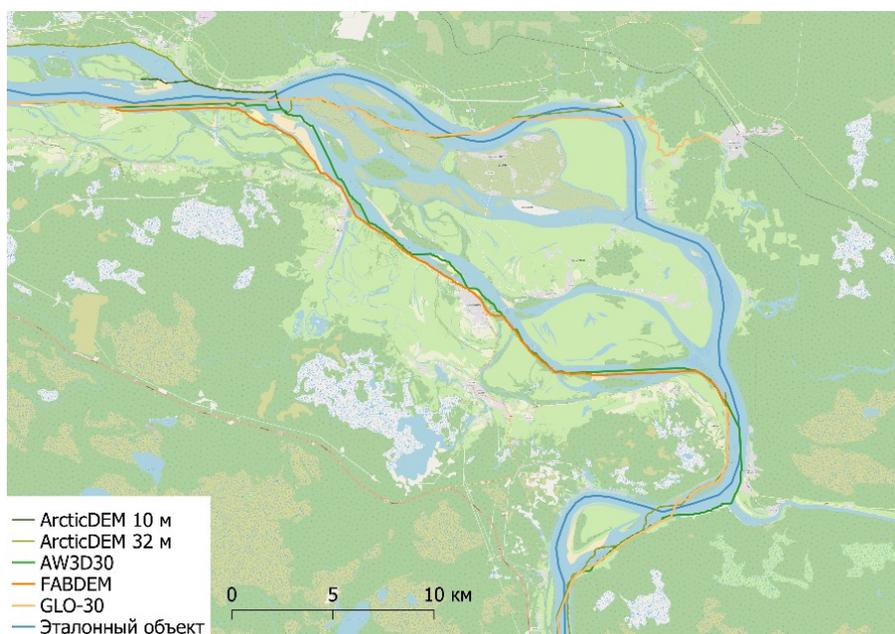


Рис. 6. Пример представления участка реки при визуальном анализе
Fig. 6. Example of river section representation in visual analysis

Продольные профили различных ЦММ и ЦМР соотнесены для выявления закономерностей в данных о высотах на примере эталонного участка р. Северной Двины, состоящего из 1 327 вершин (рис. 7). Векторные модели рек, полученных по разным ЦММ и ЦМР, не подходят для такого рода анализа, поскольку их вершины расположены в разных местах по длине реки.

Исходные данные ЦММ ALOS имеют большое количество артефактов. Алгоритм устранения замкнутых понижений, реализованный в ArcGIS, позволит устранить лишь отрицательные значения выбросов, а в местах положительных ложных значений будут формироваться предполагаемые некорректные участки результирующей векторной гидрографической основы, которые можно идентифицировать по продольному профилю. ЦМР FABDEM отличается от ЦММ GLO-30 лишь в некоторых местах, где наблюдается небольшое занижение выбросов.

Профили высот ArcticDEM практически идентичны (рис. 8), за исключением некоторых участков на модели 32 м, что логично, поскольку с уменьшением пространственного разрешения происходит ухудшение качества данных. Наблюдается проблема искусственно выровненных значений высот, которые занижены и не соответствуют реальным данным о рельефе территории, в отличие от ЦММ и ЦМР на рис. 6. Это также означает, что для ArcticDEM нет необходимости использовать инструмент устранения локальных понижений (Fill), поскольку отрицательные значения отсутствуют. Выбросы свидетельствуют об отсутствии данных в конкретном месте по ходу продольного профиля. Таким образом, не имея возможности выделить водотоки по ЦММ высокого пространственного разрешения ввиду ограничений производительности ПК, есть возможность оценить качество моделей среднего пространственного разрешения (10 и 32 м). Лучшие результаты выделения водотока показывает модель 10 м пространственного разрешения.



Рис. 7. Продольный профиль местности по исходным данным ALOS, GLO-30 и FABDEM
Fig. 7. Longitudinal profile of the terrain based on ALOS, GLO-30 and FABDEM data



Рис. 8. Продольный профиль местности по исходным данным ArcticDEM
Fig. 8. Longitudinal profile of the terrain based on the original ArcticDEM data

ВЫВОДЫ

Выделение водотоков с учетом рельефа местности по цифровой модели местности высокого пространственного разрешения ArcticDEM и сравнение моделей с другими данными о высотах позволяют сделать следующие выводы:

- описанные факторы, влияющие на производительность ПК и выявленная зависимость времени расчета промежуточных слоев для выделения водотока от пространственного разрешения ЦММ ArcticDEM позволяют оценить возможности конкретного ПК для осуществления подобных расчетов;
- экспериментально установлено, что вычислительные ресурсы среднестатистического ПК не позволяют обрабатывать данные такой подробности; вероятно, необходимо сотрудничать с ресурсными центрами;
- выделение водотока по ЦММ высокого пространственного разрешения не может гарантировать увеличение корректности моделируемого объекта (на примере р. Момы);
- рельеф территории определяет общую успешность работы алгоритма (чем он контрастнее, тем лучше работает алгоритм). Присутствие заболоченности и ледовых явлений на реках отрицательно влияют на работу алгоритма даже в горных и плоскогорных местностях;
- значение уклона водотока может выступать ориентиром общей успешности работы алгоритма при моделировании различных классов рек (на примере равнинной р. Северной Двины);
- построенные профили местности являются ценным инструментом оценки исходной модели высот, а также позволяют идентифицировать предполагаемые некорректные участки векторной гидрографической основы путем анализа артефактов в распределении значений высот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лурье И. К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков. М.: КДУ, 2008. 424 с.

Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б. Анализ возможности применения цифровых моделей рельефа ASTER GDEM v2 и ArcticDEM для исследований арктических территорий России. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2020. Т. 17. № 7. С. 117–127. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127.

Пьянков С. В., Шихов А. Н. Геоинформационное обеспечение моделирования гидрологических процессов и явлений. Пермь: ПГНИУ, 2017. 148 с.

Решин Н. А., Ковалева М. В., Гайдучова Е. В. Оценка морфометрических характеристик водосборов рек ГИС-системами на примере АЗРФ. Региональная информатика и информационная безопасность, 2020. № 9. С. 216–217.

Энтин А. Л. Методы повышения достоверности цифровых моделей рельефа для гидрологического моделирования и картографирования. Диссертация на соискание ... кандидата географических наук. М: МГУ имени М. В. Ломоносова, 2019. 106 с.

Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 2017. V. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.

Jenson S., Domingue J. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988. V. 54. No. 11. P. 1593–1600.

Lu X., Yang K., Lu Y., Gleason C., Smith L., Li M. Small Arctic rivers mapped from Sentinel-2 satellite imagery and ArcticDEM. *Journal of Hydrology*, 2020. V. 584. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124689.

O'Callaghan J., Mark D. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer vision, graphics, and image processing*, 1984. V. 208. No. 3. P. 323–344.

REFERENCES

Entin A. L. Methods to improve the reliability of digital elevation models for hydrological modeling and mapping. Dissertation for the ... of PhD in geography. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2019. 106 p. (in Russian).

Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017. V. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.

Jenson S., Domingue J. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988. V. 54. No. 11. P. 1593–1600.

Lu X., Yang K., Lu Y., Gleason C., Smith L., Li M. Small Arctic rivers mapped from Sentinel-2 satellite imagery and ArcticDEM. *Journal of Hydrology*, 2020. V. 584. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124689.

Lurie I. K. Geoinformation mapping. Methods of geoinformatics and digital processing of space images. Moscow: KDU, 2008. 424 p. (in Russian).

O'Callaghan J., Mark D. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer vision, graphics, and image processing*, 1984. V. 208. No. 3. P. 323–344.

Polyakova E. V., Kutinov Y. G., Mineev A. L., Chistova Z. B. Analysis of the possibility of application of digital elevation models ASTER GDEM v2 and ArcticDEM for studies of the Arctic territories of Russia. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2020. V. 17. No. 7. P. 117–127 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127.

Pyankov S. V., Shikhov A. N. Geoinformational support of modeling of hydrological processes and phenomena. Perm: Publishing House of Perm State University, 2017. 148 p. (in Russian).

Reshin N. A., Kovaleva M. V., Gaidukova E. V. Evolution of morphometric characteristics of river catchments by GIS-systems on the example of the Russian Arctic. *Regional Informatics and Information Security*, 2020. No. 9. P. 216–217 (in Russian).

УДК: 912.4

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-425-441

Т. В. Сукманова¹, Н. С. Белов²

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ИСТОРИЧЕСКИХ ЛАНДШАФТОВ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ

АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются природно-исторические ландшафты как ценные объекты, сочетающие в себе природные и культурные элементы, расположенные на определенной территории. При этом они отражают взаимодействие человеческой деятельности и природной среды, которое происходило в течение длительного времени. Данные ландшафты могут в себя включать археологические объекты, различные населенные пункты, памятники архитектуры, малые архитектурные формы, старинные парки и сады, а также природные компоненты (например, водные объекты, ландшафты). Природно-исторические ландшафты создают уникальную систему, отражая историю и культуру данной территории и проживающего там населения. Подчеркивается важность их сохранения, реконструкции и охраны для целей исторического и культурного наследия, а также развития туризма, образования и научных исследований. Авторы предлагают комплексный подход к изучению и сохранению ландшафтов и других природных и культурных объектов, включающий законодательные меры, просвещение, научные исследования и использование инновационных методов, таких как создание цифровых двойников. Представлены различные примеры сохранения и изучения природно-исторических ландшафтов в Калининградской области. Построен прототип цифрового двойника, на котором смоделирован прогностический сценарий развития территории с учетом берегоохранных мероприятий и развития туристической привлекательности района. Подчеркивается необходимость использования современных технологий и инноваций (позаимствованных из других отраслей) для более эффективного управления и охраны природных ресурсов, а также для повышения осведомленности общественности о важности сохранения природного наследия. Цифровой двойник является эффективным и наиболее показательным для принятия управленческих решений в области природопользования и для внедрения учеными в геоэкологических исследованиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровой двойник, береговая зона, природно-исторический ландшафт, Калининградская область, Балтийская коса

¹ Балтийский федеральный университет имени И. Канта, Высшая школа живых систем, ул. Университетская, д. 2, Калининград, Россия, 236041,
e-mail: tanja.sukmanova@yandex.ru

² Балтийский федеральный университет имени И. Канта, Высшая школа живых систем, ул. Университетская, д. 2, Калининград, Россия, 236041,
e-mail: belovns@gmail.com

Tatiana V. Sukmanova¹, Nikolay S. Belov²

APPLICATION OF DIGITAL TWINS IN THE STUDY OF HISTORICAL LANDSCAPES OF THE COASTAL ZONE

ABSTRACT

The article considers natural-historical landscapes as valuable objects combining natural and cultural elements, which are located in a certain area. They reflect the interaction between human activity and the natural environment that has occurred over a long period of time. These landscapes may include: archaeological sites, various settlements, architectural monuments, small architectural forms, ancient parks and gardens, as well as natural components (e. g.: water bodies, landscapes). Natural-historical landscapes create a unique system, reflecting the history and culture of the territory and the population living there. The importance of their conservation, reconstruction and protection for historical and cultural heritage, tourism, education and research is emphasized. The authors propose an integrated approach to the study and conservation of landscapes and other natural and cultural sites, including legislation, education, research and the use of innovative methods such as digital twins. Various examples of preservation and study of natural and historical landscapes in the Kaliningrad region are presented. A prototype of the digital twin is built, on which the prognostic scenario of the territory development is modeled, taking into account the coastal protection measures and the development of tourist attractiveness of the area. The need to use modern technologies and innovations (borrowed from other industries) to better manage and protect natural resources and to raise public awareness of the importance of preserving natural heritage is emphasized. The digital twin is effective and most indicative for management decisions in natural resources management and for implementation by scientists in geo-ecological research.

KEYWORDS: digital twin, coastal zone, natural-historical landscape, Kaliningrad region, Baltic Spitz

ВВЕДЕНИЕ

Природно-исторический ландшафт представляет собой уникальное сочетание природных и исторических элементов на определенной территории, отражающееся во взаимодействии человека и природной среды в течение длительного времени. Включая в себя археологические памятники, старинные города и поселения, памятники архитектуры, старинные парки и сады, а также природные компоненты (например, реки, озера, леса, горы и побережья), природно-исторические ландшафты создают уникальную систему, отражая историю и культуру данной территории и проживающего там населения [Баушкатов, 2011].

Сохранение и охрана природно-исторических ландшафтов являются важными задачами, т. к. они указывают на особо ценные объекты, которые имеют подходящие элементы для изучения истории, культуры и природной среды. Эти ландшафты обладают исторической ценностью, но также способствуют развитию туризма, образования и научных исследований [Галкова, 2008]. Примерами природно-исторических ландшафтов могут быть: Петра в Иордании (культурные памятники и природные образования (каньоны и пустыня)), Фарерские острова и Гренландия (ледники, фьорды и скалистые берега), Архипелаг Новая Земля (горы, айсберги, ледники, исторические памятники, связанные с

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University, Institute of Living Systems, 2, Universitetskaya str., Kaliningrad, 236041, Russia, e-mail: tanja.sukmanova@yandex.ru

² Immanuel Kant Baltic Federal University, Institute of Living Systems, 2, Universitetskaya str., Kaliningrad, 236041, Russia, e-mail: belovns@gmail.com

экспедициями и исследованиями арктического региона). Данные ландшафты можно сохранять и реконструировать различными методами и подходами:

- *Законодательные меры.* Принятие специальных законов и нормативных актов, которые регулируют использование и защиту природно-исторических ландшафтов. Данные законы/акты должны включать возможное создание заповедников, национальных парков, памятников природы, истории и культуры, а также установление информационных табличек с правилами использования и с техникой безопасности на этой территории [Кулешова, 2017].
- *Образование и просвещение.* Проведение образовательных программ, выставок, лекций и других мероприятий с целью повышения осведомленности об уникальности и ценности природно-исторических ландшафтов. Это помогает привлечь внимание общественности к необходимости их охраны [Кривошеева, 2020].
- *Научные исследования.* Проведение научных исследований для изучения природно-исторических ландшафтов, их состояния, уязвимости и потенциала для сохранения [Белкина, 2020]. Это позволяет разрабатывать эффективные стратегии охраны, например, использования метода цифрового двойника (ЦД). Он позволяет сохранить и восстановить объект с помощью инструментов моделирования и манипулирования [Hutson, 2024].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сохранение природно-исторического ландшафта с помощью цифрового двойника — это инновационный подход, который позволяет создать виртуальную реплику исторического места или объекта с использованием современных технологий [Jones, 2022]. Цифровой двойник может включать в себя трехмерные модели, видео- и аудиоматериалы, а также другие цифровые данные, позволяющие воссоздать реалистичное представление о ландшафте. Создание цифровых двойников требует совместных усилий специалистов по истории, археологии, геоморфологии, географии, компьютерной графике и программированию, и такой подход может стать эффективным инструментом для сохранения и продвижения объектов культурного наследия и природных ресурсов. Создание цифрового двойника имеет несколько преимуществ:

- *Сохранение наследия.* Цифровой двойник позволяет сохранить исторические места и объекты в случае их разрушения или утраты. Это способствует сохранению культурного наследия для будущих поколений.
- *Образовательные цели.* Цифровой двойник может быть использован для образовательных целей, например, в музеях, школах или университетах, чтобы показать и объяснить историю и значение природно-исторического ландшафта.
- *Исследования и анализ.* Цифровой двойник предоставляет ученым и исследователям возможность изучать природно-исторический ландшафт более детально, проводить анализ и эксперименты без необходимости нанесения повреждений реальным объектам.
- *Туризм и путешествия.* Цифровой двойник может быть использован для привлечения туристов и путешественников, предоставляя им возможность виртуально посетить исторические места и объекты.

Пример практически утраченного природно-исторического объекта находится в поселке Донское Калининградской области. Это уникальный геологический объект, который не успел получить статус «геологический памятник природы» [Бубнова, 2022]. Участок имеет сложную морфологическую структуру за счет неоднородности геологического строения и активно разрушается под действием волн, гравитации и ветровых нагонов (рис. 1).



*Рис. 1. Расположение «останца» [Белов, 2021]
Fig. 1. Location of the “remnant” [Belov, 2021]*

К сожалению, первые работы по данной территории учеными из БФУ им. И. Канта начались лишь в 2011 г., когда уже произошли обрушения. На данном этапе использовалось только наземное лазерное сканирование. Это позволило, с одной стороны, оценить процессы, происходящие на данной территории, а также получить высокоточные объемные характеристики. С другой стороны — для формирования качественной копии объекта не хватает данных фотограмметрии. Дроны, которые применяются в данном методе, начали использоваться с 2018 г., когда процесс обрушения усилился, и от объекта практически ничего не осталось. В работе представлена копия объекта в виде облака точек плотностью 7 точек на 9 см^2 и общим количеством в 24 000 000 точек (рис. 2).

Извлеченные данные позволяют понять характер объекта, однако сложно передать его геологические особенности. Фотограмметрическая реконструкция объекта была завершена в период с 2018 по 2020 гг. и содержит 18 000 000 полигонов, но сам объект уже не вызывает такого живого интереса для создания цифрового двойника (рис. 3).

Калининградская область представляет собой уникальный регион Российской Федерации. В последние четыре года, в связи с политической и эпидемиологической обстановкой в мире, рекреационная привлекательность Калининградской области значительно выросла, что привело к увеличению нагрузки на морское побережье региона. Вследствие этого возрастает уязвимость отдельных участков побережья, поскольку существующая система природопользования не рассчитана на резкий рост рекреантов. В связи с этим исследования, посвященные оценки уязвимости побережья, становятся особенно актуальными. Таким образом, практическая значимость работы заключается в

использовании результатов исследования для оценки и анализа уязвимости побережья Калининградской области, принятии решений по проведению ряда мероприятий по защите/охране береговой зоны и по зонированию территории с учетом ее экологического состояния.

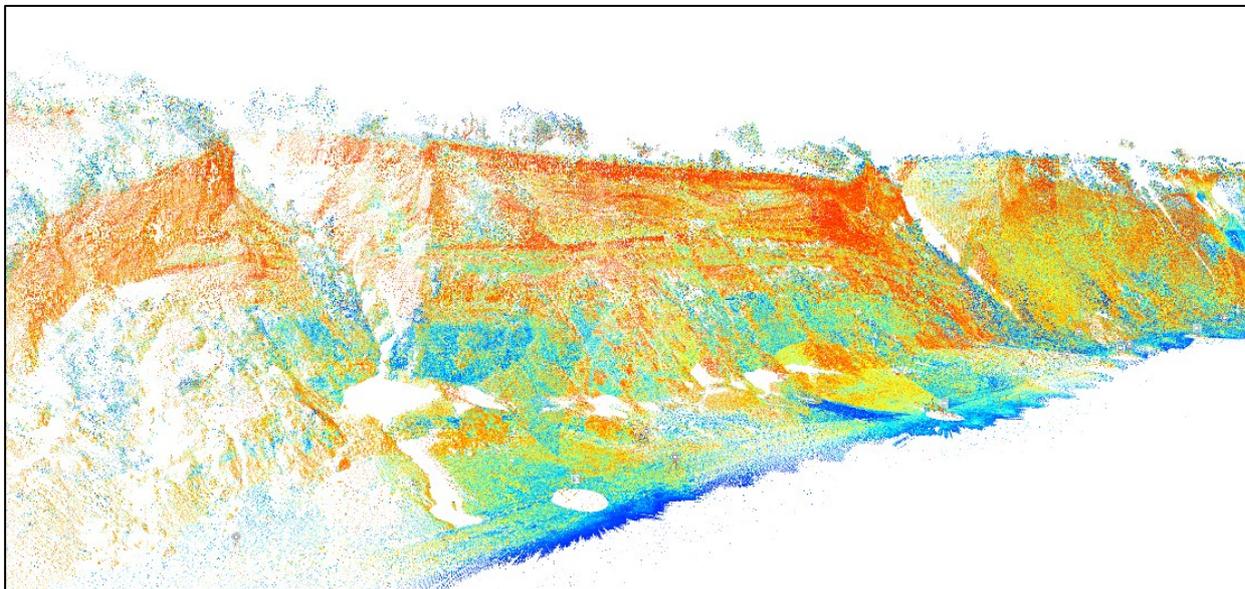


Рис. 2. Облако точек «останца» в пос. Донском [Белов, 2021]
Fig. 2. Point cloud of the “remnant” in Donskoy settlement [Belov, 2021]



Рис. 3. Фрагмент модели «останца» [Белов, 2021]
Fig. 3. Fragment of the “remnant” model [Belov, 2021]

Береговая зона — район активного взаимодействия суши и моря, включающий в себя берег и прибрежную полосу морского дна (подводный береговой склон). Подвергаемая воздействию волн береговая зона разрушается или накапливает наносы (песок, гравий, гальку), для которых характерно непрерывное движение. В законодательстве Российской

Федерации понятие «береговая зона» не определено, но данный термин используется в одном приказе¹ и методической рекомендации².

Береговая зона является зоной взаимодействия гидросферы, литосферы, атмосферы и биосферы. Береговая зона представляет собой арену интенсивной хозяйственной деятельности человечества, и, таким образом, данное взаимодействие усложняется участием ноосферы/техносферы. В береговой зоне происходит взаимодействие и взаимопроникновение гидросферы, литосферы, атмосферы, биосферы и техносферы; данный симбиоз процессов практически нигде не происходит [Сафьянов, 1996]. На территории Калининградской области встречается несколько типов исторических ландшафтов (рис. 4).



Рис. 4. Схема распределения исторических ландшафтов Калининградской области (сделано авторами)

Fig. 4. Scheme of distribution of historical landscapes in the Kaliningrad region (made by the authors)

В качестве условного удачного примера сохранения и оптимизации историко-природного ландшафта является проделанная авторами работа на 1 км Балтийской косы (Калининградская область) в районе пос. Коса. Поселок расположен на юге области. Омы-

¹ Приказ РОСВОДРЕСУРСОВ от 02.06.2016 № 114 «Об утверждении правил использования водных ресурсов цимлянского водохранилища»

² Методические рекомендации МЧС от 02.12.2021 № ДЗ-17-802-5172-ВЯ

вается Балтийским морем, Калининградским (Вислинским) заливом и Балтийским проливом. Протяженность российской части косы составляет 25 км [Дизендорф, 2021]. Рельеф косы был сформирован в результате ветро-волновой деятельности. Климат, как и во всем регионе, является переходным от морского к умеренно-континентальному. Ширина пляжей в среднем 50 м.

История населенного пункта начинается с XIII в., когда здесь появилась небольшая деревня, принадлежавшая Тевтонскому ордену. В документах она упоминалась как деревня рыбаков (деревня Вограм) [Довыденко, 2000]. В 1258 г. Тевтонский орден построил здесь крепость, которая стала важной опорой для защиты территории от нападений литовцев и пруссов. Город был построен на месте древнего прусского поселения и имел стратегическое значение для защиты побережья. В течение следующих веков он развивался как торговый и рыболовный центр. В 1329 г. крепость была укреплена и переименована в Штандхаусен. В 1384 г. город получил права Ганзейского города и переименован в Пиллау. В XVII–XVIII вв. Пиллау был важным портом для торговых судов, это связано с влиянием шторма 10 сентября 1510 г., в результате которого образовался пролив Фриш Гафф. В 1525 г. Восточная Пруссия была присоединена к Королевству Польскому, но город сохранял свою автономию. После Польско-шведской войны город (1626–1629 г.) находился под контролем шведского королевства. В 1701 г. город стал частью Восточной Пруссии, а в 1871 г. — Германии. В начале XX в. Пиллау стал популярным курортом благодаря своим пляжам и лечебным источникам. Однако во время Второй мировой войны город был разрушен. После войны он был передан Советскому Союзу и переименован в Балтийск. В 1947 г. на месте разрушенного Пиллау был основан поселок Коса, который стал базой для советских военных кораблей и подводных лодок. В 1991 г. после распада Советского Союза та часть Вислинской косы, где располагается пос. Коса, осталась под контролем Российской Федерации. Сегодня поселок является популярным местом для отдыха, привлекающим туристов своими пляжами, лесами и разрушенной военной инфраструктурой (многие здания и сооружения, связанные с военной историей поселка, до сих пор остаются секретными и закрытыми для посещения).

Город Балтийск и поселок Коса получили определенные толчки для развития туристической инфраструктуры после частичного снятия военного статуса на территории [Шаплыгина, 2009], чемпионата мира по футболу 2018 г. и в активный период фазы распространения коронавирусной инфекции/COVID-19 (2020–2021 г.). Это способствовало перераспределению туристического потока с северной зоны (г. Светлогорск, г. Зеленоградск, п. Пионерский) на западное направление [Сукманова, 2022]. В связи с данной ситуацией органы региональной и местной власти проводят работы по восстановлению инфраструктуры (реконструкция променада г. Балтийска, прилегающего к проливу) и созданию новой (официальный пляж п. Коса). Также остро стоит вопрос о вставлении авантюны Балтийской косы, которая подвергается природным (мощная ветро-волновая деятельность в зимний период) и антропогенным (несанкционированные сходы, бытовой и морской мусор и др.) воздействиям [Дизендорф, 2022].

С течением времени береговая зона пос. Коса со стороны моря претерпела значительные изменения как в социальном (природопользование), так и в природных аспектах. Исторически эта территория использовалась для рыболовства, судоходства и военных нужд. Во времена Восточной Пруссии данный участок пользовался популярностью как туристическое место, однако были проблемы с разрешением на въезд в Пиллау и переправу на косу, потому что большая часть морского побережья была под контролем военного гарнизона. Премияльной датой является строительство Западного форта в 1869 г. (рис. 5), он входил в цепочку береговых укреплений г. Пиллау. Форт по плану был окружен рвом. Сейчас форт Западный находится в чрезвычайно аварийном состоянии (рис. 6),

большая часть была разрушена многочисленными штормами и военными действиями на территории современных г. Балтийска и п. Коса. По данному крупному историческому объекту можно определить примерную динамику побережья по старым топографическим картам, спутниковым снимкам и иным изображениям (рис. 7, 8). Как видно на исторических файлах, территория морского побережья около западного форта была укреплена бунами (часть морской инфраструктуры для укрепления берега от абразии и для наполнения песчаным материалом), которые способствовали укреплению и восстановлению береговой зоны от природных факторов. В свою очередь, широкий пляж также защищал Западный от боевого нападения вражескими силами, но со временем под воздействием природных и антропогенных факторов берегоукрепительная инфраструктура была потеряна, и вследствие этого также была утеряна и достаточно широкая береговая линия.

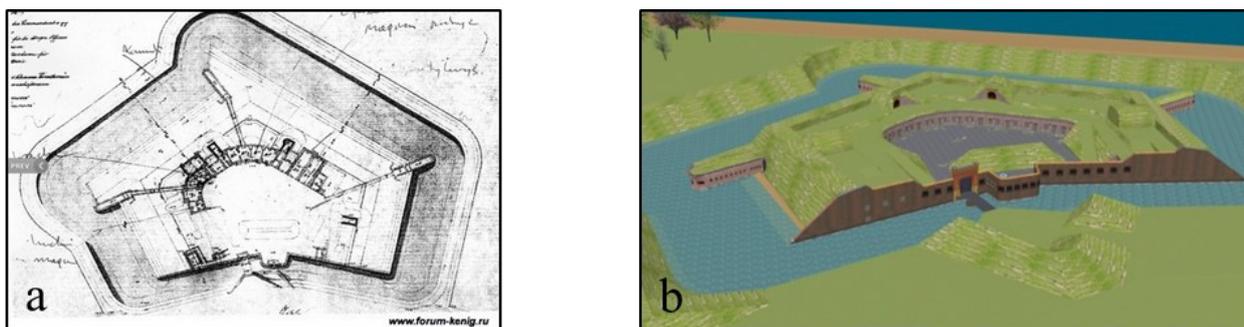


Рис. 5. Западный форт в XIX в.: а) план форта¹, б) цифровая копия²
Fig. 5. Western fort in the 19th century: a) Fort Plan, b) Digital Copy/Shadow



Рис. 6. Современное состояние Западного форта³
Fig. 6. The current state of the West Fort

¹ План форта. Электронный ресурс: <https://bestlj.ru/384275-Fort-Zapadnyjj-Baltijjskaja-Kosa.html> (дата обращения 10.02.2024)

² Форт Западный Балтийск, план. Форт Западный, Балтийская коса. Западный Форт, Балтийская коса, макет. Схема форта Восточный Пиллау. Электронный ресурс: <https://flectone.ru/baza-zapadniyu.html> (дата обращения 10.02.2024)

³ Форт Западный, Балтийская коса, Калининградская область. Электронный ресурс: https://pikabu.ru/story/fort_zapadniy_8787752/author?mv=2 (дата обращения 10.02.2024)

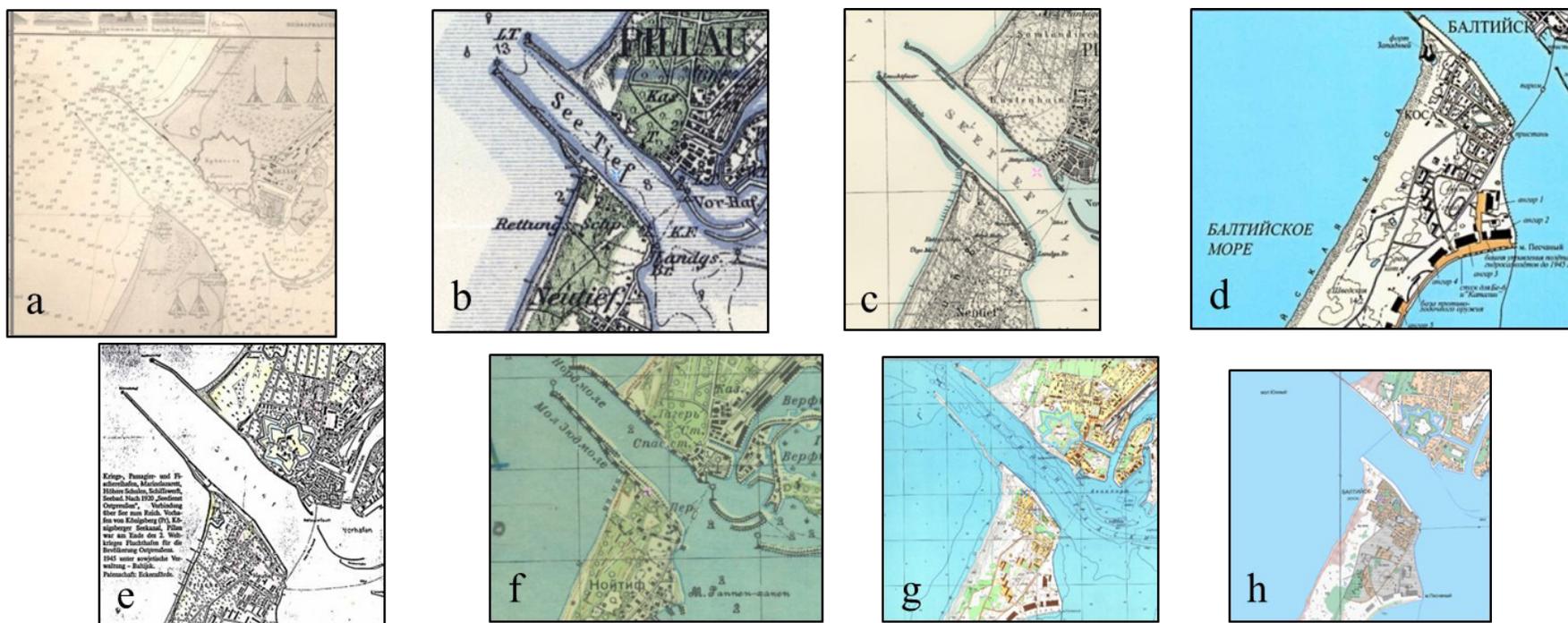


Рис. 7. Исторические карты исследуемого района с 1882 по 2000 г.: а) Пиллау в 1882 г.¹; б) Пиллау в 1910 г.²; в) Пиллау в 1939 г.³; д) г. Балтийск и пос. Коса в советское время⁴; е) Пиллау в 1940 г.⁵; ф) Пиллау в 1941 г.⁶; г) г. Балтийск и пос. Коса в 1963 г.⁷; h) г. Балтийск и пос. Коса в 2000 г.⁸

Fig. 7. Historical maps of the study area from 1882 to 2000: a) Pillau in 1882; b) Pillau in 1910; c) Pillau in 1939; d) Baltiysk and Kosa in Soviet times; e) Pillau in 1940; f) Pillau in 1941; g) Baltiysk and Kosa in 1963; h) Baltiysk and Kosa in 2000

- 1 Пиллау в 1882 г. Электронный ресурс: <https://www.bildarchiv-ostpreussen.de/> (дата обращения 20.02.2024)
- 2 Пиллау в 1910 г. Электронный ресурс: <http://www.etomesto.ru/> (дата обращения 22.02.2024)
- 3 Пиллау в 1939 г. Электронный ресурс: <http://www.etomesto.ru/> (дата обращения 21.02.2024)
- 4 Г. Балтийск и пос. Коса в советское время. Электронный ресурс: <https://elvids.com/w/балтийская+коса+достопримечательности> (дата обращения 20.02.2024)
- 5 Пиллау в 1940 г. Электронный ресурс: https://russian-west.narod.ru/gorod/karty/pillau_3.htm (дата обращения 26.02.2024)
- 6 Пиллау в 1941 г. Электронный ресурс: <http://www.etomesto.ru/> (дата обращения 22.02.2024)
- 7 Г. Балтийск и пос. Коса в 1963 г. Электронный ресурс: <http://www.etomesto.ru/> (дата обращения 22.02.2024)
- 8 Г. Балтийск и пос. Коса в 2000 г. Электронный ресурс: <http://www.etomesto.ru/> (дата обращения 22.02.2024)

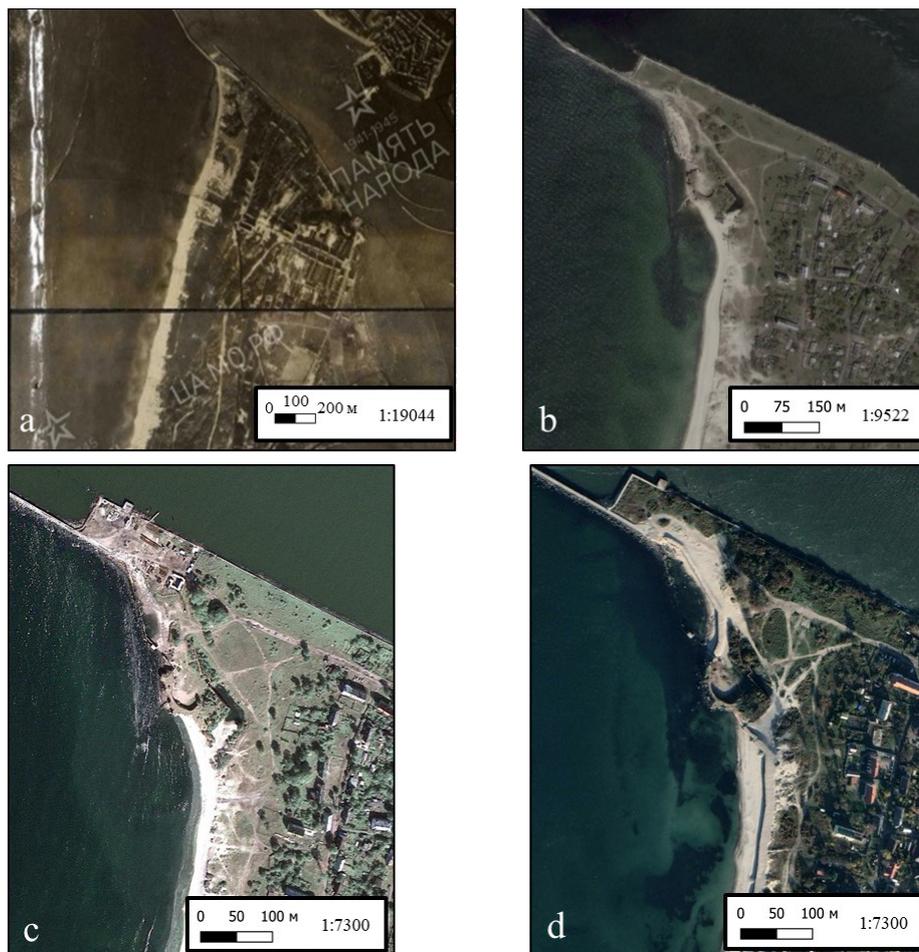


Рис. 8. Данные дистанционного зондирования исследуемого района с 1944 по 2022 г.:
а) Пиллау, 28 октября 1944 г.¹; б) Береговая зона в 2005 г.²;
с) Береговая зона в 2009 г.³; д) Береговая зона в ноябре 2022 г.⁴

Fig. 8. Remote sensing data of the study area from 1944 to 2022: a) Pillau, 28 October 1944;
b) Coastal zone in 2005; c) Coastal zone in 2009; d) Coastal zone in November 2022

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Построение цифрового двойника в фазе прототипа прибрежной зоны пос. Коса может принимать взвешенные управленческие решения в области природопользования. Принятые не очень эффективные с точки зрения природопользования меры привели к разрушению береговой линии, что видно на изображениях, представленных выше. На картах г. Пиллау в 1940 г. (именно на этом изображении указан Западный форт) можно видеть достаточно широкую береговую линию перед фортом (около 50 м) в сравнении со спутниковыми снимками 2023 г. (рис. 9). В настоящее время большая часть форта находится в море вместе с берегоукреплением. Поэтому региональные и местные власти

¹ Пиллау 28 октября 1944 г. Электронный ресурс: <https://trizna.ru/forum/topic/42766-советская-аэрофотосъёмка-а-1941-45/> (дата обращения 22.02.2024)

² Береговая зона в 2005 г. Электронный ресурс: <https://www.google.ru/earth/> (дата обращения 22.02.2024)

³ Береговая зона в 2009 г. Электронный ресурс: <https://www.google.ru/earth/> (дата обращения 26.02.2024)

⁴ Береговая зона в 2022 г. Электронный ресурс: <https://www.google.ru/earth/> (дата обращения 27.02.2024)

начали проводить мероприятия по частичному укреплению берегового вала для развития природопользования с точки зрения туризма на данной территории. С помощью визуализации и манипуляции над прототипом цифрового двойника можно показать все возможные сценарии развития территории как с точки зрения грамотного управления всеми видами природопользования на участке, так и бесконтрольного использования или отсутствия каких-либо решений по развитию данной местности.



Рис. 9. Слияние изображений 1940 и 2022 г. (привязка по 6 опорным точкам)
Fig. 9. Merging of the 1940 and 2022 images (binding by 6 reference points)

Исходными данными для построения 3D-модели (рис. 10) послужили снимки с БПЛА (DJI Phantom 4 Pro), снятые 4 февраля 2022 г. после серии штормов. Рабочая высота составляла 60 м, полетное задание составлено с двойной сеткой. Характеристики камеры DJI Phantom 4 Pro: разрешение фото по вертикали — 3 648 пикс; разрешение фото по горизонтали — 5 472 пикс; разрешение матрицы — 20 Мпикс; объектив — угол обзора 84°, 24 мм (эквивалент формата 35 мм). Привязка осуществлялась по 5 опорным точкам, снятым с помощью TOPCON GR5 от базовой станции университета в режиме RTK, плановая точность была в пределах 10 см, высотная точность 5 см.

Модель строилась в специализированной программе Agisoft Metashape для обработки фотографий и создания 3D-моделей из них. Она используется в археологии, геодезии, геологии, архитектуре, инженерном деле, в добывающей промышленности, урбанистике и в других областях.

С помощью Agisoft Metashape можно создавать точные и высококачественные 3D-модели объектов и местности на основе фотографий, сделанных с воздуха (данные с дронов) или с земли (данные, снятые на телефоны и с фотокамер). Параметры моделирования были выбраны с учетом высокой точности выравнивания и средней плотности построения облака точек.

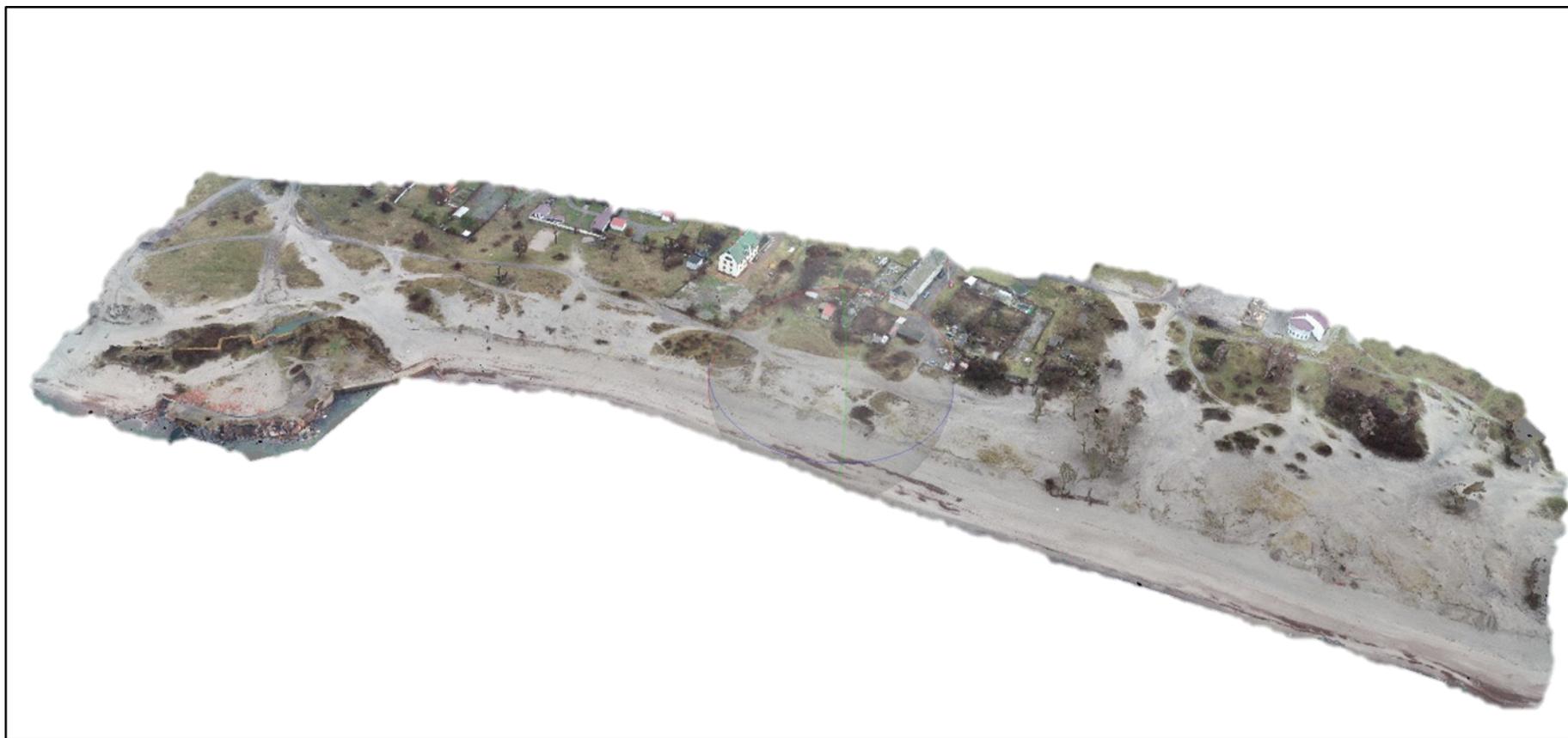


Рис. 10. 3D-модель прибрежной зоны пос. Коса со стороны моря (04.02.2022) (сделано автором)
Fig. 10. 3D model of the coastal zone of the Kosa settlement from the sea side (04.02.2022) (made by the author)

В дальнейшем проводилась классификация облака точек при помощи программного обеспечения *metashape*, начиная с общей классификации, а затем осуществлялась классификация точек рельефа. Удаление древесно-кустарниковой растительности производилось в полуавтоматическом режиме.

Это способствовало определению начальной точки создания сценариев манипуляции над двойником:

- состояние побережья без принятых укрепительных мер весной и летом 2022 г.;
- развитие прибрежной территории со сценарием местных и региональных властей;
- «идеальное» воплощение развития этой территории с точки зрения природопользования — комбинация стабильного развития территории для поселка и сохранения природного и исторического наследия (рис. 11).

При позитивном сценарии (рис. 11) можно смоделировать выставление/постройку пескоудерживающих сооружений, таких как буны и биг-бэги, для увеличения пляжной зоны. Развитие первой линии от моря предусматривает строительство гармоничных и вписывающихся по высоте и архитектурному решению зданий и сооружений. Каждое инженерное решение проходит процедуру общественного обсуждения для гармонизации и общественного принятия в развитии этой территории. Вместе с тем, развитие пляжной инфраструктуры рассчитывает выставление нестационарных объектов, которые наносят минимальный вред ландшафту косы. Данные работы привлекут внимание туристов к природно-историческому ландшафту, а также к охране и восстановлению. Стоимость работ для данного сценария условно можно оценить в примерно 130–200 млн руб.

Ход работ представлен на рис. 12.

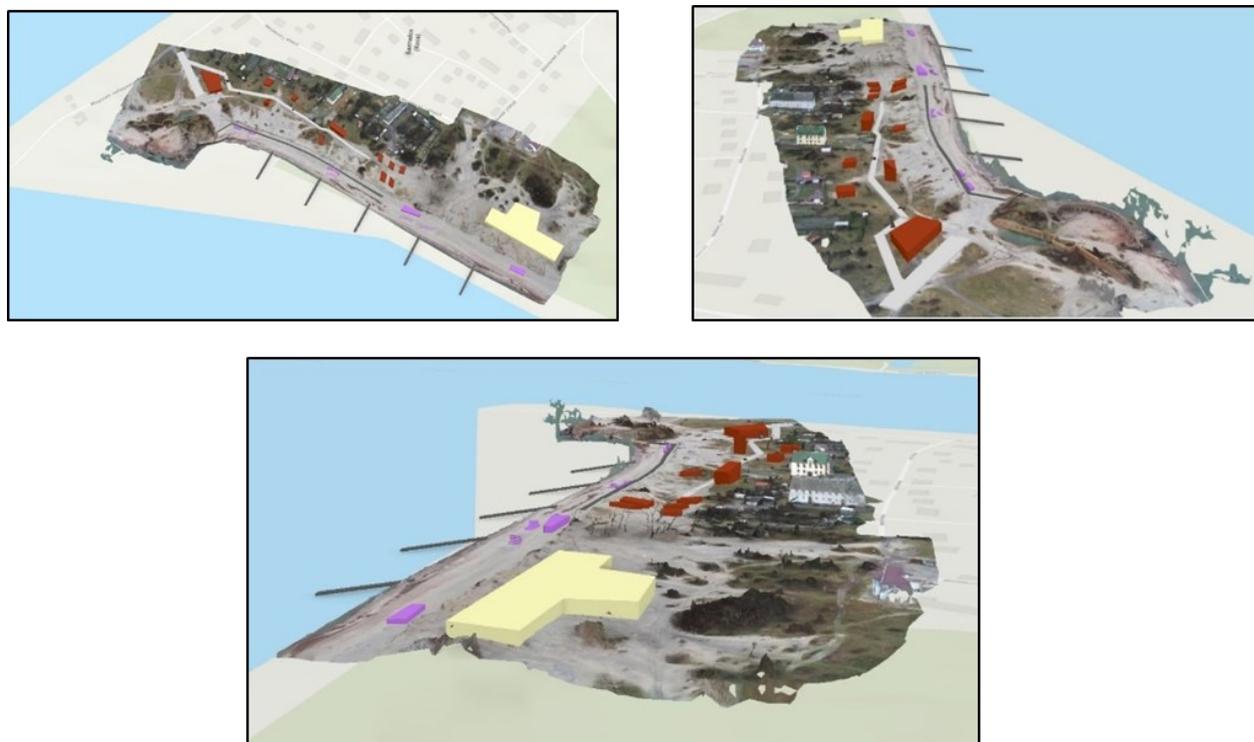


Рис. 11. Прототип цифрового двойника побережья около пос. Коса (развитие территории с учетом природоохранных мероприятий)

Fig. 11. Prototype of the digital twin of the coastline near Kosa settlement (development of the area taking into account environmental protection measures)

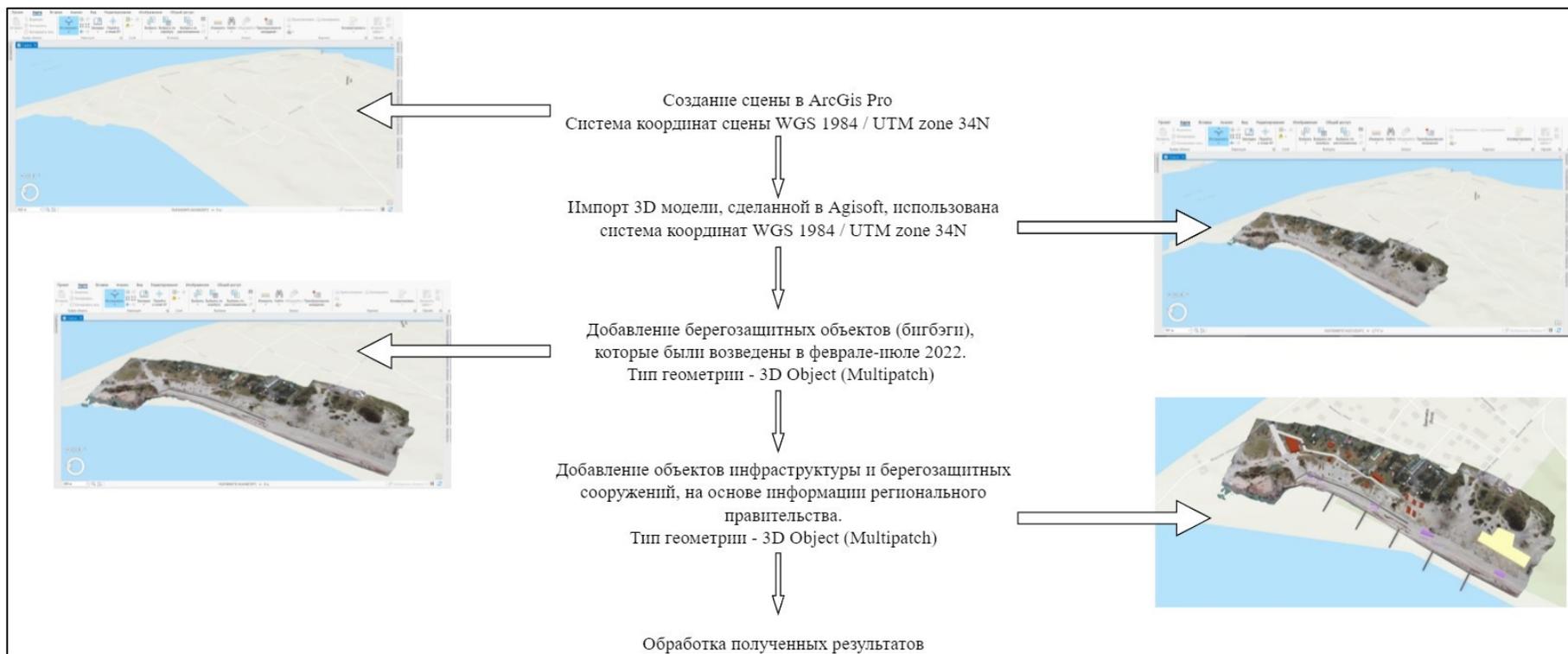


Рис. 12. Ход работ
Fig. 12. Progress of work

ВЫВОДЫ

Природно-исторические ландшафты представляют собой ценное сочетание природных и культурных элементов, отражающее долгую историю взаимодействия человека с окружающей средой. Сохранение и охрана этих ландшафтов является важной задачей, поскольку они не только представляют историческую и культурную ценность, но также способствуют развитию туризма, образования и научных исследований. Для успешного сохранения природно-исторических ландшафтов необходим комплексный подход, включающий в себя законодательные меры, образование и просвещение, а также научные исследования. Использование инновационных методов, таких как создание цифровых двойников, позволяет эффективно моделировать и сохранять уникальные природно-исторические ландшафты. Эти работы позволят сохранить и восстановить ландшафты для будущих поколений и обогатить культурное наследие человечества, подчеркивая важность устойчивого развития и охраны окружающей среды.

Применение цифровых технологий и моделей для прогнозирования экологических ситуаций играет ключевую роль в обеспечении устойчивого развития и охраны окружающей среды. Цифровые двойники позволяют собирать и анализировать большие объемы данных, создавать точные прогностические модели и предсказывать возможные изменения в экосистемах. Это помогает принимать обоснованные решения в области охраны окружающей среды, предотвращать негативные последствия для природы и обеспечивать устойчивое использование природных ресурсов. Таким образом, цифровые двойники становятся мощным инструментом для прогнозирования экологических ситуаций и обеспечения экологической безопасности нашей планеты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баикатов А. Н. Гуманитарно-географические исследования в Саратовском регионе. Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле, 2011. Т. 11. № 2. С. 3–7.

Белкина С. В. Основные подходы к изучению культурных и природно-культурных ландшафтов. Культура и цивилизация, 2020. Т. 10. № 2А. С. 89–98.

Белов Н. С., Белова А. В., Шаплыгина Т. В., Данченко А. Р. Применение новых технологий для формирования цифровых двойников уникальных и редких природных и культурных объектов. Балтийский регион — регион сотрудничества: Материалы V международной научно-практической конференции, Калининград, 20–22 октября 2021 г. Т. 5. Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2021. С. 55–62.

Бубнова Е. С., Шлюбская К. Г. Научное обоснование организации геопарка в поселке Донское Калининградской области. XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования — в практику берегопользования. Калининград: Издательство БФУ им. И. Канта, 2022. С. 359–361.

Галкова О. В. Культурный ландшафт как часть всемирного наследия (по документам ЮНЕСКО). Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета, 2008. № 4. С. 156–159.

Дизендорф Л. О. К вопросу о создании национального парка на Балтийской косе. Балтийский регион — регион сотрудничества: Материалы V международной научно-практической конференции, Калининград, 20–22 октября 2021 г. Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2021. Т. 5. С. 222–227.

Дизендорф Л. О., Сукманова Т. В., Мерковская Е. В. Трансформация природных комплексов Балтийской косы под влиянием неконтролируемой реакционной деятельности.

Ландшафтные и экологические исследования природных и антропогенных геосистем. Материалы IV Общероссийской (с международным участием) научно-практической конференции (заочной), посвященной 85-летию высшего географического образования в Тамбовской области. Тамбов: Издательский дом «Державинский», 2022. С. 138–146.

Довыденко Л. Тайны Пиллау. Очерки из истории города. Калининград: Янтарный сказ, 2004. 120 с.

Кривошеева Т. М. Усиление роли туристско-краеведческой деятельности в просвещении и патриотическом воспитании населения. Вестник ассоциации вузов туризма и сервиса, 2020. Т. 14. № 2–2. С. 12–18.

Кулешова М. Е. Формы охраны природно-культурного наследия и категория культурного ландшафта. Горизонты гуманитарного знания, 2017. № 4. С. 31–43.

Сафьянов Г. А. Геоморфология морских берегов. М.: Издательство Московского университета, 1996. 406 с.

Сукманова Т. В., Дизендорф Л. О. Изменение рекреационно-туристической нагрузки на природную систему в условиях COVID-19. Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки, 2022. № 4. С. 44–52. DOI: 10.5922/gikbfu-2022-4-4.

Шаплыгина Т. В. Анализ рекреационного природопользования на Вислинской косе. Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки, 2009. № 1. С. 107–110.

Hutson J., Weber J., Russo A. Digital Twins and Cultural Heritage Preservation: A Case Study of Best Practices and Reproducibility in Chiesa dei SS Apostoli e Biagio. *Art and Design Review*, 2023. V. 11. DOI: 10.4236/adr.2023.1111003.

Jones D., Snider C., Nassehi A., Yon J., Hicks B. Characterizing the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2020. V. 29. P. 36–52. DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.

REFERENCES

Bashkatov A. N. Humanitarian-geographical research in the Saratov region. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2011. V. 11. No. 2. P. 3–7 (in Russian).

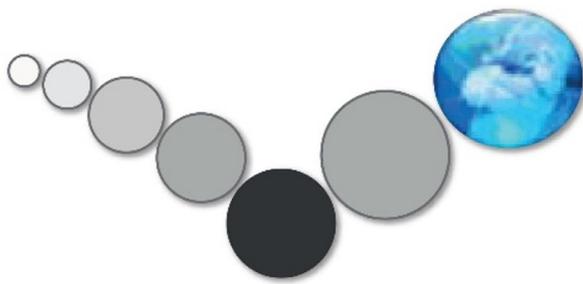
Belkina S. V. Main approaches to the study of cultural and natural-cultural landscapes. *Culture and Civilization*, 2020. V. 10. No. 2A. P. 89–98 (in Russian).

Belov N. S., Belova A. V., Shaplygina T. V., Danchenko A. R. Application of new technologies for the formation of digital twins of unique and rare natural and cultural objects. Baltic region — region of cooperation: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference, Kaliningrad, 20–22 October 2021. V. 5. Kaliningrad: Immanuel Kant Baltic Federal University, 2021. P. 55–62 (in Russian).

Bubnova E. S., Shlyubskaya K. G. Scientific substantiation of geopark organization in Donskoye settlement of Kaliningrad region. XXIX Coastal Conference: Natural and theoretical research into the practice of coastal management. Kaliningrad: Immanuel Kant Baltic Federal University, 2022. P. 359–361 (in Russian).

Dizenдорф L. O. To the question of creating a national park on the Baltic Spit. Baltic region — region of cooperation: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference, Kaliningrad, 20–22 October 2021. Kaliningrad: Publishing House of the Immanuel Kant Baltic Federal University, 2021. V. 5. P. 222–227 (in Russian).

- Dizendorf L. O., Sukmanova T. V., Merkovskaya E. V.* Transformation of natural complexes of the Baltic Spit under the influence of uncontrolled reaction activity. Landscape and ecological studies of natural and anthropogenic geosystems. Proceedings of the IV All-Russian (with international participation) scientific and practical conference (in absentia) dedicated to the 85th anniversary of higher geographical education in the Tambov region. Tambov: “Derzhavinsky Publishing House”, 2022. P. 138–146 (in Russian).
- Dovydenko L.* Secrets of Pillau. Essays from the history of the city. Kaliningrad: Publishing House “Amber Tale”, 2000. 120 p. (in Russian).
- Galkova O. V.* Cultural landscape as part of the World Heritage (according to UNESCO documents). Vestnik Saratov State Socio-Economic University, 2008. No. 4. P. 156–159 (in Russian).
- Hutson J., Weber J., Russo A.* Digital Twins and Cultural Heritage Preservation: A Case Study of Best Practices and Reproducibility in Chiesa dei SS Apostoli e Biagio. Art and Design Review, 2023. V. 11. DOI: 10.4236/adr.2023.111003.
- Jones D., Snider C., Nassehi A., Yon J., Hicks B.* Characterizing the Digital Twin: A systematic literature review. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2020. V. 29. P. 36–52. DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
- Krivosheeva T. M.* Strengthening the role of tourism and local history activities in education and patriotic education of the population. Universities for Tourism and Service Association Bulletin, 2020. V. 14. No. 2–2. P. 12–18 (in Russian).
- Kuleshova M. E.* Forms of protection of natural and cultural heritage and the category of cultural landscape. Horizons of Humanitarian Knowledge, 2017. No. 4. P. 31–43 (in Russian).
- Safyanov G.A.* Geomorphology of sea shores. Moscow: Moscow University Press, 1996. 406 p. (in Russian).
- Shaplygina T. V.* Analysis of recreational nature use on the Vistula Spit. IKBFU’s Vestnik. Series: Natural and Medical Sciences, 2009. No. 1. P. 107–110 (in Russian).
- Sukmanova T. V., Dizendorf L. O.* Change of recreational and tourist load on the natural system under COVID-19. IKBFU’s Vestnik. Series: Natural and Medical Sciences, 2022. No. 4. P. 44–52 (in Russian). DOI: 10.5922/gikbfu-2022-4-4.
-



Дистанционные методы исследования Земли Remote methods in Earth research

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-442-461

Maretta L. Kazaryan¹, Mikhail A. Shahramanian^{2,3}, Vladimir S. Tikunov⁴, Hui Lin⁵

THE SYSTEM OF GLOBAL SPACE MONITORING OF THE PROCESSES OF LITTERING OF THE PLANET EARTH (A JOINT RUSSIAN-CHINESE PROJECT)

ABSTRACT

Currently, geoinformation systems using Earth remote sensing data from space have taken strong positions in the field of economics, politics, and, practically, all spheres of human activity. As a consequence of human activity in urbanized areas, this is the emergence and further spread of unauthorized landfills and industrial waste. The littering of the planet is becoming an increasingly serious problem that we face in the modern world. Plastic waste, air and water pollution, improper waste disposal — all this damages the environment and can have long-term consequences for the planet and life on it. A variety of human diseases, such as chronic lung diseases, malignant tumors, and oncological diseases is directly related to atmospheric pollution, namely the gas component — landfill gas. In order to intervene in time and stop the spread of infection and changes in the soil composition of territories, etc., it is necessary to have a global automatic monitoring system for landfills and industrial waste. The purpose of the work is to design a model of a global automatic monitoring system for waste disposal facilities, including industrial ones, using Earth remote sensing technologies from space. Scientific novelty: a model of a global automatic space monitoring system for the processes of littering of the planet Earth is proposed. A general methodology is given for constructing a geoinformation model that monitors territories for the presence of waste disposal facilities. The analysis of modern prospects in the creation and operation of such automatic geoinformation systems using certain knowledge in the field of ultra-large, distributed and open data archives, as well as modern methods for improving color images, is presented.

KEYWORDS: remote sensing of the Earth, satellite monitoring, waste disposal facilities, spatial data processing, global monitoring system for landfills and industrial waste

¹ North Ossetian State Medical Academy, 40, Pushkinskaya str., Vladikavkaz, Republic of North Ossetia — Alania, 362019, Russia, *e-mail*: marettak@bk.ru

² State Scientific Institution “Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring ‘AEROCOSMOS’”, 4, Gorokhovskiy ln., Moscow, 105064, Russia, *e-mail*: 7283763@mail.ru

³ Financial University under the Government of the Russian Federation, 49, Leningradsky ave., Moscow, 125993, Russia, *e-mail*: 7283763@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail*: vstikunov@yandex.ru

⁵ Chinese University of Hong Kong, Institute of Space and Earth Information Science, Shatin, New Territories, Hong Kong, China, *e-mail*: huilin@cuhk.edu.hk

INTRODUCTION

Currently, the planet Earth is experiencing a triple crisis: climate change, loss of biodiversity and environmental pollution. This was stated by UN Secretary-General Antonio Guterres, addressing the participants of the One Ocean Summit, which took place in France on February 9–11, 2022.

The littering of the planet is becoming an increasingly serious problem that we face in the modern world. Plastic waste, air and water pollution, improper waste disposal — all this damages the environment and can have long-term consequences for the planet and life on it.

Threat to biodiversity. Pollution and littering of the planet cause serious damage to biodiversity. Waste, especially plastic, ends up in the seas and oceans, threatening marine organisms and ecosystems. Many animals and plants are at risk of extinction due to the impact of debris on their natural habitats. In the long term, this can lead to disruption of ecosystems and loss of unique species.

Consequences for human health. Environmental pollution, including water and air, has a negative impact on human health. Harmful substances contained in waste and emissions can lead to various diseases, including respiratory and food infections, cancer and problems with the immune system. Long-term exposure to a polluted environment can have serious health consequences for future generations.

Climate change. Garbage and waste play a role in climate change. Uncontrolled waste incineration and greenhouse gas emissions lead to an increased greenhouse effect and global warming. In the long term, this can lead to rising temperatures, changing climatic conditions, changing seasons, rising sea levels and other climatic disasters that have a negative impact on life on Earth.

Threat to ecosystems and natural resources. Littering the planet can lead to the destruction of ecosystems and depletion of natural resources. Damaged ecosystems cannot perform their functions, such as purifying air and water, ensuring soil fertility and maintaining biological balance. The depletion of natural resources, such as forests and water reserves, creates unpredictable consequences for living organisms and economic development.

Global responsibility and challenges. The littering of the planet is a global problem that requires urgent and coordinated action by the entire world community. This calls for changes in consumer behavior, the development of environmentally sustainable technologies, waste reduction and improvement of the waste management system. The long-term prospects for littering the planet require awareness and action on the part of governments, businesses, and each individual.

To combat such a global phenomenon as the littering of the planet Earth, it is necessary to fully utilize the capabilities of modern technologies, in particular, technologies for creating a digital image of the planet Earth, coupled with technologies for remote sensing of the Earth from space. The problem of littering can be considered as the creation of a new layer on the Earth's surface (on land and in water areas) with an uneven thickness (where there are more accumulations of debris, there is a thicker layer). In order to prevent an increase in the thickness of this layer, it is necessary to have a system for global monitoring of the processes of littering planet Earth using geoinformation technologies and technologies for remote sensing of the Earth from space, which could provide the world community with objective information about the processes of littering and their impact on the environment in real time to make effective management decisions both at the level of individual states and at the level of the global community.

The proposed article is based on the works of an outstanding Russian scientist in the field of creation and practical application of space environmental monitoring systems, Academician of the Russian Academy of Sciences Bondur [Bondur, Savin, 1992, 1995; Bondur, 2000, 2004, 2006, 2011, 2014; Bondur et al., 2003, 2009; Keeler, Bondur, 2005].

Background

Human activity on a global scale is determined by the presence of a large number of WDF and IW, which have an extremely negative impact on nature and the life of living organisms and people (Fig. 1). This is especially true for Asian and African countries. For example, everyone knows plastic islands floating in the Pacific Ocean that destroy biological species living in the water. Preventing the occurrence of spontaneous unauthorized WDF is the primary task of all countries of the world.



Littering of the Earth's surface¹



A huge amount of waste falls into the aquatic ecosystem²



Now there exist real "Garbage islands" occupying vast territories in the world ocean³



The ocean inhabitants often become the victims of the environment littering⁴



Birds and fish often take garbage for food, swallow it and die⁵



Victims of the garbage disaster influence⁶



Death by garbage⁷



Plastic and waste⁸



Furnaces of hell⁹

Fig. 1. Impact of WDF and IW on the environment

¹ Web resource: <https://global-tomsk.ru/news/id/3164> (accessed 09.30.24)

² Web resource: <http://interesno.cc/article/15443/20-letnij-junosha-reshil-globalnuju-problemu-musora-v-okeanah> (accessed 09.30.24)

³ Web resource: <https://ria.ru/20160914/1476976058.html> (accessed 09.30.24)

⁴ Web resource: <https://zen.yandex.ru/media/id/5d2ae9a9998ed600acf9ad6a/issledovaniia-pokazyvaiut-cto-sotni-a>

[kul-i-skatov-zaputalis-v-plastikovyh-othodah-5d2af2af14f98000ac62201c](https://zen.yandex.ru/media/id/5d2ae9a9998ed600acf9ad6a/issledovaniia-pokazyvaiut-cto-sotni-a) (accessed 09.30.24)

⁵ Web resource: <https://plasticchange.dk/videnscenter/fakta-om-plastik-i-havet/> (accessed 09.30.24)

⁶ Web resource: <https://prostolike.net/life/fotofakty-zhestokaya-pravda-o-posledstviyah-zagryazneniya-okruzhayush>

[hej-sredy.html](https://prostolike.net/life/fotofakty-zhestokaya-pravda-o-posledstviyah-zagryazneniya-okruzhayush) (accessed 09.30.24)

⁷ Web resource: <https://lenta.ru/articles/2019/03/24/trash/> (accessed 09.30.24)

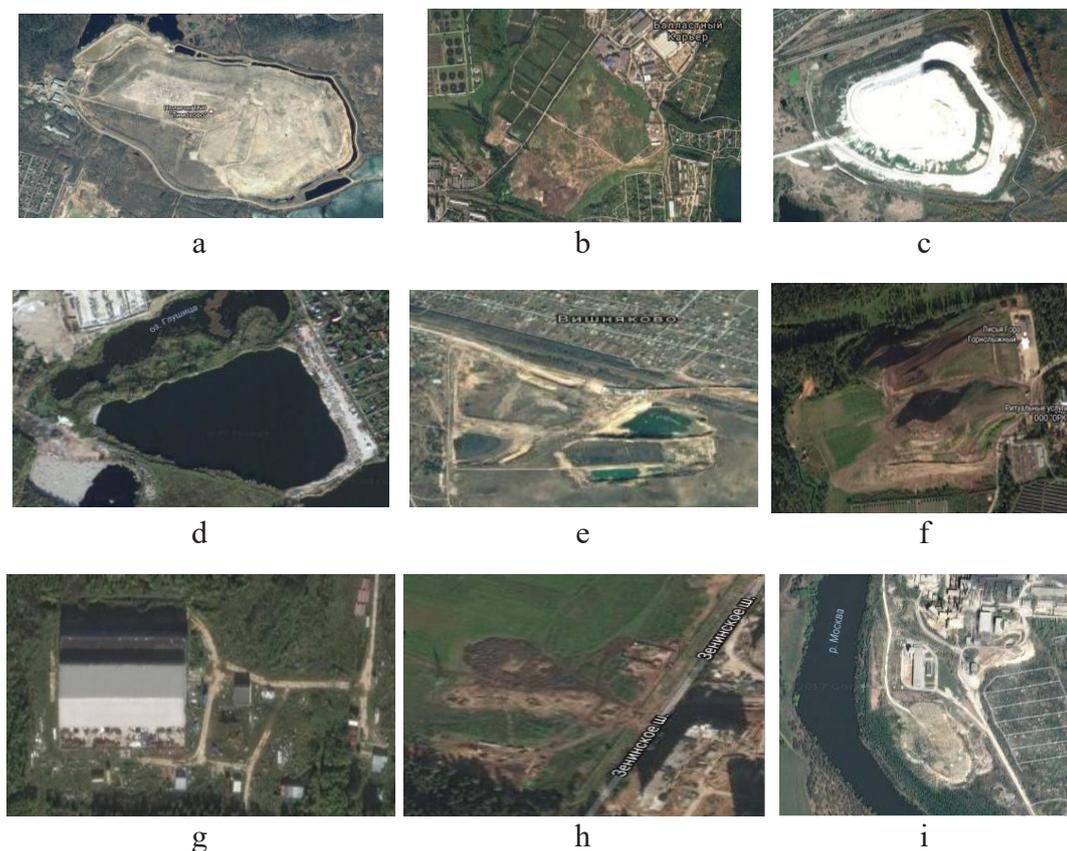
⁸ Web resource: <https://lenta.ru/articles/2019/03/24/trash/> (accessed 09.30.24)

⁹ Web resource: <https://lenta.ru/articles/2019/03/24/trash/> (accessed 09.30.24)

In the work, research is being conducted in the field of waste disposal facilities (WDF), which will be considered when creating a global remote monitoring system. WDF are a source of danger associated with atmospheric air and soil pollution, and pose a real threat to humans and the environment [Richter, 2018; Kazaryan et al., 2019; Kazaryan, Voronin, 2020]. WDF is a concept that includes the following facilities: landfills of solid household and industrial waste (SHW and IW) (Fig. 2a), municipal urban landfills (Fig. 2b), landfills (Fig. 2c), unauthorized landfills (Fig. 2g), recultivated quarries (Fig. 2d), recultivated landfills (Fig. 2e), cluttering of the territory (Fig. 2g), typical landfills (Fig. 2h), industrial landfills (Fig. 2i).

Let's now consider the ideology of creating a global system for remote monitoring of waste disposal facilities (WDF), including industrial (IW) — (GSDM_WDF and IW).

It should be noted that similar studies on remote monitoring are actively conducted all over the world [Lavrova et al., 2015; Loupian et al., 2016], as well as in the leading specialized research institutes of our country [Putilina, 2015; Aristov, 2019] and the same topic is the object of mass media quite often published on the Internet. The relevance of research in the field of application of Earth remote sensing technologies is obvious. This is due to the range of problems created by the appearance of unauthorized WDF and IW, as well as the resulting consequences in all spheres of human activity.



*Fig. 2. A variety of WDF presented in satellite images:¹
a) SHW — landfill; b) urban municipal landfill; c) Belaya Gora — landfill;
d) landfill — unauthorized; e) quarry — recultivated; f) landfill — recultivated;
g) territory with clutter; h) landfill — construction; i) landfill — industrial*

¹ Moscow Region. Map data by Google

RESEARCH MATERIALS AND METHODS

Learn more about monitoring territories for the presence of WDF.

Ground-based methods for detecting and conducting research are quite well developed. There are a sufficient number of publications on this topic [Putilina, 2015; Aristov, 2019]. The works analyze issues related to:

- methods of reclamation, operation and design of WDF landfills;
- chemical composition and associated landfill processes;
- the use of ground-based monitoring methods to study the impact of landfills on the environment;
- studies of water, air, and soil located at a certain distance from specific polygons.

The literary analysis of terrestrial methods of environmental monitoring of the WDF according to some sources has demonstrated:

- morphological composition of the landfill, frequently encountered fractions;
- a scheme of the degradation process of waste consisting of anaerobic, aerobic phases and humification with appropriate properties;
- the production of filtrate and the movement of heavy metals with laboratory studies;
- landfill gas production and its infiltration;
- production of humus and formation of organic substances;
- production of microbial fermentation and trophic groups.

The research is of a laboratory nature, and the analysis allows us to draw the following conclusions:

- WDF ground monitoring technologies in almost all countries have good scientific justification and elaboration;
- there are a large number of scientific publications on the problems of WDF and ground-based research;
- scientists conducted [Kazaryan et al., 2019] a fairly in-depth analysis of the landfill in terms of its chemical composition and the processes taking place in its body.

Let's turn now to the remote method of monitoring territories for the presence of WDF. It was only in 2007 that scientific research on WDF began. Active work is being carried out in Ukraine. These are researchers M. V. Aristov, V. S. Gotynyan, O. V. Tomchenko, and Miko-lenko. This issue is being dealt with in the NC "Nature", as well as in the "Institute of Applied Geography" [Aristov, 2019]; in Russia, similar studies are being conducted in the Krasnodar Territory, in the Irkutsk Region, etc.; in Japan, the works of researchers S. Oshi, Ya. Yatsuoka, M. Tamura are known [Moore, Hansen, 2017].

A literary analysis of WDF remote environmental monitoring methods according to some sources [Kazaryan et al., 2022, 2023] demonstrated:

- necessary conditions for detecting household and construction waste by threshold values of spectral brightness coefficients (SBC) when conducting experiments with satellite images (SI) of the QuickBird, Ikonos, IRS-1C/1D series (given the specifics of the WDF texture, it is necessary to use the WDF surface texture parameters in addition to threshold filtering);
- necessary conditions for the use of controlled classification methods and iterative methods of uncontrolled ISODATA classification — (to divide objects into classes, it is necessary to use not the ISODATA method, but to "try on" masks of standards on the image);

- decryption algorithms and the impact of landfills on the natural environment, human health, assessment of soil, vegetation, and surface water pollution;
- analysis of the environmental impact on landfills;
- dynamics of the WDF area change;
- the presence of spontaneous combustion of debris and the detection of this factor on the thermal channel by SBC and the presence of a plume of fire, smoldering.

The accuracy of SI decoding varies from 88.76 % to 98.9 % when using various processing methods.

Techniques for processing aerospace images

When conducting aerospace monitoring based on aerospace images, it is necessary to use methods for detecting WDF and IW [Kazaryan et al., 2019].

The following are used WDF detection techniques:

- 1) Vegetation Reaction Index Technique;
- 2) The technique of information feature matrices;
- 3) Visual technique;
- 4) Textural technique;
- 5) The methodology of the standard;
- 6) The methodology of the normalized vegetation index;
- 7) Interactive methodology;
- 8) Radar technique.

These techniques have a certain complexity and accuracy. They are free, but their use depends on the size of the WDF. For example, large WDF can be detected using method 1, but with less accuracy. If you use method 2, you can increase the accuracy, and small WDF can also be detected using method 2, etc.

Analyzing the work of scientists on remote monitoring, it can be concluded that there are serious developments in the processing of satellite images.

The task set for the researchers is to further develop a methodology for automated (automatic) monitoring using RSE methods and technologies, taking into account the specifics of WDF on a global scale. Further research will be devoted to this problem.

Now the whole world is faced with the emergence of the coronavirus or COVID disease. Of course, one of the factors of its appearance is the deterioration of the environmental situation around the world, which can also be facilitated by unauthorized WDF.

Developed civilized countries around the world invest large amounts of money to carry out measures to prevent the spread of landfills and sanitary and epidemiological work to prevent the spread of infectious diseases and other consequences of WDF at the state level. To work in this direction, it is necessary to have a spatial data infrastructure at the global level for effective use of them.

Spatial data (SD) here refers to some digital information (shape, location, properties) about WDF and IW, defined in a coordinate-time frame of reference. By basic spatial data, we will understand spatial data that is allowed for open publication in print and on the Internet, they have a stable spatial position in the coordinate-time frame of reference. This makes it possible to orient other spatial objects to them. Metadata is information describing the characteristics of spatial data, such as volume, content, etc.

At the moment, there is no unified system for identifying spatial data on a global scale, which makes it impossible to build a single global information space.

It is necessary to develop an SD infrastructure that will provide:

- improving the efficiency and quality of management on the scale of interested states by attracting open SD information resources to make optimal management decisions and monitor their implementation;
- obtaining reliable and up-to-date information from the SD database for consumers according to common international standards;
- reduction of SD development costs, elimination of duplication and redundancy of data;
- the need to involve budgetary funds to carry out the necessary work, as well as the involvement of information elements.

The emergence of the Internet, the widespread use of information technology, the open use by users of desktop GIS, navigators, for example (the so-called LBS) working in direct connection with satellite navigation systems have made SD a common attribute of a user working in a wide variety of fields.

More recently, it was necessary to perform a topographic survey in order to obtain an SD. Now there is no need for this, it is enough to have a satellite image, laser scanning, aerial photography, etc.

Due to the active implementation and mass character of SD, any organization and active user can have maps and a variety of applications. This facilitates the processing, analysis and visualization of information on a range of tasks to be solved using SD.

The following conclusion can be drawn — on a global scale, it is necessary to have an SD with a developed information infrastructure, which is the basis for the development of the digital economy of civilized countries.

It is very important within the framework of SD application to solve the problem of detecting unauthorized storage and proper operation of authorized SHW and SD landfills in accordance with current legislation, to assess the impact on nature. When working with SD, it is necessary to have an environmental management system based on RSE technologies from space.

To solve the problems associated with the detection of unauthorized waste disposal facilities (WDF) and industrial waste (IW), it is necessary to conduct remote methods and then field studies confirming the results.

There is also an obvious interest of the authorities responsible for the timely prevention of accumulations of solid household waste (SHW), which entail irreversible consequences both in the field of sanitary and epidemiological, and in other areas of the socio-economic and medicobiological condition of the studied region.

It should be noted that in recent years the number of spacecraft (SE) has increased in the world. This contributes to an increase in the frequency and volume of information needed for further processing.

For our task, namely, global environmental monitoring for the presence of WDF and IW, this means the possibility of detecting some negative consequences already at the early stages of the appearance of unauthorized landfills, and this is essential.

On the Internet, it is possible to obtain satellite images (SI) in open access quite simply, using various technologies.

The level of accessibility of information has also increased, respectively, on the topic of research — WDF and IW, which contributes to the use of satellite information without creating specialized additional centers for the accumulation of primary information and this is additional cost savings, increasing the profitability of the system. This fact may lead to the creation of our own super-large archives of satellite information on the topic of WDF and IW.

Simulation of the global space monitoring system WDF

The creation of a global monitoring system for waste disposal facilities, as well as industrial waste, requires the fulfillment of certain requirements that have already become classic — these are the basic elements of the global monitoring system (GSM). Regardless of the type of GSM, these elements are represented in performing certain actions with space information.

The initial project is characterized by the development of the launch complex (core) of the system, which includes the ground and space segments.

The global environmental monitoring system necessarily includes a space-based part^{1,2,3,4}, which consists of spacecraft in circular sun-synchronous orbits. On board the spacecraft there are devices for active and passive sensing with certain technical characteristics, i. e. spatial resolution in the widest possible range of the electromagnetic spectrum.

The functions of the system under development include the procedure of regular survey of the studied territory in any corner of the Earth. It is advisable at the initial stage to use the existing grouping of Russian and Chinese Earth remote sensing satellites of various spatial and spectral resolutions. In the future, spacecraft from other countries may also be involved.

Let's consider the structure of the ground-based GASCOM WDF. It is based on a certain infrastructure that forms a certain system for receiving information in the process of remote sensing. It is logical to imagine it as a distributed network for processing satellite images, and there is also a need to create duplicate universal stations for receiving satellite images.

Development of integrated automated (automatic) global space monitoring systems WDF, which combine into a single structure control and information modeling systems, equipment for collecting and transmitting information through local and global computer networks, and software complexes created for these purposes. The creation of algorithms and promising models for predicting the foci of unauthorized WDF — all this is an urgent problem of the digital economy at this level of development of human civilization.

Let's introduce a number of designations. When developing a global system for automatic space monitoring of environmental emergencies associated with unauthorized environmental littering, methods are introduced (12), namely: the global integrated methodology (GCM) (see Fig. 3), which consists of three blocks (components of the methodology) — A, B, C; the global methodology for the detection of territories (GSM1) is block A (see Fig. 4); the global methodology for estimating the parameters of WDF and IW (GSM2) is block B (see Fig. 5); global methodology for assessing the impact of WDF on nature (GCM3) — block C (see Fig. 6). The main blocks are A, B, and an additional block C. When conducting global monitoring of territories, the WDF detection process is initially carried out using the original satellite images, then the characteristics, parameters, and condition of vegetation in the studied territory are evaluated using the same information or additionally using other satellite images. This algorithm is embedded in this technique, it is quite easy to use, and does not require additional information.

Let's look at the general characteristics of blocks A–C. Let's consider the operation of block A (see Fig. 4).

¹ Web resource: http://www.ntsomz.ru/dzz_info/articles_dzz/dzz (accessed 9.30.24)

² Web resource: <http://geomatiga.ru/clauses/262/> (accessed 9.30.24)

³ Web resource: <http://www.iki.rssi.ru/earth/tes.pdf> (accessed 9.30.24)

⁴ Web resource: <https://books.google.ru/books?isbn=5457966909> (accessed 9.30.24)

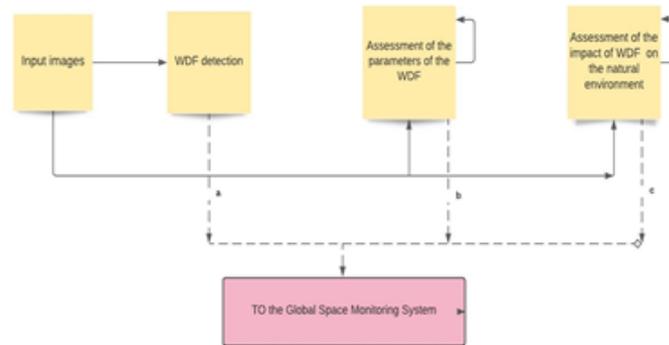


Fig. 3. General scheme of GIM: a — locations of objects, selection of objects and their components; b — parameters and characteristics of objects; c — state of vegetation on objects and in the vicinity

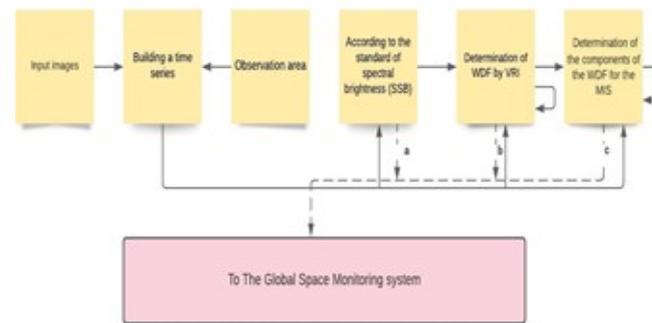


Fig. 4. General scheme of GIM1: a — locations of WDF; b — area of WDF; c — WDF components

The WDF detection process [Richter, 2018] consists of three stages:

- 1) WDF is determined by the standard of spectral brightness (ESIA);
 - 2) according to the vegetation reaction index (IRR), the detected WDF is isolated;
 - 3) according to the matrix of information features (MIP), the WDF components are isolated.
- GCM1, as a result of functioning, determines the following areas or shapes:

- the location of the WDF or footprint;
- at the moment of shooting, it determines the area or territory of the WDF coverage;
- at different points in time of filming, a series of (temporary) WDF areas is formed;
- at each moment of the survey, the maximum degradation of the soil cover of the territory under consideration is determined, forming a focus of WDF;
- isolation from satellite images of the early state of the landfill, the concept of a pre-dump is being formed;
- the allocation of the coverage area of a certain surface class or component, the area of the WDF component is formed;
- combining different landfill territories and classifying them to a certain surface class, forming the WDF surface classification.

So, the work of the WDF detection stage is formed according to the following algorithm:

- 1) determining the location of the WDF — (1);
- 2) setting the WDF area — (2)–(5);
- 3) The establishment of the WDF components is (6)–(7).

Let us proceed to the consideration of the operation of block B (Fig. 5). As is known [Richter, 2018], the main parameters or characteristics of WDF that are obtained as a result of the operation of remote sensing technologies and satellite image processing include:

- thermal characteristics — WDF surface temperature (minimum, average and maximum temperature);
- geometric characteristics on the plane — perimeter, concentration of debris, area, etc.;
- geometric characteristics in space — height, volume, slope angle, etc.

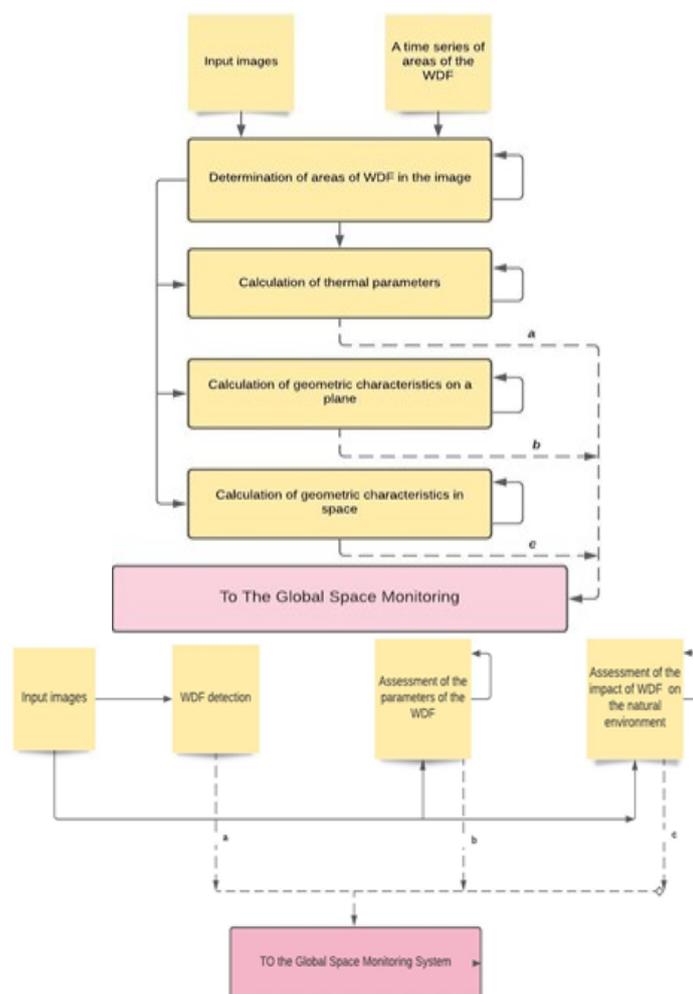


Fig. 5. General block diagram of GIM2: a — seasonal chronological changes in temperatures, characteristic surface temperatures, etc.; b — perimeter, area, concentration of litter, change of litter in the direction, etc.; c — volume, slope angle, characteristic values of height, surface area, etc.

Let's move on to the work of block C (Fig. 6).

The algorithm of the block C operation:

- at the input of the algorithm we have satellite images. (Landsat-4–8) — time series, i. e. multispectral SI of medium or high resolution — geo-linked, shooting conditions — warm season, which provides good conditions for detecting plants;
- according to the data of sub satellite monitoring, the image metadata is used to calculate the values of the XIA, which determines the factor for a fixed observation area;

- the surface temperature is determined using the SI thermal channel, which is later used as a factor for calculating the IRR;
- the NDVI index is determined using the red and infrared channels as a reaction calculated for fixed areas of the observation area;
- according to the normalized values of the factor, the IRR index is determined in accordance with the reaction at any time of the shooting.

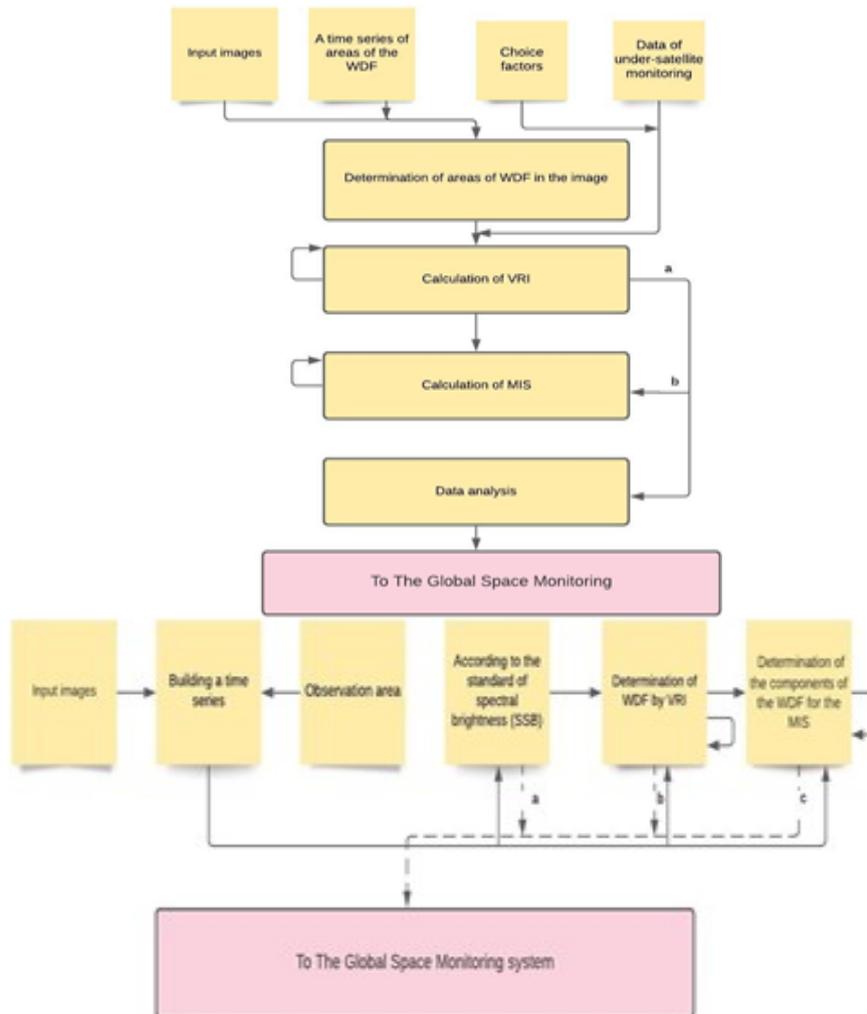


Fig. 6. General block diagram of GIM3: a — matrix of VRI values; b — matrix of MIS values

Let's consider the general scheme of the WDF global monitoring system, highlighting the work of GCM. The Global Space Monitoring System WDF consists of the following interconnected blocks:

- **Block I** is a data warehouse for existing WDF polygons. They are in the state register of municipal solid waste landfills (SHW) at this point in time;
- **Block II** is a subsystem for determining unauthorized WDF at a given time;
- **Block III** is a control subsystem for compliance with the rules of design, operation and reclamation (PEER) of existing SHW landfills;
- **Block IV** is a subsystem for developing an assessment of WDF parameters and their impact on the natural environment;

- **Block V** is a subsystem for predicting possible places of occurrence of WDF, with appropriate WDF parameters, as well as the impact of WDF on nature and human health;
- **Block VI** is a subsystem for satellite monitoring;
- **Block VII** is a subsystem for additional processing and appropriate analysis of the results of global space monitoring.

In the WDF global space monitoring system, information is transmitted according to the following principle. In block II, space images are processed using automation of space image processing in conjunction with WDF detection. The WDF detection area is compared with the information in the SHW polygon database in block I, unauthorized WDF are located, which are then recorded in block II. In block IV, the WDF parameters are evaluated for both WDF polygons located in block I and unauthorized WDF located in block II. Block V collects information when performing appropriate space monitoring technologies and methods to perform forecasting. Combining this information in block III with information from blocks I and IV, the analysis and collection of incoming data are carried out, violations of the necessary rules are determined during the operation of existing SHW landfills and the necessary environmental measures are applied. In block VII, information is collected from all blocks to perform processing and analysis of the collected information. In performing all of the above tasks, software complexes with a high level of automation, the possibility of using distributed network technologies, etc. are used.

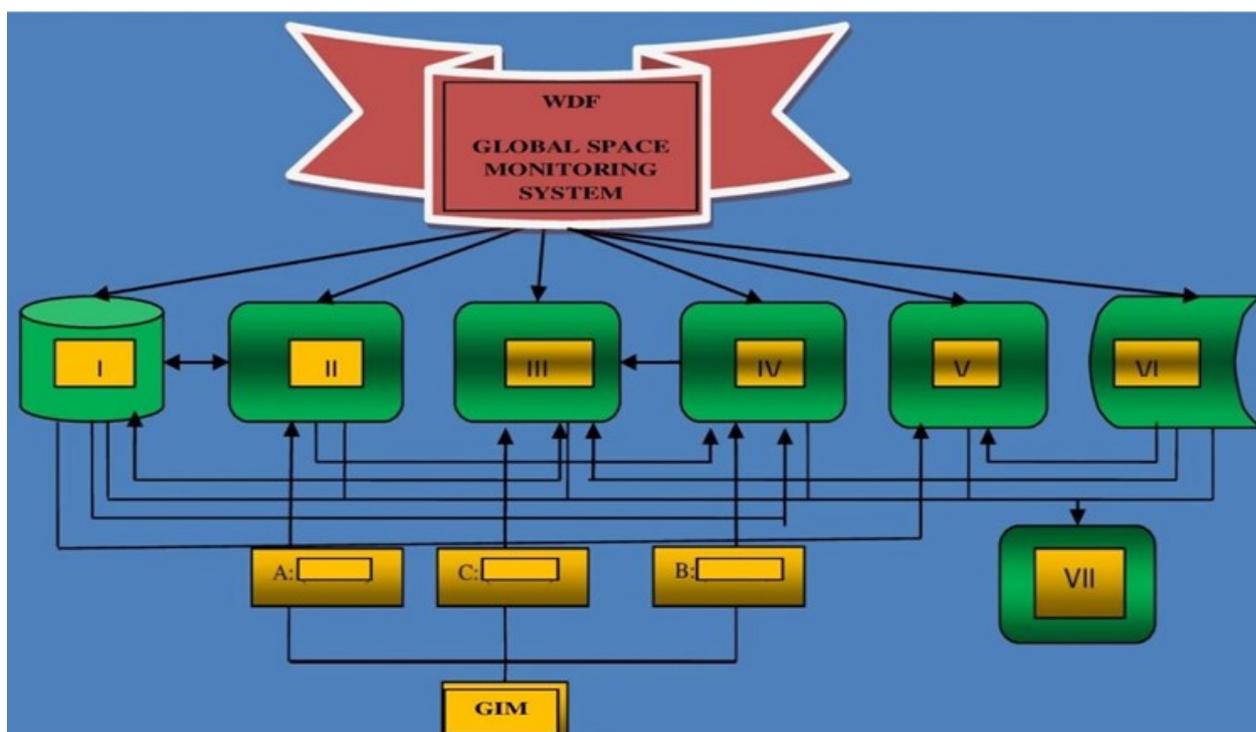


Fig. 7. Block diagram of the GMS for WDF: I — Database of municipal solid waste; II — Subsystem for detecting unauthorized WDF; III — Subsystem for monitoring the rules of solid waste landfills; IV — Subsystem for evaluating the parameters of WDF; V — Forecasting subsystem; VI — Subsystem of sub-satellite monitoring; VII — Subsystem of data analysis and processing; A — GIM1, B — GIM2, C — GIM3

Designing a global remote monitoring system (GSDM) WDF-IW

Let's look at the questions which are about organization of software development of automated reception and collection of satellite data.

We are investigating the task of creating software for the WDF and IW monitoring system according to RSE data. First of all, the situation of collecting and receiving space information is being investigated. Based on modern realities, namely, open (relatively) access to SI storage databases via the Internet, makes it possible to create specialized centers for receiving and processing SI. All information on SI from everywhere, including various funds of scientific projects, will be sent to these centers. To solve such a problem, it is necessary to have multifunctional utilities and programs for processing all kinds of SI and obtaining information for processing and monitoring territories for the presence of WDF and IW.

Let's consider the task of creating an automatic satellite data archiving system. Any system of this type should have a unit for maintaining satellite data archives, the main purpose of which is to store and provide CS to users in local and remote operation mode.

To automate this block of the monitoring system, it is necessary to use a DBMS with a built-in SQL language that allows you to work in program mode, having a friendly computer program interface, or using a SQL query system to implement a range of tasks related to the search and extraction of the necessary SI series. The information storage unit must have the following properties:

- adaptability to all types of satellite information, which can be modified over time;
- user operation in remote access mode;
- maximum automation of the preliminary stages of SI storage is annotations, archiving, and the storage process itself in the database;
- this system should be open in terms of replenishment with new SI and, accordingly, modification of technical means (servers, etc.) allocated for archives;
- and, as a rule, there should be separate geographically distributed centers in the country as information repositories and, accordingly, certain nodes of the open Internet system, physical media (CD, etc.).

Fig. 8 shows the architecture model of the automated SI archive.

Let's give some comments on each block of this model.

The first block of the archive management system includes databases for all types of information, i. e. data catalog, file storage, and long-term file storage. The archives of space data of the OZONE and software are presented in the form of a software package, which is updated depending on the tasks of users and, accordingly, researchers.

The second block, the archive administration system, includes archiving utilities, working with data, as well as sampling the necessary information for processing and supporting user orders. In the control plan of the unit, a group of operators responsible for this front of the system is attached.

The third block is the availability of archiving systems via the Internet, i. e. the corresponding web sites. This system includes user web interfaces, as well as service web interfaces. The work on managing this block is performed by operators and users who are literate in terms of information culture.

The fourth block is the system control. It includes checking web interfaces, e-mail notification of various emergency situations, checking the technical condition of computers and automatically launching special utilities — tests for checking the SI storage system as a whole. This system is open, i. e. the utilities are replenished with a variety of application programs that improve the quality of SI and modify the methods of storing them in information repositories.

So, we have a description of the WDF and IW remote monitoring model using information systems that provide work with ultra-large, distributed and replenished satellite image repositories.

We are investigating the issue related to the space information processing system. The processing of space information is presented in the form of primary and thematic processing of data. This work is carried out in two modes — automatic and automated.

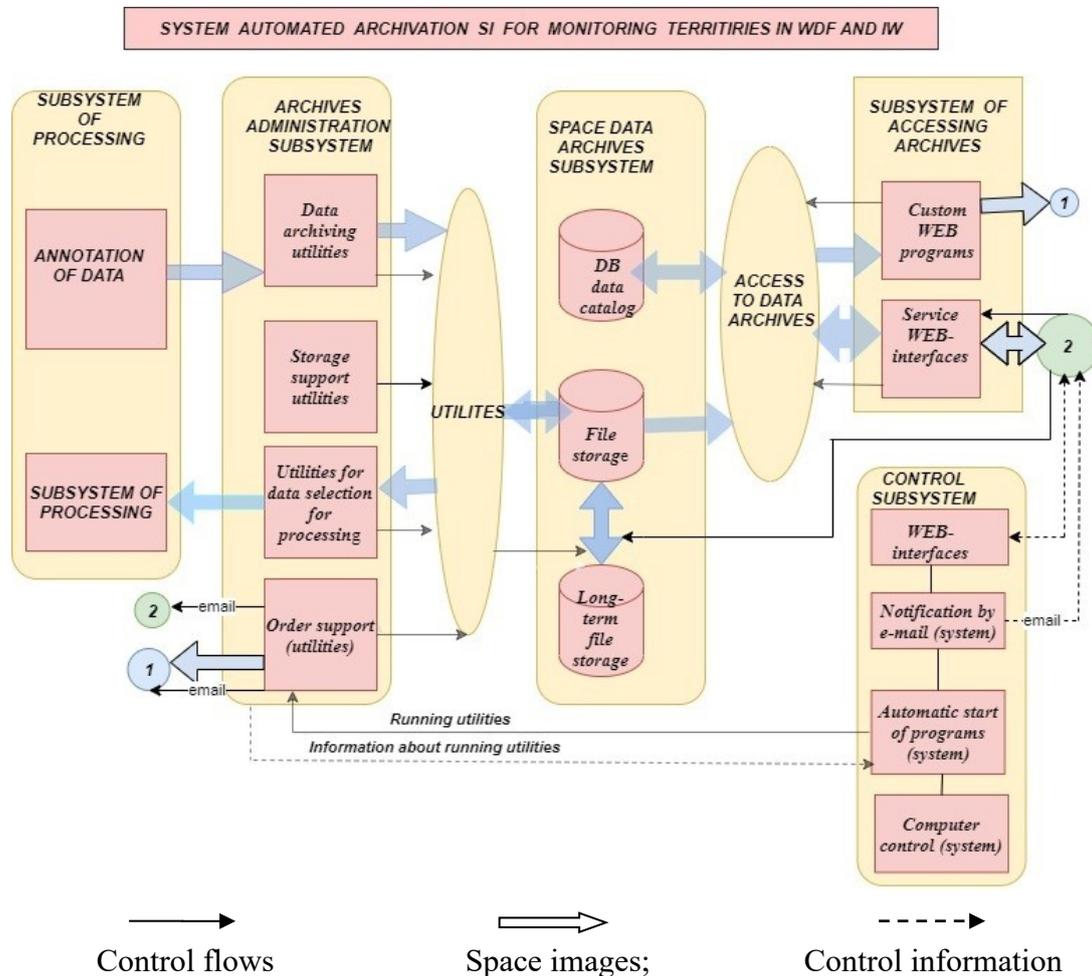


Fig. 8. Model of the architecture of the automated archive of the SI:
1 — archive operators; 2 — users

In the first case, a software package is being developed, a system of macros is used, for writing which, its own interface is provided. It provides a mode of remote access to information.

In the second case (automated), a sequential chain of information processing is created, forming data streams and parallelizing the process of processing space data. At the same time, tasks are created for workstations, their operation is monitored, which leads to an increase in production capacity. You can increase the number of workstations at any time, etc.

We are investigating the issue related to the integration of the results of space data processing with the diverse information used in the WDF and IW monitoring system.

To accomplish this task, SI data and processed results must be integrated into GIS. There are two approaches to the implementation of the task.

The first is the creation of two archives within the framework of a specialized monitoring system (SMS) WDF and IW. One ensures the collection, storage and processing of CS, the second ensures the operation of GIS. This work option requires additional resource costs. This method is

used when the monitoring system is not created from scratch. An additional unit with satellite information is inserted into the system. Therefore, a mechanism is needed here that allows you to export satellite data to GIS and insert it into its archives.

Consider the second approach. In GIS, queries are generated to obtain the necessary information from the relevant space data archives. GIS also implements interfaces that allow you to combine heterogeneous information.

This approach, which is widely used at the present time, simplifies issues related to maintaining distributed CS archives and updating information received from the spacecraft.

Let's consider the basic principles of the global remote monitoring system (GSDM), in particular WDF-IW.

Fig. 9 suggests a basic scheme for building a WDF-IW GSDM. It follows from this figure that the GSDM includes the following main blocks:

- data processing;
- maintaining archives;
- data presentation and analysis;
- management and performance monitoring.

Let's consider the work of the main blocks of the system presented in Fig. 9. Modern realities in the field of RSE are such that the preprocessing of space information moves into a new category — the formation of basic products. Basic information products have a number of qualitative properties that make it possible to carry out SI thematic processing painlessly — stable radiometric calibration, illumination, atmospheric condition, geographical and temporal reference, etc. The modern CS user is interested in receiving information in the form of basic products. In exceptional cases, data processing systems are created to obtain thematic products used in our case when monitoring territories for the presence of WDF and IW. Recently, there has been a certain situation regarding the implementation of the GSDM and the work of its individual blocks. The equipment necessary for the operation of these units is provided to the centers for receiving and processing space information. In such situations, the speed of information processing increases, since there is no need to transfer data in large volumes from the centers to the GSDM.

There is a tendency to maximize the automation of information processing in the implementation of GSDM; respectively, based on this, the work of the SI thematic processing unit in different information systems is organized in a certain way.

We have to deal with situations related to the fact that a variety of software environments are used in the processing of space information, and possibly also different operating systems. It is necessary to organize the interaction of these procedures and control over their implementation.

The implementation of distributed computing resources requires different approaches for their proper application in RSE data processing.

Data archiving (subsystem) is one of the main elements of the GSDM. Above, we described in detail this block and the principle of its operation (see Fig. 9).

The presentation and analysis of information (subsystem) is certainly one of the main elements of the GSDM. Let's consider the main factors forming this subsystem.

The first factor influencing the formation of the system is the provision of a distributed user with space information and tools for its analysis in order to ensure remote monitoring. To perform this function, it is necessary to have a web interface — this is a modern trend in the development of information systems. The advantages of these interfaces are that you do not need to purchase and maintain a large number of licenses, as is done for desktop applications, the same GIS.

The second factor is the involvement of various Internet technologies for the development of complex tools in the implementation of distributed data analysis in GSDM.

The third factor is the possibility of online access to information from external information systems, as well as to the resources of RSE providers.

And finally, speaking about the control and performance monitoring unit of the GSDM, it is important to note that in order to check its performance, it is necessary to increase the level of automation of this process. To identify system failures, it is necessary to have technologies for their automated detection and automated diagnosis.

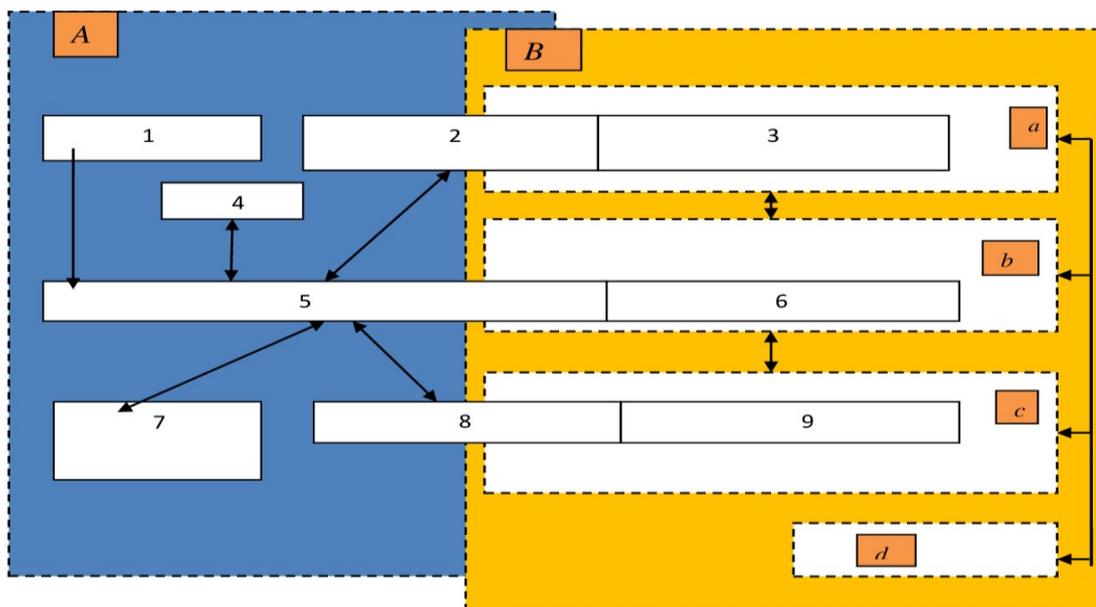


Fig. 9. The basic scheme for constructing the GSDM WDF-IW: 1 — reception, data logging; 2 — formation of special thematic products at the request of the GSDM; 3 — block for automated processing of data from the GSDM; 4 — a system for the formation of basic products; 5 — data (archives) and processed results; 6 — GSDM (archives); 7 — a system for forming “standard” thematic products; 8 — data “presentation” system; 9 — programs specialized for GSDM; A — centers for receiving, archiving, processing and distribution of SI; B — Global Remote Monitoring System (GSDM); a — subsystem for processing data of the GSDM; b — subsystem for maintaining the data archives of the GSDM; c — subsystem for presentation and analysis of data from the GSDM; d — control unit and performance monitoring

RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

Prospects for the practical implementation of an automatic global remote monitoring system

Let's look at some developments regarding the software that is developed in the basic utilities of the system.

1. The adaptation of existing image processing algorithms to the problem of research is performed. These algorithms include:

- affine transformations on the image (rotation, shift, scaling);
- image enhancement;
- object selection;

- filtering by the spectrum and size of objects, dilation, erosion, opening, closing, morphological image processing (border selection, filling in areas, selection of connected components);
- clustering and classification by methods of K-intragroup averages and ISODATA, etc.

These algorithms adapt to the characteristics of the WDF: size, distribution, component composition, spectral composition, and environmental characteristics.

2. Development of special image processing algorithms for the detection and analysis of OZONE [Kazaryan et al., 2023]. These algorithms include:

- algorithms for dividing a time series of images into a time series of sections of these images;
- algorithms for detecting textures of components in the composition of WDF and the surrounding environment;
- algorithms for evaluating the morphological composition of WDF components;
- special training algorithms for detecting WDF;
- algorithms for obtaining polygons of components in the composition of WDF and its surrounding natural environment;
- algorithms for obtaining the relief of WDF from a pair of images;
- algorithms for estimating the dynamics of changes in the surface and body of the WDF and its basic geometric characteristics;
- algorithms for evaluating chemical processes occurring in landfills;
- WDF classification algorithms based on satellite image data;
- algorithms for calculating the linearity of polygonal objects;
- algorithms for evaluating component, temperature, vegetation, technological, and other characteristics of WDF.

3. Investigation of the state of soil and vegetation [Kazaryan et al., 2019].

Special algorithms for assessing the degree of soil degradation have been developed to study the state of soil and vegetation. These algorithms are based on the calculation of vegetation reaction indices depending on various influencing factors. Factors, vegetation reaction indices, and the degree of soil degradation are presented in a normalized form. At the same time, the factors themselves are ranked according to the degree of importance according to the results of the analysis. This method of assessing the degree of soil degradation is the cheapest, because it does not require additional archival data, like most other methods of assessing soil degradation. In addition, it is fast-acting, although less accurate, and allows you to assess the tendency of the soil not only to degradation, but also to restoration. The condition of the soil is also determined by assessing the yield of the soil, since in most cases landfills are located in close proximity to rural settlements. To assess soil productivity, many algorithms based on multiple regression have been developed and implemented.

4. Evaluation of the geometric characteristics of the WDF.

Algorithms for estimating geometric characteristics of WDF are divided into algorithms for planar and spatial characteristics. A single image is used to evaluate the planar characteristics, and a stereo pair is used to evaluate the spatial characteristics.

A time series of images of a single territory is used to assess changes in geometric characteristics.

Planar geometric characteristics include area, perimeter, polygonal area, contour and contour bypass, linearity, ellipticity, center of mass, scattering coefficient, planar component parameters.

Spatial geometric characteristics include volume, spatial parameters of components, WDF body, surface relief, slope coefficient, average height of the ozone layer, number of tiers. The change in geometric parameters is divided into the average and in the direction. The direction is given by a vector on the plane for planar parameters and a vector in space for spatial parameters. The change in parameters is characterized by a rate, i. e. an increment of the parameter per unit of time. By changing the parameters, you can make a short-term forecast of future values of geometric parameters.

5. Development of attribute databases. Attribute databases are developed in database management systems. Structurally, they consist of many tables connected to each other through special connection tables. Different tables characterize objects of different types. Attribute databases have been developed: on the general information of the WDF, on individuals and legal entities associated with them, on administrative-territorial units, on the component composition of the WDF, on the spectral characteristics of the WDF, on satellite images and image metadata, etc. Each database has its own data schema, and all developed databases are combined into a data warehouse. Special programs have been developed to manage each database, which implement procedures for creating, opening, closing, replenishing, updating, etc. To combine databases into a data warehouse and manage this storage, programs are also implemented in special software environments. Each database and the data warehouse itself have their own interface that allows you to interactively manage databases. A description of databases and data warehouses has been developed. The initial data to be read by the database is normalized. Some of them are obtained using programs from textual information taken from various sources. The other part is calculated using WDF detection and analysis algorithms.

6. Development of geobases. WDF geobases are a structure of attribute and geographic data obtained in an automated mode. Geobases are built for objects of the classes “WDF”, “administrative-territorial units”, “natural objects”, “anthropogenic objects”, etc. Attribute data is signed for each object of the geobase in the form of data tables of one type or another. Geographical data is the display of an object on the map in the form of a placemark, line, polygon with georeferenced data. The geobase of data provides filtering, which is required for display and analysis.

The system of global space monitoring of the processes of littering of the planet Earth discussed above can be implemented as a joint Russian-Chinese project based on the reception and processing of remote sensing data from Russian and Chinese satellites.

With the help of this system, it is possible to automatically identify unauthorized landfills throughout the globe using artificial intelligence technology, including in marine and oceanic waters, to determine the correct operation of existing municipal solid waste landfills (SMW) in accordance with current international and national regulatory documents, to determine the order of liquidation of landfills of certain SMW landfills, depending on the degree of their negative impact on the environment and human health. The results of processing the received data can be displayed on the Internet on an interactive digital map of the Globe.

CONCLUSIONS

The paper proposes the design and further use of a global information system for remote monitoring using remote sensing methods and technologies. Here we consider the features and trends in the development of modern geoinformation systems in certain thematic areas, in our case we consider the OZONE and software. The article analyzes the current prospects in the creation and operation of such automatic geoinformation systems using certain knowledge in the field of ultra-large, distributed, and open data archives. As an implementation of theoretical reasoning, the practical part on the formation of mathematical support for the remote monitoring system of ozone and software is given. A further series of articles on this area of research is expected to be published.

ACKNOWLEDGEMENTS

It is advisable to implement the proposed system of global space monitoring of the planet Earth debris processes as a joint Russian-Chinese project within the framework of the BRICS.

REFERENCES

- Aristov M. V.* Monitoring of landfills and detection of natural landfills according to satellite imagery. *Geoprofile*, 2019. No. 2. P. 34–41 (in Russian).
- Bondur V. G.* Methods of modeling radiation fields at the entrance of aerospace remote sensing systems. *Issledovanie Zemli iz kosmosa (Research of the Earth from space)*, 2000. No. 5. P. 16–27 (in Russian).
- Bondur V. G.* Aerospace methods in modern oceanology. *New ideas in oceanology. V. 1: Physics. Chemistry. Biology*. Moscow: Nauka, 2004. P. 55–117+8 pages of color inserts (in Russian).
- Bondur V.* Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas. *Proceedings of the 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE*, 2006. 7 p.
- Bondur V. G.* Space monitoring of natural fires. *Bulletin of the Russian Foundation for Basic Research*, 2011. No. 2–3. P. 78–94 (in Russian).
- Bondur V. G.* Modern approaches to processing large streams of hyperspectral and multispectral aerospace information. *Issledovanie Zemli iz kosmosa (Research of the Earth from space)*, 2014. No. 1. P. 3–17 (in Russian).
- Bondur V. G., Argenenko N. I., Linnik V. N., Titova I. L.* Modeling of multispectral aerospace images of dynamic brightness fields. *Issledovanie Zemli iz kosmosa (Research of the Earth from space)*, 2003. No. 2. P. 3–17 (in Russian).
- Bondur V. G., Krapivin V. F., Savinykh V. P.* *Monitoring and forecasting of natural disasters*. Moscow: Scientific World, 2009. 692 p. (in Russian).
- Bondur V. G., Savin A. I.* The concept of creating environmental monitoring systems for ecological and natural resource purposes. *Issledovanie Zemli iz kosmosa (Research of the Earth from space)*, 1992. No. 6. P. 70–78 (in Russian).
- Bondur V. G., Savin A. I.* Principles of modeling signal fields at the input of DZ equipment of aerospace environmental monitoring systems. *Issledovanie Zemli iz kosmosa (Research of the Earth from space)*, 1995. No. 4. P. 24–34 (in Russian).
- Kazaryan M. L., Richter A. A., Shahramanian M. A., Nedkov R. D.* *Monitoring and forecasting of socio-economic development of regions based on the analysis of satellite images (using the example of solid waste disposal facilities and their impact on the environment)*. Moscow: INFRA-M, 2019. 256 p. (in Russian).
- Kazaryan M., Shahramanian M., Semenishchev E.* Unauthorized landfills of solid household and industrial wastes detection in the Arctic and Subarctic territories using remote sensing technologies. *Proceedings of SPIE, V. 11856. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXIII*, 2021. 1185619. DOI: 10.1117/12.2600721.
- Kazaryan M., Shakhramanyan M., Semenishchev E.* Space monitoring to control the dynamics of changes in the resource potential of the tourist business under conditions of increased risk of emergencies. *Proceedings of SPIE, V. 12514. Image Sensing Technologies: Materials, Devices, Systems, and Applications X*, 2023. 125140L. DOI: 10.1117/12.2666562.
- Kazaryan M., Shahramanian M., Semenishchev E., Voronin V.* The underground surface analysis of waste disposal objects based on the neural network image processing methods. *Proceedings of*

SPIE, V. 12094. Algorithms, Technologies, and Applications for Multispectral and Hyperspectral Imaging XXVIII, 2022. 1209410. DOI: 10.1117/12.2620807.

Kazaryan M., Voronin V. Research of percolation at objects for waste disposal according to space image data. Proceedings of SPIE, V. 11397. Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications IX, 2020. 113970K. DOI: 10.1117/12.2558427.

Keeler R., Bondur V., Gibson C. Optical satellite imagery detection of internal wave effects from a submerged turbulent outfall in the stratified ocean. Geophysical Research Letters, 2005. V. 32. Iss. 12. L12610. DOI: 10.1029/2005GL022390.

Lavrova O. Yu., Loupian E. A., Mityagina M. I., Uvarov I. A., Bocharova T. Yu. See the Sea-Multi-User Information System Ocean Processes Investigations Based on Satellite Remote Sensing Data. Bollettino di Geofisica teorica ed applicata. An International Journal of Earth Sciences, 2015. V. 54. P. 146–147.

Loupian E. A., Mazurov A. A., Flitman E. V., Ershov D. V., Korovin G. N., Novik V. P., Abushenko N. A., Altyntsev D. A., Koshelev V. V., Taschilin S. A., Tatarnikov A. V., Csiszar I., Loboda T., Sukhinin A. I., Ponomarev E. I., Fonin S. V., Belov V. V., Matvienko G. G. Satellite monitoring of forest fires in Russia at federal and regional level. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2016. V. 11. No. 1. P. 113–145.

Moore R. T., Hansen M. C. Google Earth Engine: a new cloud-computing platform for global-scale earth observation data and analysis. AGU Fall Meeting Abstracts, 2017. V. 1. 2 p.

Putilina V. S. Analytical review: the influence of organic matter on the migration of heavy metals in solid waste storage sites. Ecology. A series of analytical reviews of world literature, 2015. No. 76. P. 1–100.

Richter A. A. Comprehensive methodology for automated detection and evaluation of parameters of waste disposal facilities based on satellite imagery data. Dissertation ... PhD of Technical Sciences. Moscow: Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring “AEROCOSMOS”, 2018 (in Russian).

И. А. Рыльский¹, М. А. Потапов², А. Н. Панин³, Р. В. Груздев⁴

СРАВНЕНИЕ КАЧЕСТВА СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА ЗАЛЕСЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ ПО ДАННЫХ АЭРОФОТОСЪЕМКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ PHOTOMOD И METASHAPE

АННОТАЦИЯ

Выполнение цифровой фотосъемки в видимом диапазоне и последующее моделирование рельефа в масштабе 1: 2 000 и крупнее на территории залесенных районов обычно считается сложной или трудно решаемой задачей. В настоящее время основным методом решения этой задачи является метод воздушного лазерного сканирования, при котором цифровая фотосъемка проводится, но используется в основном для создания цифровых ортофотопланов, при этом источником информации о рельефе служит лазерного сканирование (благодаря возможности лазерных импульсов проникать сквозь кроны деревьев). В силу более низкой стоимости цифровая аэрофотосъемка без лазерного сканирования может быть коммерчески привлекательна для ряда заказчиков. По этой причине в работе ставилась задача оценить возможности по использованию для этих целей двух наиболее популярных в Российской Федерации программных средств — Photomod и Metashape. В качестве тестового полигона был выбран участок Южной Сибири, на территории которого представлены различные типы сочетаний форм рельефа и различной по густоте растительности. Исходный залет выполнен в соответствии с требованиями масштаба 1: 2 000 под шаг горизонталей в 1 м, при этом применено более высокое поперечное перекрытие залета (до 50 % вместо 30 %). Съемка выполнена с использованием беспилотного летательного аппарата в видимом диапазоне. В работе приведены сведения о качестве выполненных фотограмметрических работ с использованием как аппаратных средств регистрации элементов внешнего ориентирования, так и наземных контрольных и опорных точек. Не все участки местности могут быть картографированы с соблюдением требований данного масштаба. В работе проводится анализ полученных результатов, оценка применимости того или иного программного продукта, особенностей полученных наборов данных. Итоговые выводы содержат информацию о применимости данного метода в сочетании с программными средствами, ограничениях возможностей его применения. Проведено сравнение временных затрат на решение идентичных задач в разных программных комплексах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аэрофотосъемка, 3D-точки, Photomod, Metashape, залесенная территория, цифровая модель рельефа

¹ Московский государственный университет, географический факультет, Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991, e-mail: rilskiy@mail.ru

² Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, Горный институт, Весенняя ул., д. 28, г. Кемерово, Россия, 650000, e-mail: potapovma@kuzstu.ru

³ Московский государственный университет, географический факультет, Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119234, e-mail: alex_pandin@mail.ru

⁴ ФГБУН Институт природных ресурсов, экологии и криологии, Сибирское отделение РАН, ул. Недорезова, 16а, а/я 1032, Чита, Россия, 672002, e-mail: roguzdev@mail.ru

Ilya A. Rylskiy¹, Mikhail A. Potapov², Alexandr N. Panin³, Roman V. Gruzdev⁴

COMPARISON OF THE QUALITY OF CREATION OF A DIGITAL TERRITORY MODEL OF A FORESTED TERRITORY FROM AERIAL PHOTO DATA USING PHOTOMOD AND METASHAPE SOFTWARE COMPLEXES

ABSTRACT

Performing digital photography in the visible range and subsequent terrain modeling at a scale of 1: 2 000 and larger in forested areas is usually considered a complex or difficult task. Currently, the main method for solving this problem is the airborne laser scanning method, in which digital photography is carried out, but is used mainly to create digital orthophotos, while the source of information about the terrain is laser scanning (due to the ability of laser pulses to penetrate through tree crowns). Due to its lower cost, digital aerial photography without laser scanning may be commercially attractive to a number of customers. For this reason, the task was to assess the possibilities of using for these purposes the two most popular software tools in the Russian Federation: Photomod and Metashape. An area in Southern Siberia was chosen as a test site, where various types of combinations of landforms and vegetation of varying density were presented. The initial flight was made in accordance with the requirements of the scale of 1: 2 000 with a horizontal step of 1 meter, while a higher transverse overlap of the flight was applied (up to 50 % instead of 30 %). The photographing was carried out using an unmanned aerial vehicle in the visible range. The paper provides information on the quality of photogrammetric work performed using both hardware for recording external orientation elements and ground control and reference points. Not all areas of the terrain can be mapped meeting the scale requirements. The paper analyzes the results obtained, assesses the applicability of a particular software product, and the features of the obtained datasets. The final conclusions contain information about the applicability of this method in combination with software, the boundaries and limitations of its application. A comparison was made of the time spent solving identical problems in different software systems.

KEYWORDS: aerial photography, 3D points, Photomod, Metashape, forested area, digital elevation model

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время использование цифровой аэрофотосъемки для выполнения работ по картографированию территорий Российской Федерации в масштабе 1: 500–1: 5 000 обычно ведется только в сочетании с выполнением воздушного лазерного сканирования. Это обусловлено тем, что значительная часть территории покрыта лесной или кустарниковой растительностью, которая традиционно считается «головной болью» фотограмметристов, особенно когда речь заходит о работе в масштабах крупнее 1: 25 000 — когда требуется выполнять работы с учетом требований о нанесении на карту

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

² T. F. Gorbachev State Technical University, Institute of Mining, 28, Vesennaya str., Kemerovo, 650000, Russia, *e-mail: potapovma@kuzstu.ru*

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail: alex_panin@mail.ru*

⁴ Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 16a, Nedorezova str., PO box 1032, Chita, 672002, Russia, *e-mail: rogruzdev@mail.ru*

мелких форм рельефа, бровок обрывов и прочих элементов, которые обычно трудно читаемы на фотоснимках в лесах [Korpela, 2008].

Лазерное сканирование с его возможностью проникновения лазерного луча сквозь кроны деревьев, безусловно, является «золотым стандартом» ведения высокоточных работ на лесопокрытой местности [Lohr, 1997]. Однако этот вид съемки довольно дорог и требует либо длительных работ с малых высот при использовании БПЛА, либо использование дорогостоящих тяжелых лазерных сканирующих систем, работающих с больших высот с использованием пилотируемой авиации. Амортизация дорогостоящего оборудования, время выполнения работ и ряд других моментов формируют цену данной услуги на текущий момент, и она доступна не всем заказчикам. Однако в отдельных случаях возможно использование обычной цифровой фотосъемки в видимом диапазоне с использованием относительно недорогих среднеформатных камер высокого разрешения на базе БПЛА.

Вопрос о возможности и пределах возможного в части картографирования рельефа в лесных районах в этом случае остается открытым. Конечно, при скрупулезном наборе точек в ручном режиме эта задача вполне решается в большинстве случаев. Но этот подход очень трудоемок, медленен, и, как следствие, либо затратен, либо неприемлем в части времени. Более перспективным выглядит подход с максимальным уровнем автоматизации работы, пусть даже ценой некоторого увеличения налета при съемке с целью увеличения поперечного перекрытия данных и последующего высокоавтоматизированного извлечения 3D-точек из полученного фотограмметрического блока [Chandler, 2001].

Несмотря на большое количество программных средств, решающих подобные задачи, наиболее популярными в России на сегодняшний день являются два продукта: Photomod и Metashape. Первый из продуктов традиционно любим адептами классической строгой фотограмметрии, второй более популярен у молодого поколения сотрудников.

В данной работе были поставлены следующие цели:

- оценить возможность генерации облака 3D-точек на весь фотограмметрический блок в условиях залесенной местности и сравнить время создания этих облаков, качество и оценочную точность полученных материалов;
- оценить подробность отображения рельефа разными продуктами в условиях различных ландшафтов;
- оценить качество отображения крон растительности или (в случае невозможности) полога растительности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор участка и получение данных

В качестве тестового участка для отработки вышеописанной концепции была выбрана территория Чексинского участка недр на одноименном каменноугольном месторождении. Площадь создаваемой ЦМР составила 160 км². Объект расположен на территории Кемеровской области — Кузбасса в Междуреченском городском округе и Новокузнецком муниципальном районе (рис. 1).

Рельеф местности — естественный, гористый, расчлененный сетью речных долин. Минимальная отметка местности — 279 м, максимальная — 644 м, средняя — 399 м; средний уклон местности составляет 2°, направлен на юго-запад от истоков рр. Чексу и Тутуяс к их устьям, максимальный уклон местности достигает 9° в центральной части участка на водоразделе между этими реками. Территория выполнения работ незастроенная, закрытая хвойной растительностью на 95%. Цифровая аэрофотосъемка выполнена 11 октября 2023 г.

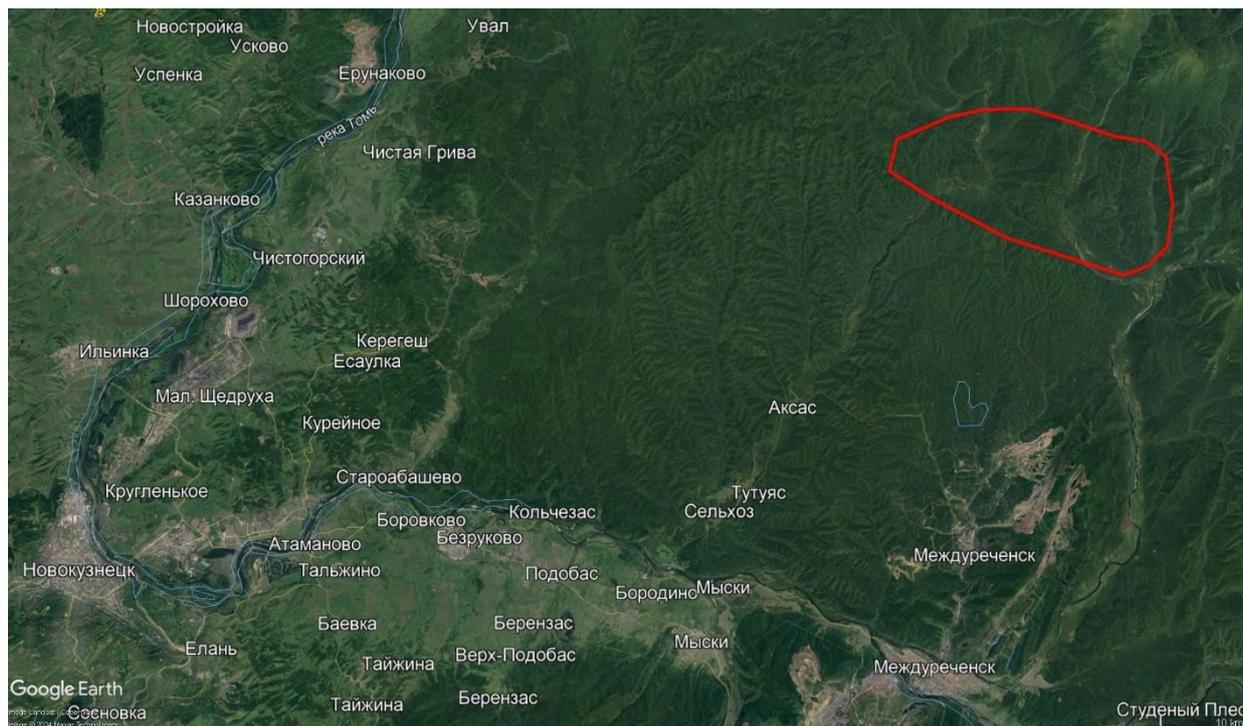


Рис. 1. Район создания цифровой модели рельефа. Красный контур — граница съемки
Fig. 1. Extent of digital terrain model. Red outline — survey boundary

В настоящее время на территории создания ЦМР проектируются и проводятся геологоразведочные работы с целью подтверждения запасов каменного угля более чем на 1 млрд т. После подтверждения запасов и утверждения технико-экономического обоснования в районе начнут проводить инженерные изыскания с целью разработки проектной документации для строительства угледобывающих предприятий и сопутствующей инженерной, перерабатывающей и транспортной инфраструктуры.

Климат района резко континентальный со значительной амплитудой температур, холодной продолжительной зимой и жарким коротким летом.

Поскольку вся данная территория предполагает полное антропогенное изменение путем открытой отработки запасов полезного ископаемого, а затем рекультивацию нарушенных земель, то получение точной ЦМР на раннем этапе геологоразведки позволит оптимизировать проектные решения в дальнейшем.

Конечная цель данной работы (с технической точки зрения) — создание цифровых моделей рельефа (ЦМР) растрового и/или триангуляционного типа, с целью последующего использования ЦМР для производства системы горизонталей и точечных отметок высот в составе либо топографических планов 1: 2 000, либо ГИС-слоев аналогичной или меньшей детальности [Капралов, 2004].

Аэрофотосъемка выполнена цифровой фотокамерой PhaseOne IXU RS 1000 (среднеформатная авиационная камера с разрешением матрицы в 100 Мп). Съемка велась с борта беспилотного самолета Лунь-20.

Залет производился по системе параллельных треков, продольное перекрытие фотоснимков составило 70 %, поперечное — от 40 до 50 %. Это больше, чем рекомендованные 30 % [Руководство, 1989], но в данном случае дополнительное перекрытие позволило наблюдать стереоэффект не только «вдоль» оси полета, но и

«поперек», что является критически важным для лесной местности. Выполнено два залета с широтным и долготным азимутом треков [Руководство, 1986].

Работа велась с высот 1 700–1 750 м над средней поверхностью рельефа. Среднее разрешение фотоснимков составило от 15,4 см. Это соответствует требованиям масштабов 1: 2 000 и 1: 5 000 с запасом по детальности согласно ГОСТ Р 59562-2021.

Перед залетами было замаркировано и закоординировано 19 опознаков от 6 базовых станций, определенных, в свою очередь, спутниковым геодезическим методом от сети дифференциальных геодезических станций «Кузбасс» в ГСК-2011 зона 15 и Балтийской системе высот 1977 г. (рис. 2 и 3).

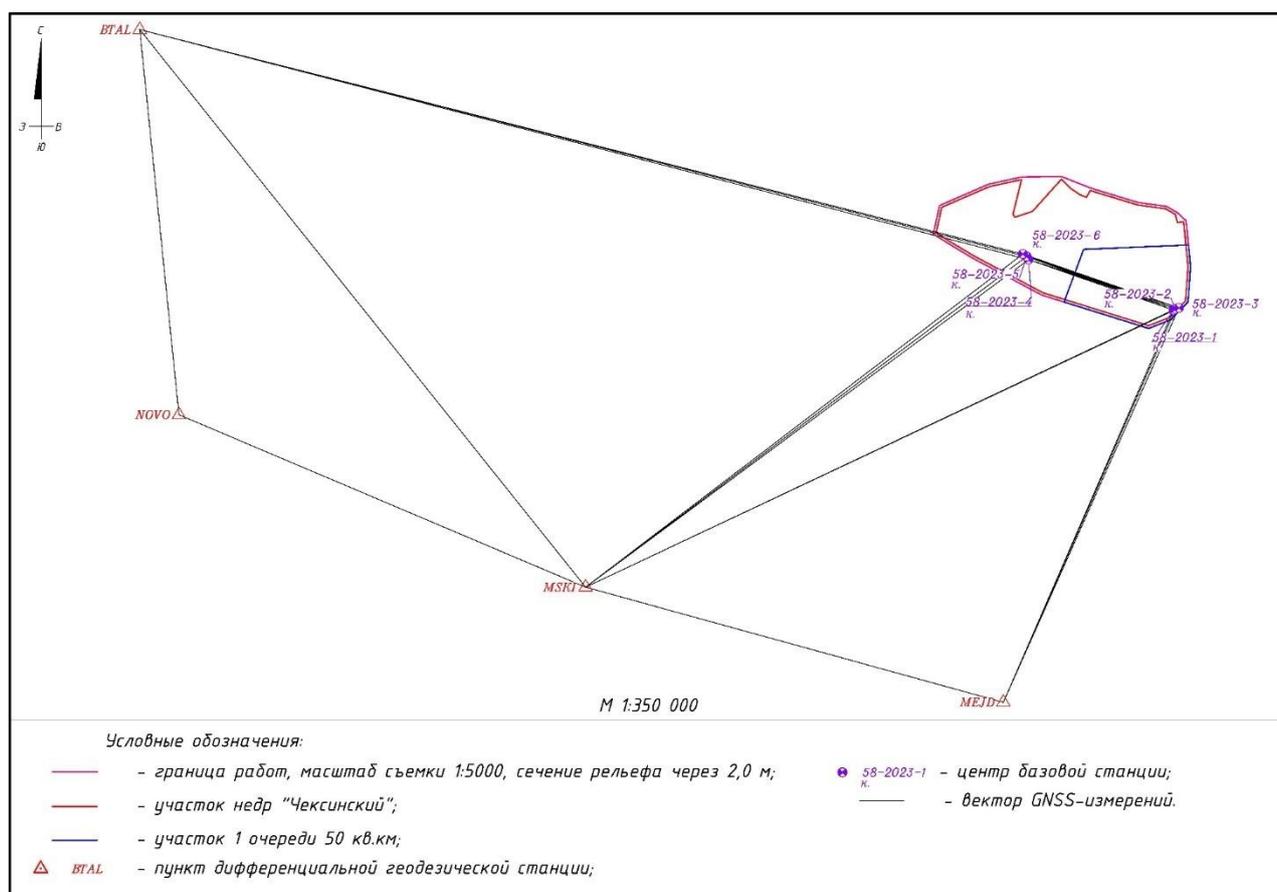


Рис. 2. Схема определения координат и высот базовых станций
Fig. 2. Scheme for determining the coordinates and heights of base stations

Координаты центров фотографирования получены путем совместной обработки кинематических измерений бортовой спутниковой антенны Javad TRE-3N, установленной на БПЛА, и наземной антенны, установленной на одну из базовых станций. Обработка спутниковых измерений выполнена в Magnet Tools 5.1. Оценка точности спутниковых измерений представлена в табл. 1. Координаты центров определены по результатам обработки GPS+ГЛОНАСС решения. Значения погрешностей в определении планового положения даны в таблицах 1 и 2 в контексте евклидова расстояния в плоскости XY.

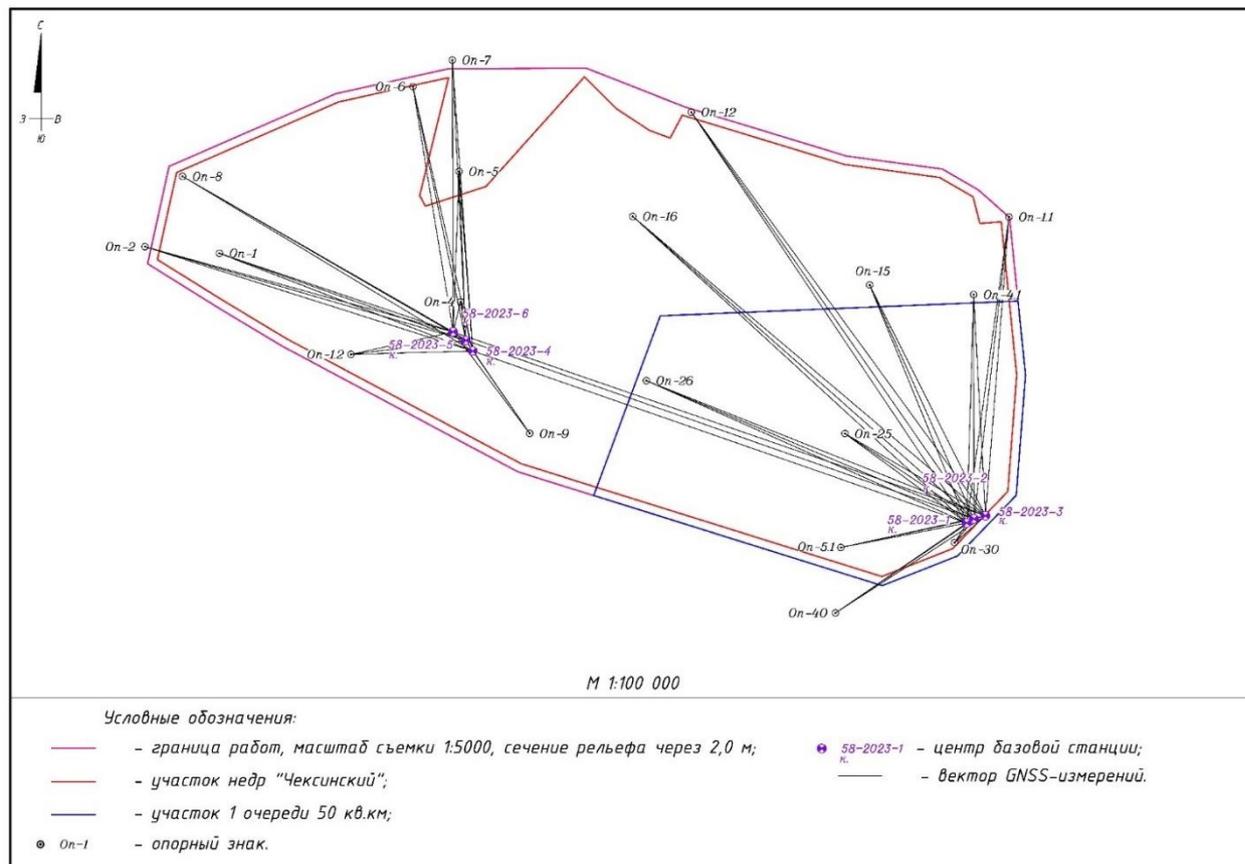


Рис. 3. Схема определения координат и высот опознаков (часть)
Fig. 3. Scheme for determining the coordinates and heights of ground control points (part)

Табл. 1. Средняя квадратическая ошибка пространственного положения
пунктов планово-высотной подготовки
Table 1. Mean squared error of the spatial position of the AFS
planning and altitude preparation points

Уровень сети	Метод спутниковых геодезических измерений	Средняя квадратическая ошибка планового положения относительно исходных пунктов, м	Средняя квадратическая ошибка высотного положения относительно исходных пунктов, м
Базовая станция	Статика	0,008	0,007
Опознак	Статика	0,017	0,006

На используемую камеру был получен сертификат калибровки, использованный как начальный при уточнении параметров при самокалибровке на опознаках. Инерциальной системы на борту не установлено, поэтому углы крена, тангажа и рыскания не включены в элементы внешнего ориентирования. Фотограмметрическое уравнивание производилось на цифровой фотограмметрической станции PHOTOMOD 7.5 методом связок и в Metashape 2.1. (рис. 4 и 5).

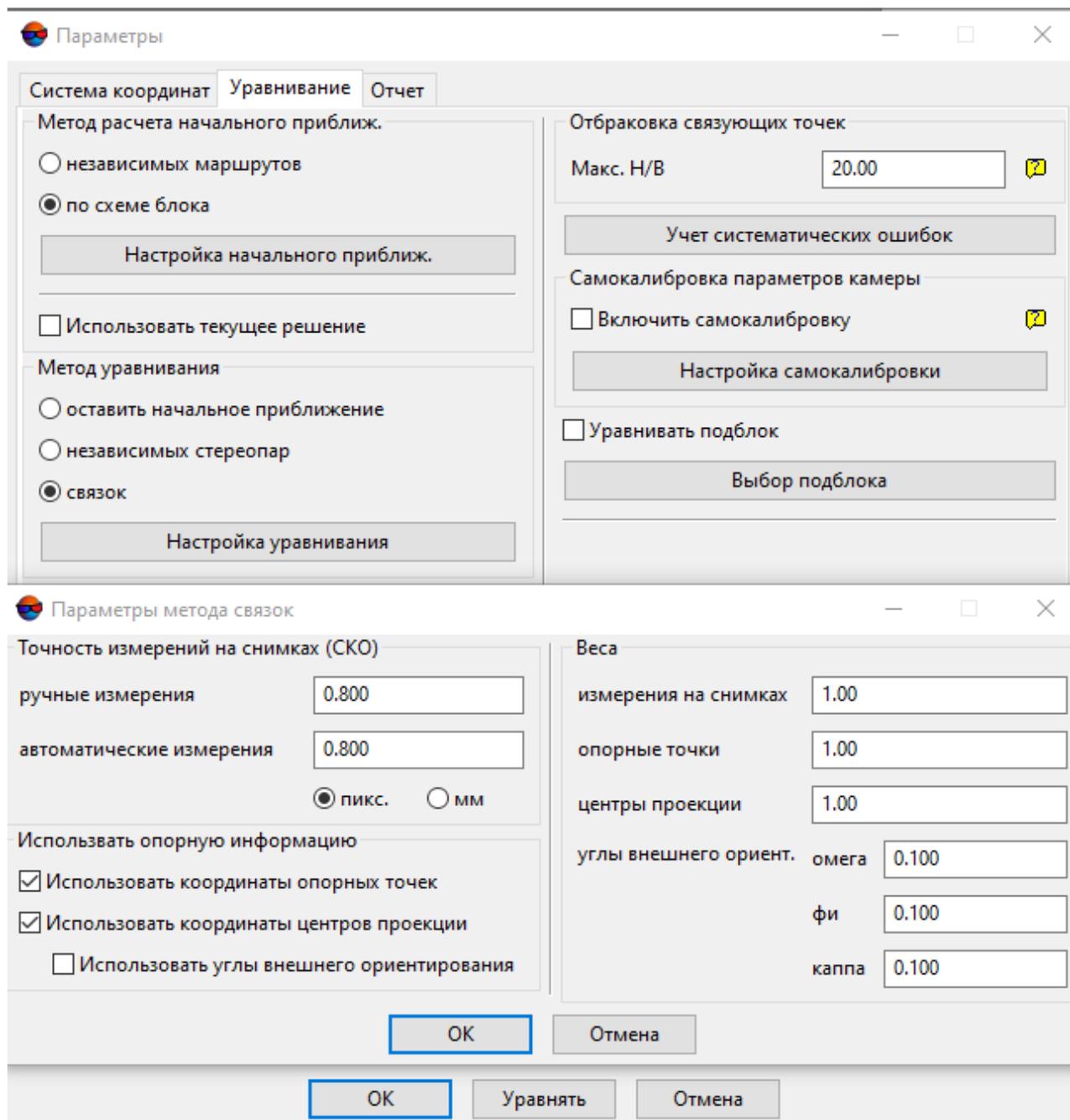


Рис. 4. Параметры метода связок при уравнивании в PHOTOMOD
Fig. 4. Parameters of the bundle method for adjustment in PHOTOMOD

Оценка точности фотограмметрического уравнивания для обоих программных продуктов представлена в табл. 2. Геопривязка, расчет параметров ориентации фотоснимков и уточнение координат центров фотографирования выполнены в каждом из видов программного обеспечения отдельно, с использованием массива опознаков. Для оценки точности использован массив контрольных точек [Rangel et al., 2018].

Табл. 2. Средняя квадратическая ошибка пространственного положения центров снимков АФС и отклонения итоговых ортофотопланов и облака точек на опознаках и контрольных точках

Table 2. The mean square error of the spatial position of the centers of the AFS images and the deviations of the final orthomosaics and point clouds at identification marks and control points

Показатель СКО	PHOTOMOD 7.5		Metashape 2.1	
	Плановое положение XY	Высотное положение Н	Плановое положение XY	Высотное положение Н
Опознаки	0.290	0.078	0.074	0.075
Центры фотографирования	0.107	0.076	0.067	0.072
Контрольные точки	0.192	0.206	0.141	0.173

По итогам обработки данных были получены фотограмметрические модели, по которым были набраны в автоматическом режиме точки на поверхности всех объектов местности и на земле, и на растительности [Mancini et al., 2013]. Для Photomod пикеты набирались с шагом в 1 м, для Metashape 2.1 шаг не может быть задан (используются настройки уровня детальности Low, Medium, High, Highest), работа велась в режиме High как на этапе уравнивания блока снимков (Alignment), так и на этапе генерирования плотного облака фотограмметрических точек (Point Cloud). Затем, используя встроенные средства фильтрации строений и растительности, были убраны объекты, отличные от класса точек «земля». Фильтрация набранных обоими методами массивов точек проводилась в ПО Terrasolid (модуль Terra Scan). Качество фильтрации проверялось визуально:

- в среде Terrasolid — методом визуального профилирования, а также методом построения системы горизонталей и их визуального сравнения;
- в стереорежиме PHOTOMOD, куда также погружались точки из Metashape и Terrasolid;
- дополнительно строились TIN-модели, а по ним — матрицы высот с шагом 1 м, анализировалось качество фильтрации на самых сложных участках местности: затененных склонах с северной экспозицией и максимально густой растительностью.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После проверки массивов точек выяснилось, что ЦФС PHOTOMOD набирает более разреженный массив точек, чем Metashape, но фильтрация растительности гораздо лучше в PHOTOMOD, чем Metashape. При этом фильтрация облака точек из Metashape в ПО Terrasolid дала наилучший результат при контроле в стереорежиме и визуально на матрицах высот.

Для сравнения облаков точек наиболее удобным методом мы считаем профилирование совместных двух облаков точек (от Photomod и от Metashape), каждое из которых отнесено к одному из классов. Для наглядности облако точек Photomod было смещено вверх на 0,3 м. Это позволило избежать «слияния» точек при профилировании и более отчетливо видеть степень полноты отображения ситуации тем или иным массивом данных.

Учитывая природно-географические особенности территории, были выделены несколько типов ландшафтов, обладающих характерными сочетаниями рельефа и растительности. Рассмотрим наиболее репрезентативные случаи.

Как видно на рис. 5, облако точек Photomod является более шумным (присутствует большое количество точек как над, так и под поверхностью, количество точек на земле в разы меньше, чем у точек Metashape. Кроны деревьев описываются точками Metashape гораздо более плотно.

Как видно на рис. 5 и 6, русловой врез ручья не читается в точках обоих типов. Облако Metashape заметно плотнее и детальнее описывает и рельеф, и кроны деревьев. Хорошо виден «шум» облака Photomod.

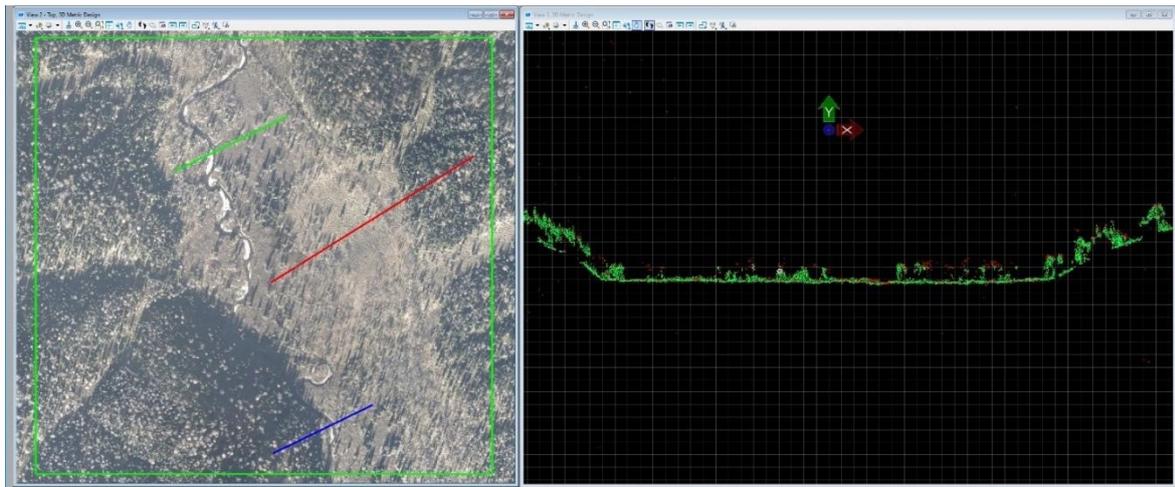


Рис. 5. Заболоченная пойма ручья с отдельными низкорослыми деревьями. Профиль по зеленой линии. Красные точки — данные Photomod, зеленые точки — данные Metashape
Fig. 5. Swampy floodplain of a stream with isolated stunted trees. Profiled along green line. Red points were generated in Photomod, green points in Metashape

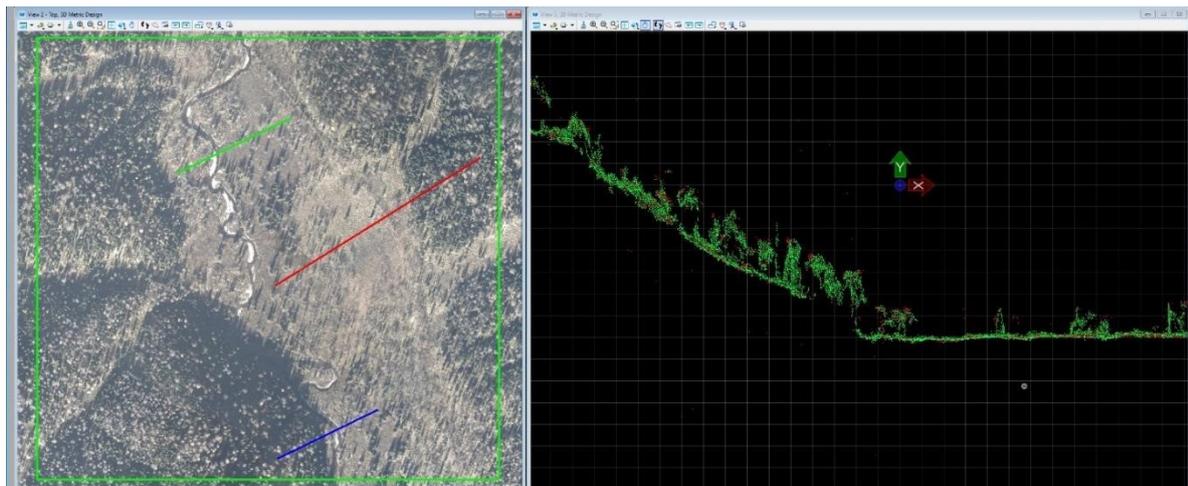


Рис. 6. Борт речной долины и пойма ручья с отдельными низкорослыми деревьями. Профиль по синей линии. Красные точки — данные Photomod, зеленые точки — данные Metashape
Fig. 6. Side of river valley with steep slope and floodplain of a stream with isolated stunted trees. Profiled along blue line. Red points were generated in Photomod, green points in Metashape

На рис. 7 и 8 видно, что в условиях редколесья оба программных продукта справляются хорошо, однако полнота отображения крон у Photomod совершенно недостаточна.

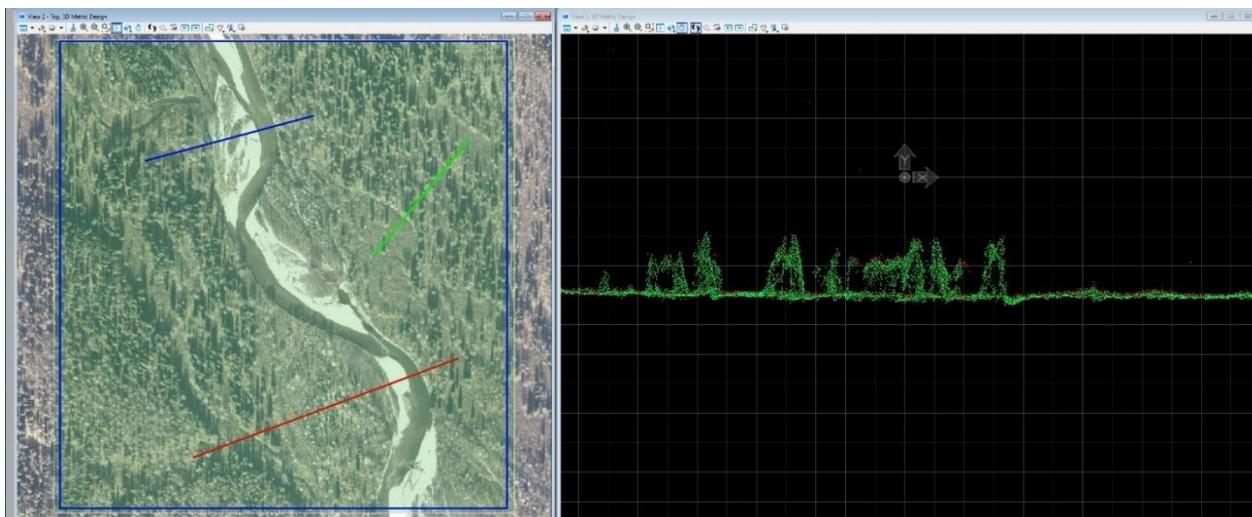


Рис. 7. Редкий высокий лес на плоском участке. Профиль по зеленой линии.
Красные точки — данные Photomod, зеленые точки — данные Metashape
Fig.7. Rare high forest on a flat area. Profile along the green line. Red points were generated
in Photomod, green points in Metashape

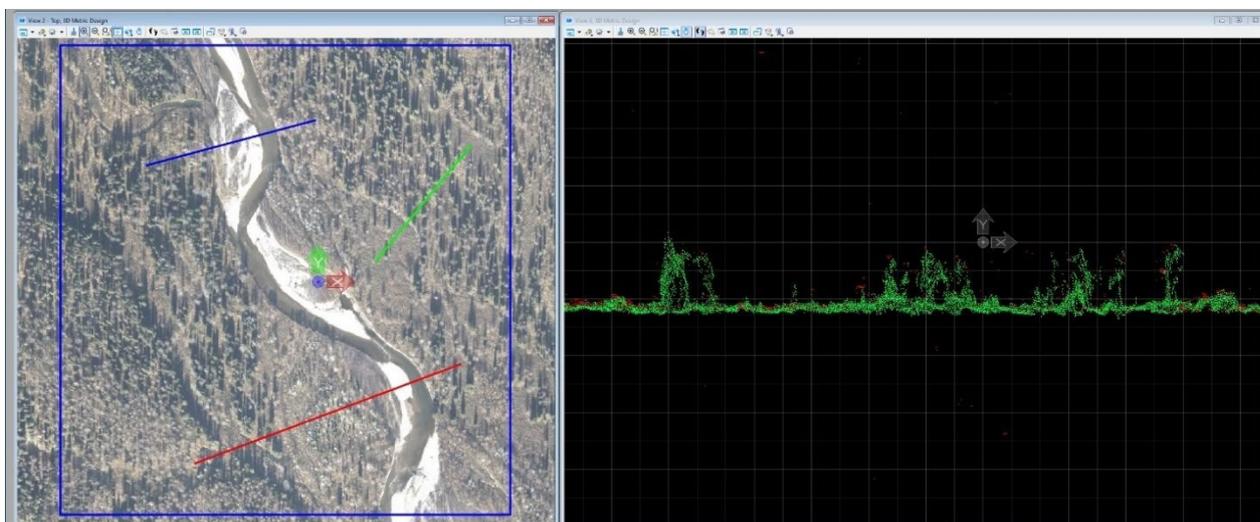


Рис. 8. Редкий высокий лес на плоском участке. Профиль по красной линии.
Красные точки — данные Photomod, зеленые точки — данные Metashape
Fig. 8. Rare high forest on a flat area. Profile along the red line. Red points were generated
in Photomod, green points in Metashape

На рис. 9 видно, что оба облака точек не позволяют идентифицировать русловой врез довольно крупного водотока, что говорит об ограниченности возможностей данного вида съемки в части картографирования микрорельефа местности [Zhang, Chen, 2001].

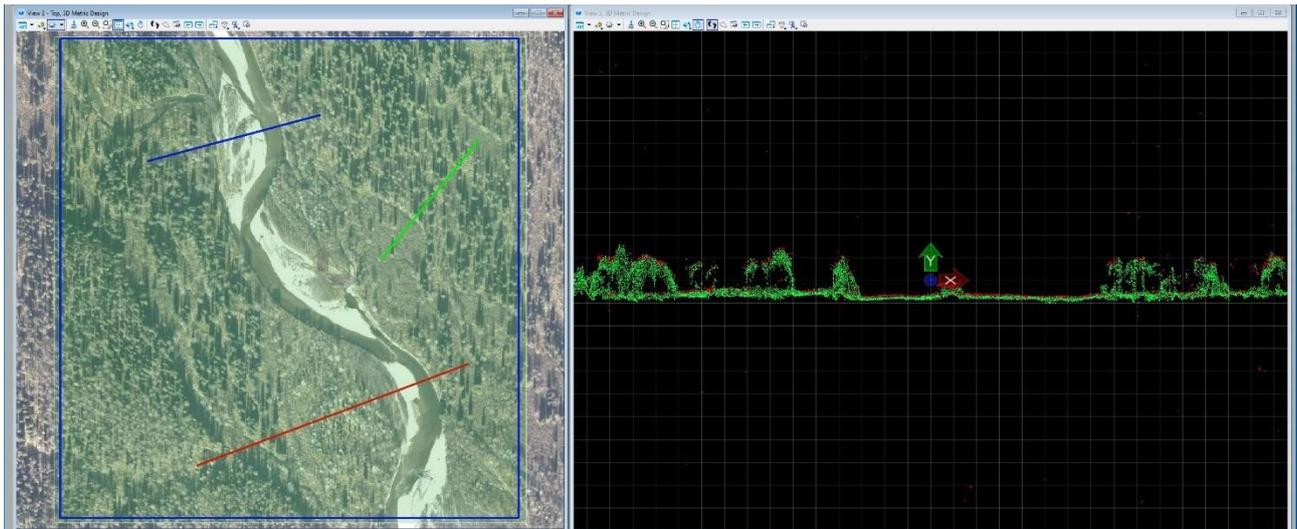


Рис. 9. Редкий высокий лес на участке с отмелями и русловым врезом реки. Профиль по синей линии. Красные точки — данные Photomod, зеленые точки — данные Metashape
Fig. 9. Rare high forest in an area with shallows and a riverbed incision. Profile along the blue line. Red points were generated in Photomod, green points in Metashape

На рис. 10 видно, что в условиях зрелого леса высотой 20–30 м полнота отображения рельефа у материалов, полученных Photomod, очень сильно падает. Качество отрисовки крон деревьев крайне низкое и не позволяет идентифицировать отдельные кроны деревьев, чего нельзя сказать о данных Metashape. Вместе с этим, в более густых участках идентифицировать рельеф не удастся (пробелы в линии рельефа на профиле).

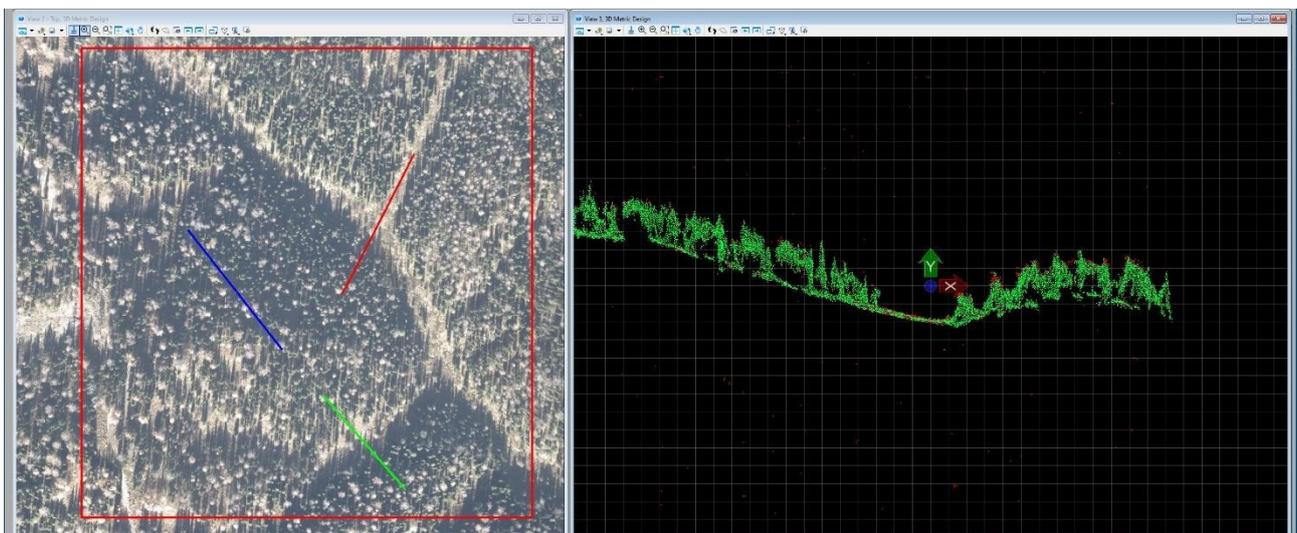


Рис. 10. Высокий лес на холмистом участке с прогалинами. Профиль по зеленой линии. Красные точки — данные Photomod, зеленые точки — данные Metashape
Fig. 10. High forest on a hilly area with clearings. Profile along the green line. Red points were generated in Photomod, green points in Metashape

Из рис. 11 следует, что в условиях густого леса с высотой первого яруса растительности до 25–30 м при высокой сомкнутости крон оба программных продукта показывают наличие обширных пропусков в части отображения рельефа под пологом леса. Плотность точек Photomod значительно ниже плотности точек Metashape в части как растительности, так и рельефа. Отметим, что наличие пропусков в данных, тем не менее, позволяет смоделировать рельеф данной местности [Wilson, 2012], однако он будет существенно менее подробным в части микроформ и общей точности.

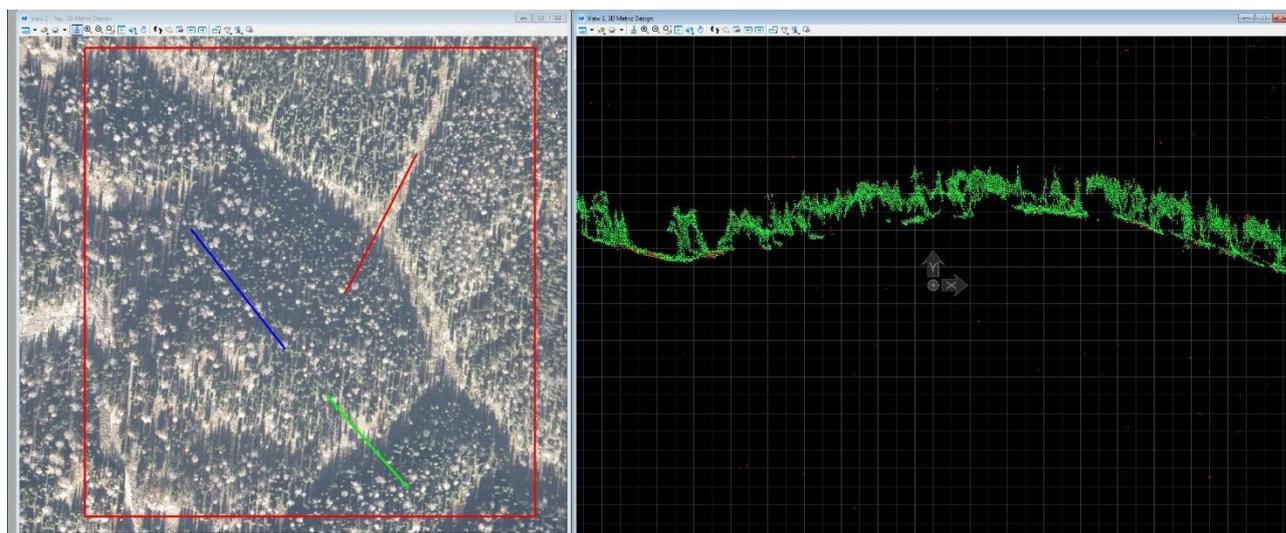


Рис. 11. Высокий и густой лес на холмистом участке. Профиль по синей линии.

Красные точки — данные Photomod, зеленые точки — данные Metashape

Fig. 11. High dense forest in a hilly area. Profile along the blue line. Red points were generated in Photomod, green points in Metashape

ВЫВОДЫ

Отметим, что выполненный залет по своему масштабу, размерам пиксела и другим параметрам соответствует требованиям залета для создания топографических планов 1: 2 000 с сечением рельефа 1 м.

По итогам проделанной работы можно утверждать следующее:

1. Облако точек рельефа, формируемое программным комплексом Photomod, существенно уступает в плотности и подробности облаку точек, формируемых Metashape 2.1.
2. Облако точек растительности, формируемое программным комплексом Photomod, крайне существенно уступает в плотности и подробности облаку точек, формируемому Metashape 2.1. В то время как данные Metashape позволяют идентифицировать отдельные кроны и их форму, материалы из Photomod дают лишь общее представление о высоте растительности.
3. Несмотря на высокую точность уравнивания исходных фотограмметрических блоков, подробность обоих видов данных недостаточна для картографирования мелких форм рельефа с перепадом 0,5–0,7 м (русовые наносы, врезы русел, мелкие водотоки) даже в условиях полностью открытой местности.
4. В условиях пойма с отдельными деревьями, редколесья и зрелого леса средней густоты данные Metashape полностью пригодны для создания продукции 1: 2 000. Данные Photomod имеют меньшую подробность.

5. В условиях густого сомкнутого леса оба программных продукта производят данные, достаточные для отрисовки рельефа с пониженной точностью и подробностью (1: 5 000–1: 10 000).
6. Общее время обработки проекта данных и генерации облаков точек у Metashape в 3,6 раза меньше, чем при использовании Photomod.

Таким образом, в условиях открытой, покрытой редколесьем или лесом средней плотности местности допустимо использовать цифровую аэрофотосъемку для построения цифровых моделей рельефа. Тем не менее, детальность полученных данных даже на открытых территориях недостаточно подробна по сравнению с данными воздушного лазерного сканирования (на которых все микроформы рельефа видны очень хорошо вне зависимости от наличия или отсутствия растительного покрова). В условиях густого леса данные цифровой съемки под масштаб 1: 2 000 недостаточно полны в части отображения форм рельефа и пригодны для производства продукции масштабов 1: 5 000–1: 10 000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Капралов Е. Г., Кошкарев А. В., Тукунов В. С. Основы геоинформатики. Учебное пособие для студентов вузов в 2-х книгах. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 480 с.

Руководство по аэрофотосъемочным работам. М.: Министерство гражданской авиации, 1986. 176 с.

Руководство по аэрофотосъемке в картографических целях. Военно-топографическое управление Генерального Штаба. М.: Редакционно-издательский отдел, 1989. 105 с.

Chandler J. H. Terrain measurement using automated digital photogrammetry. Engineering Geology Special Publications, 2001. V. 18. P. 13–18. DOI:10.1144/GSL.ENG.2001.018.01.02.

Korpela I. Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data. Remote Sensing of Environment, 2008. V. 112. Iss. 10. P. 3891–3897. DOI: 10.1016/J.RSE.2008.06.007.

Lohr U. Digital elevation models by laser scanning: principle and applications. Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1997. P. 174–180.

Mancini F., Dubbini M., Gattelli M., Stecchi F., Fabbri S., Gabbianelli G. Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: the structure from motion approach on coastal environments. Remote Sensing, 2013. V. 5. Iss. 12. P. 6880–6898. DOI: 10.3390/rs5126880.

Rangel J., Goncalves G., Perez J. The impact of number and spatial distribution of GCPs on the positional accuracy of geospatial products derived from low-cost UASs. Remote Sensing, 2018. V. 39. Iss. 21. P. 7154–7171. DOI: 10.1080/01431161.2018.1515508.

Wilson J. Digital terrain modelling. Geomorphology, 2012. V. 137. Iss. 1. P. 107–121. DOI: 10.1016/J.GEOMORPH.2011.03.012.

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. DOI: 10.1109/ICIP.2001.958278.

REFERENCES

Aerial photography guide. Moscow: Ministry of Civil Aviation, 1986. 176 p. (in Russian).

Chandler J. H. Terrain measurement using automated digital photogrammetry. Engineering Geology Special Publications, 2001. V. 18. P. 13–18. DOI:10.1144/GSL.ENG.2001.018.01.02.

Guidance for aerial photography for cartographic purposes. Military topographic administration of High Command. Moscow: Editorial and publishing department, 1989. 105 p. (in Russian).

Kapralov E G., Koshkariov A. V., Tikunov V. S. Basics of geoinformatics. Moscow: Publishing Center “Academia”, 2004. 480 p. (in Russian).

Korpela I. Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 2008. V. 112. Iss. 10. P. 3891–3897. DOI: 10.1016/J.RSE.2008.06.007.

Lohr U. Digital elevation models by laser scanning: principle and applications. Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1997. P. 174–180.

Mancini F., Dubbini M., Gattelli M., Stecchi F., Fabbri S., Gabbianelli G. Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: the structure from motion approach on coastal environments. *Remote Sensing*, 2013. V. 5. Iss. 12. P. 6880–6898. DOI: 10.3390/rs5126880.

Rangel J., Goncalves G., Perez J. The impact of number and spatial distribution of GCPs on the positional accuracy of geospatial products derived from low-cost UASs. *Remote Sensing*, 2018. V. 39. Iss. 21. P. 7154–7171. DOI: 10.1080/01431161.2018.1515508.

Wilson J. Digital terrain modelling. *Geomorphology*, 2012. V. 137. Iss. 1. P. 107–121. DOI: 10.1016/J.GEOMORPH.2011.03.012.

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. DOI: 10.1109/ICIP.2001.958278.

Elibek A. Asangaliyev¹, Baitak Apshikur², Sergey S. Lutay³, Zhanna A. Assylkhanova⁴

SPATIAL ANALYSIS AND MAPPING OF POTENTIAL WILDFIRES FROM LANDSAT SATELLITE DATA

ABSTRACT

In 2023 there was a severe forest fire on the territory of the Semipalatinsk Forest. More than 60 thousand ha were burned. This resulted in high environmental costs, destroying trees, real estate, recreational and even human lives. One of the most pressing issues was the determination of the origin and spread of forest fires. In such cases, remote sensing data is a spatial and temporal measure to obtain fast and accurate data to prevent the further spread of the fire and to neutralize this natural disaster. Using such geospatial information, it is possible to prioritize preventive measures to reduce the risk of forest fires and identify mitigating factors to increase the likelihood of immediate fire suppression in threatened areas. This work proposes to assess the fire potential and to determine the hazard potential. This is done by analyzing and mapping the area of the fire that has occurred. The mapping of the fire potential was approached from a remote sensing point of view by estimating and mapping the total vegetation cover using Landsat-8–9 OLI/TIRS DATA and the geographic information systems QGIS, SAGAGIS. A morphometric, spatial analysis of conditions was also conducted, taking into account many factors affecting fire potential-land exposure, aspect, wind direction, fire statistics, population density, climatic characteristics, etc. As a result, an attempt was made to create indices RBR, RdNBR, dNDVI, dGNDI, GEMI and BAI, which could be the basis for the determination of fire potential. These indices are based on the type of tree, the vegetation and the topographic features. These characteristics make it possible, after the classification of the Landsat images, to evaluate the reliability of the information obtained by determining the area of the fire through the Object Based Image Analysis segmentation method and by assessing the accuracy of the detected data. The index values identified were consistent with reliable information for identifying fire locations and monitoring estimated fire risk. They could be used to map fire potential from regional to local scales.

KEYWORDS: forest fire, remote sensing, landsat, SAGAGIS, QGIS, object based classification

INTRODUCTION

In the steppes of the Republic of Kazakhstan, despite the vastness of the country, there are not many forested areas. The main reason for this is the fact that most of the territory is located in arid, semiarid and desert areas. The area of forests and bushes on the territory of the Republic is 23.6 million ha. It's only 4.6 % of the total area of Kazakhstan. And the actual forest area amounts to 1.2 %, or 11.5 million ha. The studied forest reserve is the State Forest Natural Reserve "Semey ormany". It is located in the territory of the Abay region, bordering with the Eastern Kazakhstan region, with the total area of 654 179.8 ha.

¹ D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, School of Earth Sciences, 69, Protozanova str., Ust-Kamenogorsk, 070004, Kazakhstan, *e-mail:* elibek60@mail.ru

² D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, School of Earth Sciences, 69, Protozanova str., Ust-Kamenogorsk, 070004, Kazakhstan, *e-mail:* bapshikur@edu.ektu.kz

³ D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, School of Earth Sciences, 69, Protozanova str., Ust-Kamenogorsk, 070004, Kazakhstan, *e-mail:* sslutai@mail.ru

⁴ D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, School of Earth Sciences, 69, Protozanova str., Ust-Kamenogorsk, 070004, Kazakhstan, *e-mail:* ZhAssylkhanova@ektu.kz

The effects of global warming in recent years, a decrease in the amount of precipitation, an increase in summer travelers in the forest area, and fire protection of the forest fund in these regions require increased security measures. Therefore, especially in mountainous forest areas with complex terrain that makes it difficult for the forest fire monitoring service to control¹, it is necessary to introduce a new monitoring method, such as the use of remote sensing data [Yankovich et al., 2019].

Using modern remote sensing materials for this purpose can completely solve the problem that was difficult to solve before. Because it has become clear that remote sensing is an effective approach to controlling deforestation globally, nationally, and regionally. However, due to problems related to cloud cover of satellite imagery, spatial and temporal resolution of seasonal and remote sensing observations, monitoring forest degradation and recovery using remote sensing remains one of the most pressing issues [Mitchell et al., 2017]. Earth remote sensing data “ERSD” are presented in studies on flooding and its consequences for coastal forests, the method of multidimensional analysis for the identification of a flood-prone area and the development of protective structures [Apshikur et al., 2023].

The effect of the above-mentioned deficiencies in the control of forest fires is not so high, since forest fires are mainly seasonal, i. e. in the hot periods of the year, several years of seasonal remote sensing surveys are required, and statistics are monitored based on these materials. The use of multi-year remote sensing data in statistical data, both on the topic of monitoring the condition of agricultural land and on the topic of using remote sensing data with the use of intelligent GIS, is somewhat more fully expressed in studies [Rakhymberdina et al., 2022].

Currently, publicly available ERSD materials are sufficient for full-scale monitoring of natural emergencies such as forest fires, floods and surface avalanches, and droughts. Emergency monitoring, which is the subject of the study, makes it possible to reduce the high costs of material and human resources in traditional control [Rakhymberdina et al., 2022].

Currently there are a large number of software complexes that analyze remote sensing materials on various thematic maps, one of which is the need to prepare a satellite for processing materials and create thematic maps for studying the growth rate of forest clumps, the process of destruction, etc., and examples of the preparation of some maps there are studies [Toguzova et al., 2022]. And the use of a satellite for forest fire forecasting “Landsat, Sentinel-2”, taking images in a software environment is clearly described in the guide to examples of using SAGA GIS and ways to obtain the necessary data².

Methods of image classification and fire index are often used to determine temporary changes in forest areas and to analyze the degree of fire effects. The study of daily changes in the course of fire using satellite images has been studied in some works [Ongeri, Kenduiywo, 2020]. In studies on this topic, index indicators are used that give the image a change in the earth’s surface, such as the vegetation cover index “VI”, the normalized vegetation difference index “NDVI”, and the total normalized vegetation difference index “TNDVI”, etc. [Sadenova et al., 2022]. Given the differences in these metrics, they have been used in studies of the effects of differences in carbon dioxide emissions, biomass loss and ash formation on the environment, and the effects of green cover as a result of anthropogenic activities on the microbial community structure in river bed sediments [Muter et al., 2024]. These limits are used to determine the intensity of the fire and the resulting damage to the ground cover, as well as the contamination of groundwater with wastewater.

In the direction of our research direct, the following research work has been developed. This thesis is a work to determine the applied normalized combustion coefficient “NBR” and

¹ Web resource: https://www.oopt.kz/categories/view/semey_ormany/ (accessed 20.04.2024)

² Web resource: <https://sagatutorials.wordpress.com/mapping-fires-from-satellite-imagery/> (accessed 20.04.2024)

NDVI indices on Landsat satellite images to analyze three different fires that occurred in the Casorla, Nerva and Anzalcollar regions of southern Spain in 1995 and 2001. The fact that the NIR and SWIR ranges are preferred and are the most suitable bands for revealing fire characteristics studies for forest fire control using NBR and dNBR indices with the use of Landsat-7 and MODIS satellite images have been studied quite extensively [Vlassova et al., 2014]. However, it can be seen from some studies that the NDVI index is a determinant indicator of various topics on Earth [Kulenova et al., 2022]. In these studies, Landsat-8 and Sentinel-2 indices were compared and their relationship with field indices was examined. Among the indices, dNBR showed the highest correlation with segmentation-based analysis comparing Landsat-8 data with other survey data [Laurin et al., 2018]. Using Landsat-8 and Sentinel-2, a number of scientists have conducted studies of the severity of fire damage using three dNBR, dBNR, RdNBR relative, and RBR relative fire coefficients [Allen, Sorbel, 2008]. They applied reflective, thermal, and mixed measurements to the images and concluded that Sentinel-2 provided slightly better results, while NBR-based measurements provided a higher correlation for analyzing burn severity at the site, on the plants, and in the soil.

A number of studies cite data from Landsat-8–9 OLI/TIRS and Sentinel-2 and other satellites to identify factors of forest fire occurrence and the use of indices that determine the relationship of urban forests in urbanization in regulating the atmosphere of the environment [Abedzhanova et al., 2023]. This, in turn, indicates a large-scale level of use of remote sensing data.

The object studied in this article, based on the image classification method, has also been used in various studies for the identification of areas damaged by forest fires [Mitri, Gitas, 2006]. The basis of the said study, to identify the areas affected by the fire, used high-resolution data and concluded that the density of the pixels mainly affected the accuracy, which consisted in determining a total of 87 % and a kappa factor of 0.74. Studies that determined a kappa coefficient of about 0.86 using bitmaps were performed by [Polychronaki, Gitas, 2012]. It also used high-resolution images to assess the severity of the burn. To do this, they used GeoEye imagery and found an accuracy of about 72 % and 82 % for two sets of data, respectively [Dragozi et al., 2015].

Based on the analysis of scientific works, in this study we used the indicators of Landsat-8 images to determine the burned area in a homogeneous area covered by forests and agriculture with a predominance of conifers. The purpose of the study is to determine the index suitable for determining the area of the fire and mapping its severity. In this study, we conducted a study to identify the burned area and analyze the severity of the burn, covering an area of about 60 thous. ha, in addition to analyzing the satellite data, determining the indices related to the monitoring of forest fires dNBR, RBR, RdNBR, dNDVI, dGNDVI, BAI and GEMI, in order to identify the consequences of forest fires, the course of occurrence, influencing factors.

Data obtained as a result of the study were compared with the data of the State Forest Nature Reserve “Semipalatinsk ormany” and an accuracy analysis was carried out.

The practical significance of this study is that it is an attempt to use the capabilities of methods for using remote sensing and GIS technology for monitoring the said industry and to propose an appropriate methodology for mapping fire potential, in addition, model maps based on GIS obtained as a result of the study, can provide directional assistance to fire managers in.

RESEARCH MATERIALS AND METHODS

Study Area

Research area the state forest nature reserves “Semey ormany” are part of the Beskaragay, Borodulikha districts of the Abay region — Beskaragay, Borodulikha, Zharminsky, Urdzharsky, Abay, Ayagoz, Tarbagatay districts and the Beskaragay, Borodulikha districts of the forest reserve with the total area of 654 179.8 ha, located on the territory of the city of Semey (Fig. 1).

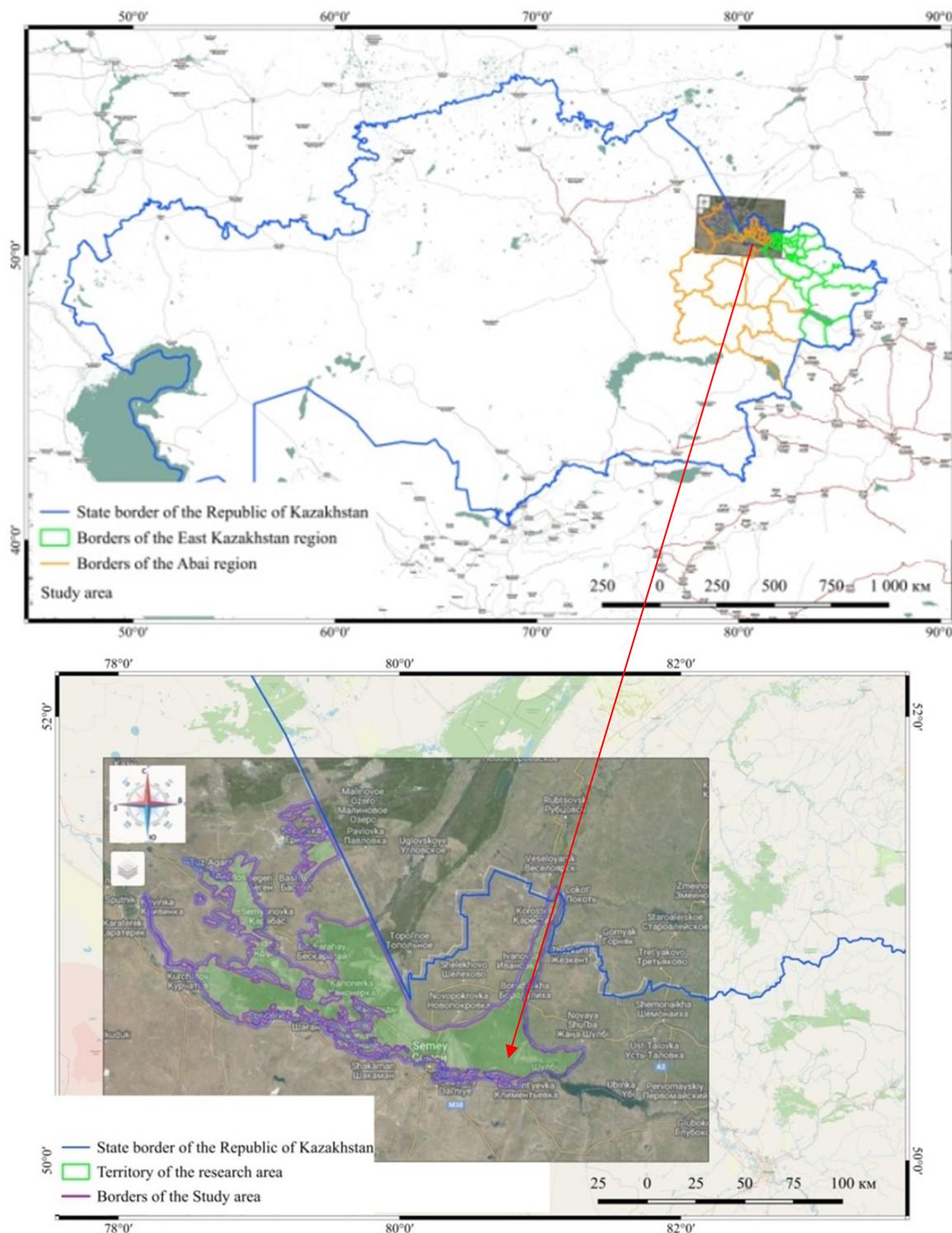


Fig. 1. Geographical location of the Semipalatinsk Forest Reserve

Geographically, the territory of the reserve is located in the Irtysh plain, Kokpekty-Shar low hills and Chingiztau mountains. Forest strips are located in the northwestern part of the East Kazakhstan Region¹. The territories of Begen, Borodulikha, Bukebay, Dolon “without floodplain forests”, Zhana semey Kanonersky, Morozov, Novoshulba, Semipalatinsk “without floodplain

¹ Web resource: [https://www.oopt.kz/categories/view/semey_ormy/](https://www.oopt.kz/categories/view/semey_ormany/) (accessed 20.04.2024)

forests” branches belong to the steppes latitude-geographical zone, the territory of Zharminsky branch — to the desert latitude-geographical zone. According to the botanical and geographical classification, the territory occupied by the forest strips along the Irtysh belongs to the Eurasian steppe region, the Trans-Volga-Kazakhstan province, the East Kazakhstan steppe subprovince, the dry fescue-grass steppe zone on chestnut soils. The studies of the soil layer of the territory on the subject of vegetation have been carried out intensively by the local scientists in the last few years [Rakhymberdina et al., 2021].

The flora of higher plants in the pine forest strips along the Irtysh is represented by a total of 201 genera, of which 61 are represented by 344 species. The basis of flora is angiosperms — 340 species, including: dicotyledons — 80.59 % “274 species”, monocotyledons — 19.41 % “66 species”. The most important forest forming species are pine “*Pinus sylvestris*”, birch “*Betula pendula*” and aspen “*Populus tremula*”.

In the conditions of Semey forest, forest areas with strong winds in the region, in addition to preventing sand avalanches and playing a protective role of structures, roads, etc., deciduous forests in the floodplain at the mouth of the Irtysh, in addition to the function of water regulation, contribute to increasing the productivity of agricultural crops, hay, pastures.

The fire in the research area occurred on June 8, 2023 and was completely extinguished on July 13 of the same year. According to the Ministry of Ecology¹, the damage caused by the fire is estimated at 165 billion tenge, of which about 30 billion tenge are direct damages, the rest are losses due to the loss of useful properties of the forest. After the fire, it was reported in the media that the government was going to allocate more than 1.2 billion tenge to the Ministry of Ecology to prevent forest fires and deal with the consequences of the fire.

Research data

A satellite image used in this study is medium resolution Landsat-8–9 OLI/TIRS Collection 2 Level 2 satellite data. The Landsat-8–9 Level 2 collection includes both Landsat-8 and the recently launched Landsat-9 satellites “provided by NASA/USGS”, which provide seasonal continental coverage. Landsat-8–9 Level 2 provides global information on surface reflection and surface temperature. Level 2 scientific products are created from the initial Level 2 Batch 1 data, which meets the solar elevation limit of $<76^\circ$ and contains the ancillary inputs necessary to create a scientific product. The resulting images provide spectral and spatial information for emergency services to create maps of the subject of interest (Table 1).

Table 1. Landsat-8 OLI & TIRS Sensors

Landsat-8–9 OLI/TIRS	Description	Wavelength (min-max)	Resolution (m)
Band 1	Coastal/Aerosol	0.433 to 0.453 μm	30
Band 2	Visible blue	0.450 to 0.515 μm	30
Band 3	Visible green	0.525 to 0.600 μm	30
Band 4	Visible red	0.630 to 0.680 μm	30
Band 5	Near-infrared	0.845 to 0.885 μm	30
Band 6	Short wavelength infrared	1.57 to 1.65 μm	30
Band 7	Short wavelength infrared	2.11 to 2.29 μm	60
Band 8	Panchromatic	0.50 to 0.68 μm	15
Band 9	Cirrus	1.36 to 1.38 μm	30
Band 10	Long wavelength infrared	10.60 to 11.19 μm	100
Band 11	Long wavelength infrared	11.50 to 12.51 μm	100

¹ Web resource: <https://24.kz/ru/news/incidents/item/622385-ushcherb-ot-pozhara-v-semej-ormany/> (accessed 20.04.2024)

Landsat-8–9 OLI/TIRS imagery from May 12, 2022, satellite imagery from June 15, 2023, during the fire, and post-fire imagery from September 27 of this year were used to analyze the pre-fire conditions of the study area.

Research methods

In this study, the state of the forest reserve territory before the fire, during the fire and after the fire is discussed on the basis of the remote sensing data. The forest reserve territory is located in the territory of the State Forest Nature Reserve “Semey ormany” Abay Region — Beskaragaysky, Borodulikha districts, where forests and agricultural land are most frequently found. The study was conducted with indices obtained from processing satellite images of Landsat-8–9 OLI/TIRS, object-based classification techniques, combustion zone and combustion intensity, and the differences in the definition of the combustion zone were compared using the corresponding plug-ins of the geoinformation systems QGIS and SAGAGIS in the publicly available, and the identification of some factors of preliminary monitoring of forest fires was analyzed.

RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

Classification of research area

After downloading the Landsat-8–9 OLI/TIRS satellite images with the required time periods, Band B4, B5, and B10 are uploaded to the SAGA GIS software for the object-based classification method of the burned area and classified by color (Fig. 2).

Since the study area was chosen as a wooded area, the bands were displayed in the order of 7,6,4 of the combination. This combination gives an image close to natural colors, but at the same time allows us to analyze the state of the atmosphere and smoke (Fig. 2, inside the red circle).

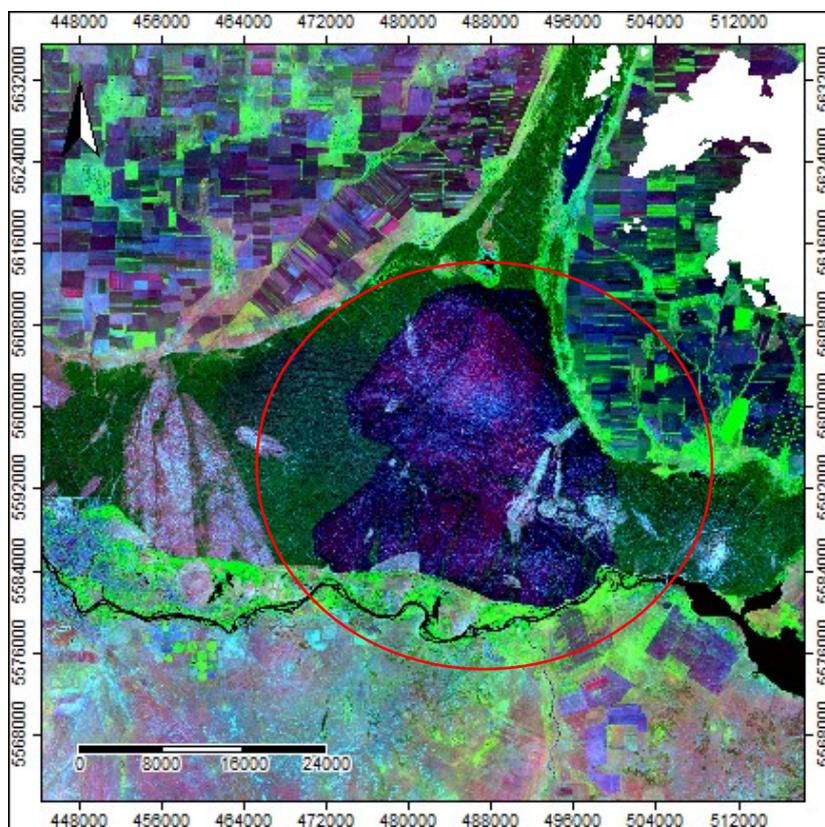


Fig 2. Classification of the burned area by color

According to the resulting map, plants appear in dark and light shades of green, urbanized areas appear in white, green-blue and red, soil, sand and minerals can have very different colors. The complete absorption of mid-infrared radiation by water, snow and ice allows you to see the coastline very clearly and emphasize water features in the image. Hot spots “such as burnt wood ash” appear red or yellow.

One advantage of using this combination of bands is that it is the most rationally selected combination for fire control.

Object-Based Classification

Using satellite imagery Landsat-8–9 OLI/TIRS C2 L2, a pre-fire, during fire and post-fire mapping of the research area is determined by object-based classification analysis of bands combinations (Fig. 3).

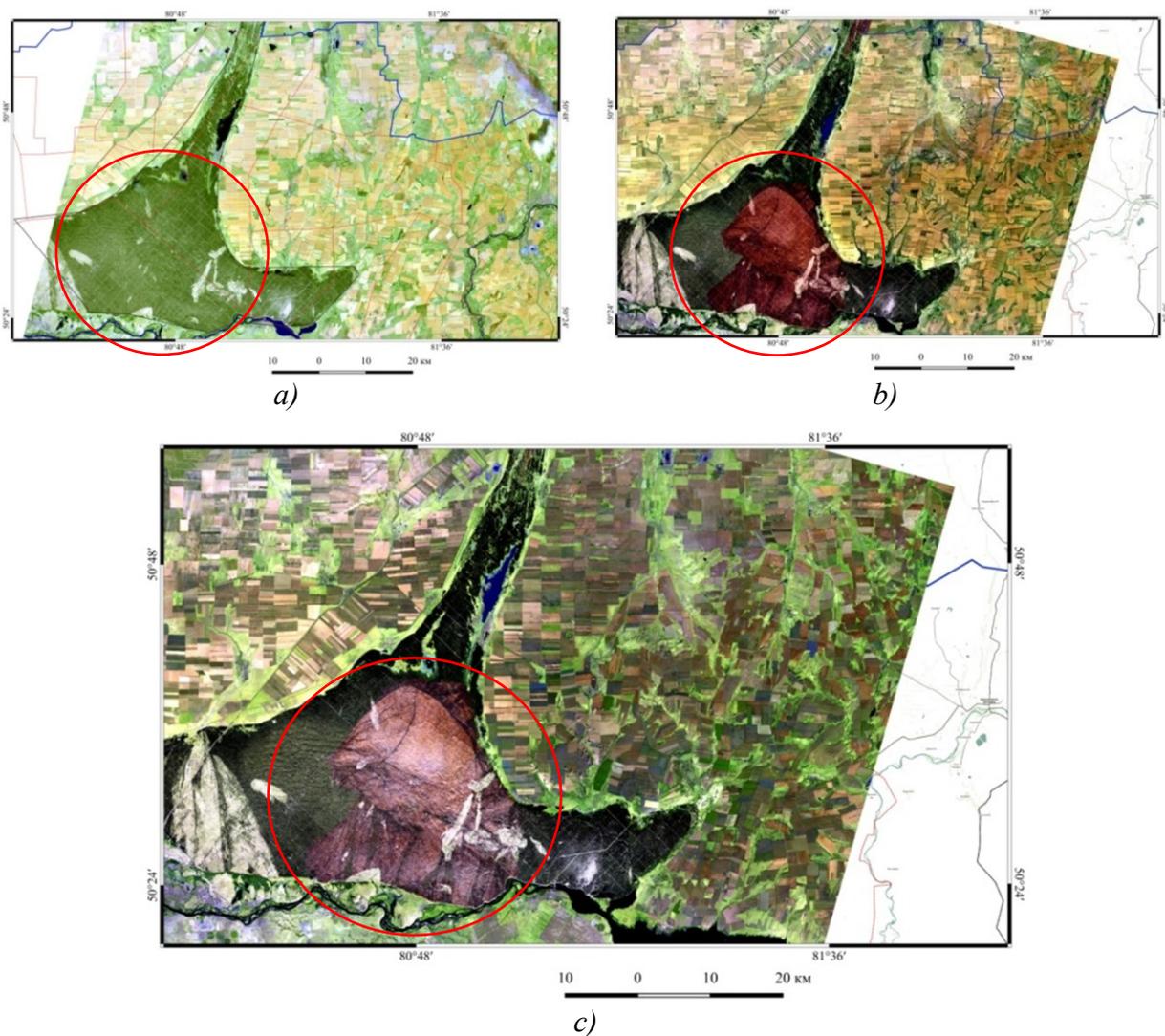


Fig. 3. Analysis of the study area in the combination of bands 7,6,4, Landsat-8–9 OLI/TIRS C2/L2: a) before the fire 2022.05.12; b) burning period 06.15.2023; c) after the fire 2023.09.29

From the results of the combination of bands, it can be seen that the condition of the territory before the fire (Fig. 3a), most of it is green-covered, during the fire (Fig. 3b) — brownish-pink, and more than two months after the fire-ash color of the bareland of the territory (Fig. 3c).

When using a combined composition containing 10 bands of the selected Landsat-8–9 OLI/TIRS, the burned areas are usually clearly visible, as shown in Fig. 2. On the Landsat-8 satellite, band 10 and 11 are bands that detect heat in the Long Wavelength IR¹. Unlike weather stations that monitor air temperature, these Landsat-8 bands show the heat level of the ground surface, which is usually hotter than the air. However, their measurements are not as accurate (the resolution of the images is 100 meters per pixel). Although these shortcomings do not provide detailed information for some studies, conditional color imagery can provide additional information for determining the fire hazard of large areas. Therefore, bands 10,5,4 are the best choice for fire risk monitoring.

Burned areas are often black in color and absorb and release large amounts of thermal energy. The SAGA-GIS program can be used to quickly and easily map burned areas from Landsat imagery using object-based image analysis techniques. The first step is to use the multi-resolution segmentation method.

The result of segmentation depends on the scale, shape and compactness parameters controlled by the user [Yankovich, Yankovich, 2020]. The scale parameter, which controls the size of the segment, determines the maximum uniformity. The value of the selected Scale parameter directly affects the separation of the image by determining the size of objects in the image. Although the shape setting adjusts the color weight, compactness determines how dense the pixels are for the object being compared to the circle [Liang et al., 2023]. For observable image classification, an integrated nearest neighbor classification method based on a fuzzy rule is used (Fig. 4).

As part of this study, during the determination of areas by segmentation method divided classes (Table 2), more than 200 thous. ha of land were exposed to fire hazard. According to the Committee on Forestry and Wildlife of the Ministry of Agriculture of the Republic of Kazakhstan², 60 thous. ha of forest and agricultural land were affected by the fire. The advantage of this method is to determine the extent of fire accidents in the main forest clusters by comparing the analyzed class area from satellite images with local forest maps. The method shown here allows you to quickly assess the fire area over large areas and is best suited for mapping specific fires or their control areas.

The object-based classification method can be a rational method for evaluating the organization of measures for timely monitoring and prevention of fire hazards in forest and agricultural territories by area of territories and class numbers.

Methods for classifying objects with Landsat-8–9 OLI/TIRS satellite image indices determine the combustion zone and combustion intensity and compare differences in the definition of the combustion zone (Table 3). In the study, it is proposed to construct the dNBR, RBR, RdNBR, dNDVI, dGNDI, GEMI and BAI indices of plants using an arithmetic combination of channels [Kurnaz et al., 2006].

The Normalized Burn Coefficient “NBR” index is one of the most actively used indices in fire management studies conducted by remote sensing studies of the Earth (Fig. 5). The NBR index is by taking a ratio of two bands dropping the values between –1 to 1. As vegetation reduction occurs in the post-fire process, near-infrared reflectance is significantly reduced. Healthy plants usually give higher values, while bare ground or recently burned areas give lower index values.

Differentiated normalized fire rate “dNBR”, using the NBR difference calculated from images before and after the fire occurred, determines the area of burned areas [Brandon et al.,

¹ Web resource: <https://eos.com/ru/blog/kombinatsii-kanalov-landsat-8/> (accessed 20.05.2024)

² Web resource: https://ru.wikipedia.org/wiki/Semey_ormany/ (accessed 20.04.2024)

2022]. In the NBR index before the fire, the green colors (Fig. 5a) after the fire (Fig. 5b) changed to orange. It can be understood that the fire occurred in areas of the dNBR index (Fig. 6), indicated by positive values from -0.59 to 0.39 , while areas with negative values were not affected by the fire.

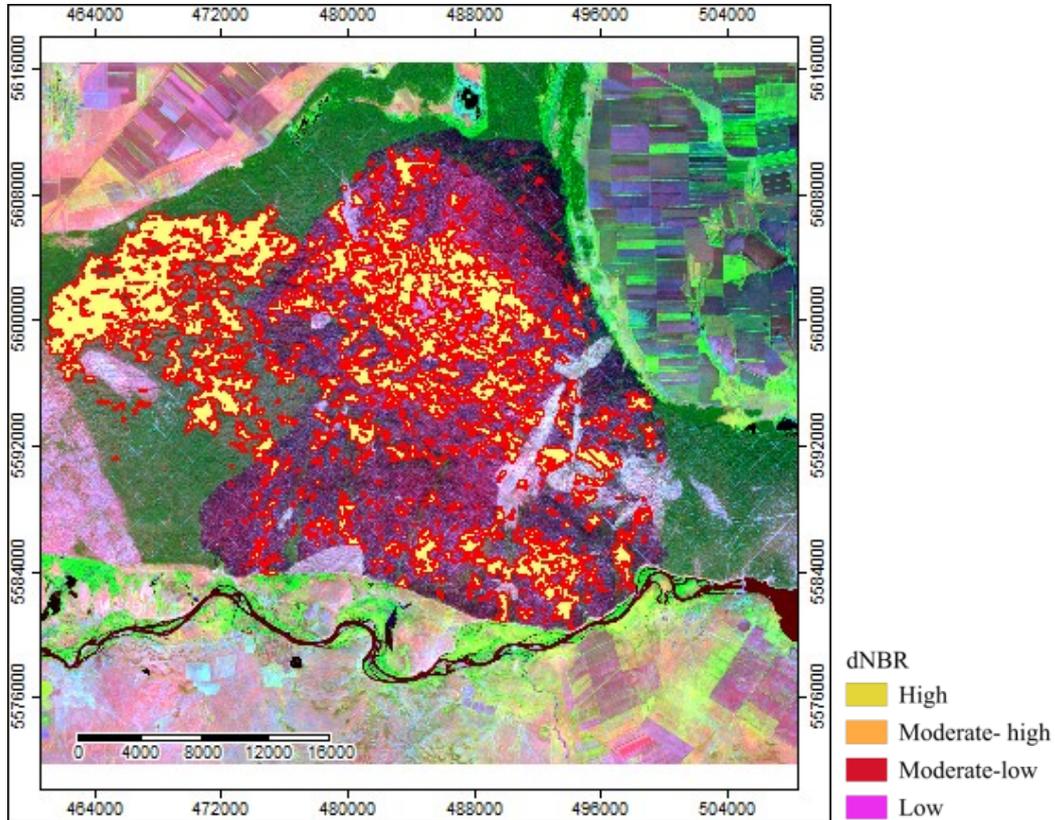


Fig. 4. Fire spread rate by segmentation method Object Based Image analysis (OBIA)

Table 2. Forest fire areas obtained from indices and OBIA

No.	CLUSTER	PERIMETER (m)	AREA (Ha)
1	0	1 665 120,000 000	13636,2600
2	1	1 499 760,000 000	18727,8300
3	10	860 520,000 000	6458,8500
4	11	1 178 880,000 000	9251,1000
5	12	586 320,000 000	5050,0800
6	13	881 400,000 000	8282,1600
7	14	503 520,000 000	3727,1700
8	15	512 040,000 000	3703,2300
9	16	397 680,000 000	5881,5000
10	17	698 520,000 000	5246,2800
11	18	260 040,000 000	1220,6700
12	19	947 700,000 000	13910,3100
13	2	2 053 500,000 000	19888,6500

No.	CLUSTER	PERIMETER (m)	AREA (Ha)
14	20	960 960,000 000	7017,3900
15	21	1 498 320,000 000	12768,3000
16	22	635 280,000 000	7624,0800
17	23	1 015 260,000 000	9409,1400
18	24	320 040,000 000	3082,6800
19	3	912 360,000 000	6505,1100
20	4	1 243 440,000 000	12477,7800
21	5	1 289 580,000 000	14902,5600
22	6	1 429 140,000 000	15514,0200
23	7	96 180,000 000	633,6000
24	8	305 280,000 000	1889,8200
25	9	848 460,000 000	7460,1900

Table 3. A ratio between bands of fire risk assessment indicators determined from Landsat-8–9 OLI/TIRS images

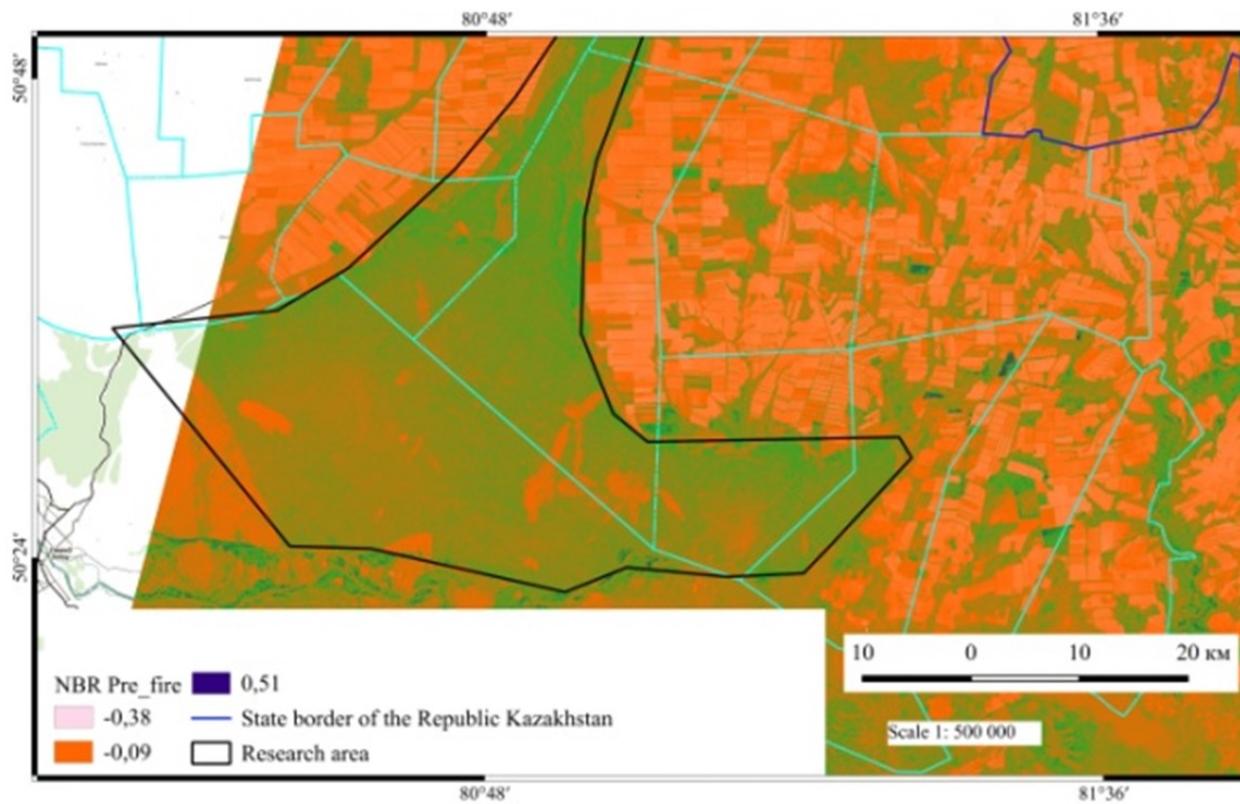
Indices	Landsat-8–9
NBR	$B5 - B7 / B5 + B7$
NDVI	$B5 - B4 / B5 + B4$
dNDVI	$NDVI_{pre-fire} - NDVI_{post-fire}$
GNDVI	$B5 - B3 / B5 + B3$
dGNDVI	$GNDVI_{pre-fire} - GNDVI_{post-fire}$
dNBR	$NBR_{pre-fire} - NBR_{post-fire}$
RdNBR	$dNBR / \sqrt{(NBR_{pre-fire} / 1000)}$
RBR	$dNBR / NBR_{pre-fire} + 1.001$
BAI	$1 / (0.1 - B4)^2 + (0.06 - B5)^2$
GEMI	$\gamma \cdot (1 - 0.25 \cdot \gamma) - B4 - 0.0.125 / 1 - B4$ $\gamma = 2 \cdot (B5^2 - B4^2) + 1.5 \cdot B5 + 0.5 \cdot B4 / B5 + B4 + 0.5$

The location of post-fire burns is observed in all identified indices, although the dNBR index cited in the study showed better results for fire risk analysis than other indices compared.

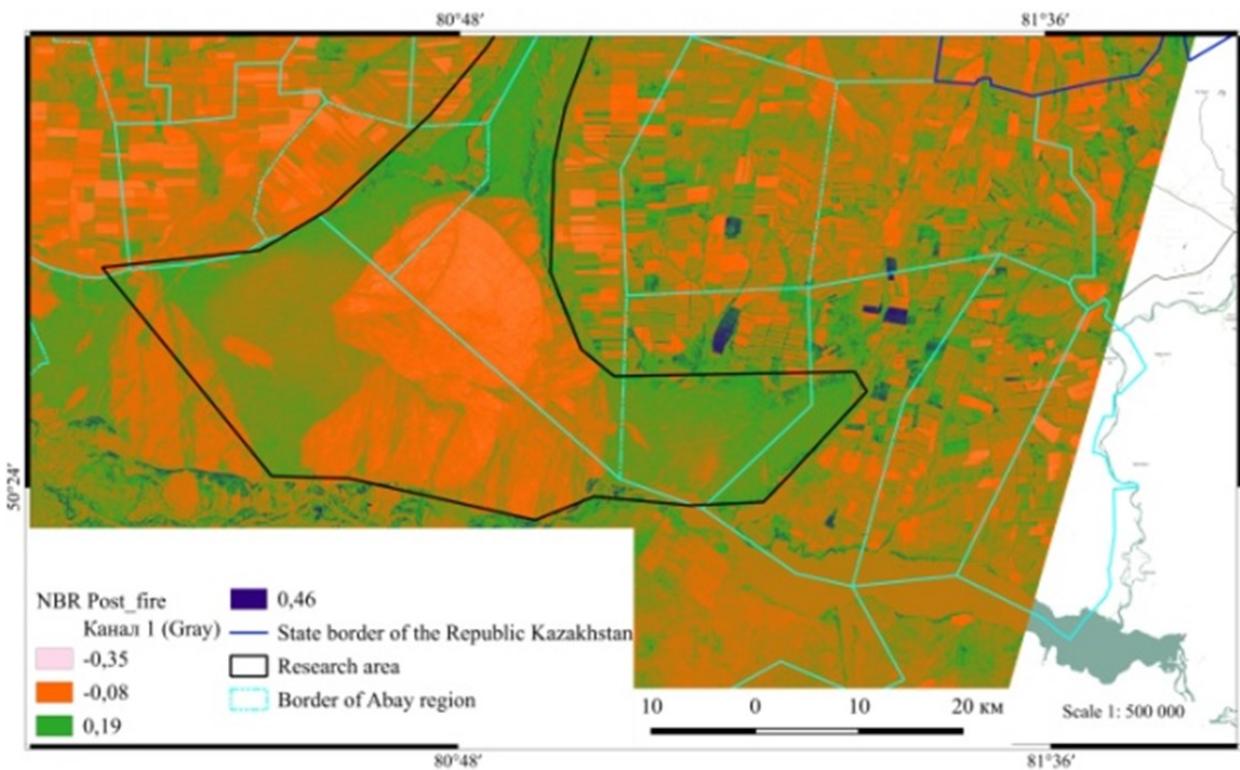
To analyze the severity of the fire, four classes without image control “unsupervised-K-Means Clustering for Grids” were identified in the SAGA GIS program according to the limit values (Fig. 4). When looking at the fire intensity maps, the high-risk area is shown as forest vegetation, and conversely, the grazing and agricultural land in this area is shown as low-risk.

In the analysis carried out was analyzed the method of analyzing the means of segmentation of object images “Object Based Image Segmentation” with the combination of a set of tools for easy representation of geo-objects in the form of polygons to determine the fire hazard by class (Table 4).

After segmentation, the dNBR result (Fig. 6) was identified as burned area, bare ground, conifer, deciduous, and water classes. The accuracy of the classified image was evaluated by user accuracy, with the used materials accuracy and K-mean statistics. The OBIA results concluded that the Landsat-8–9 OLI/TIRS provides an overall accuracy of 95 % and a K-mean of 0.945.



a)



b)

Fig. 5. Results, NBR: a) before the fire, b) after the fire

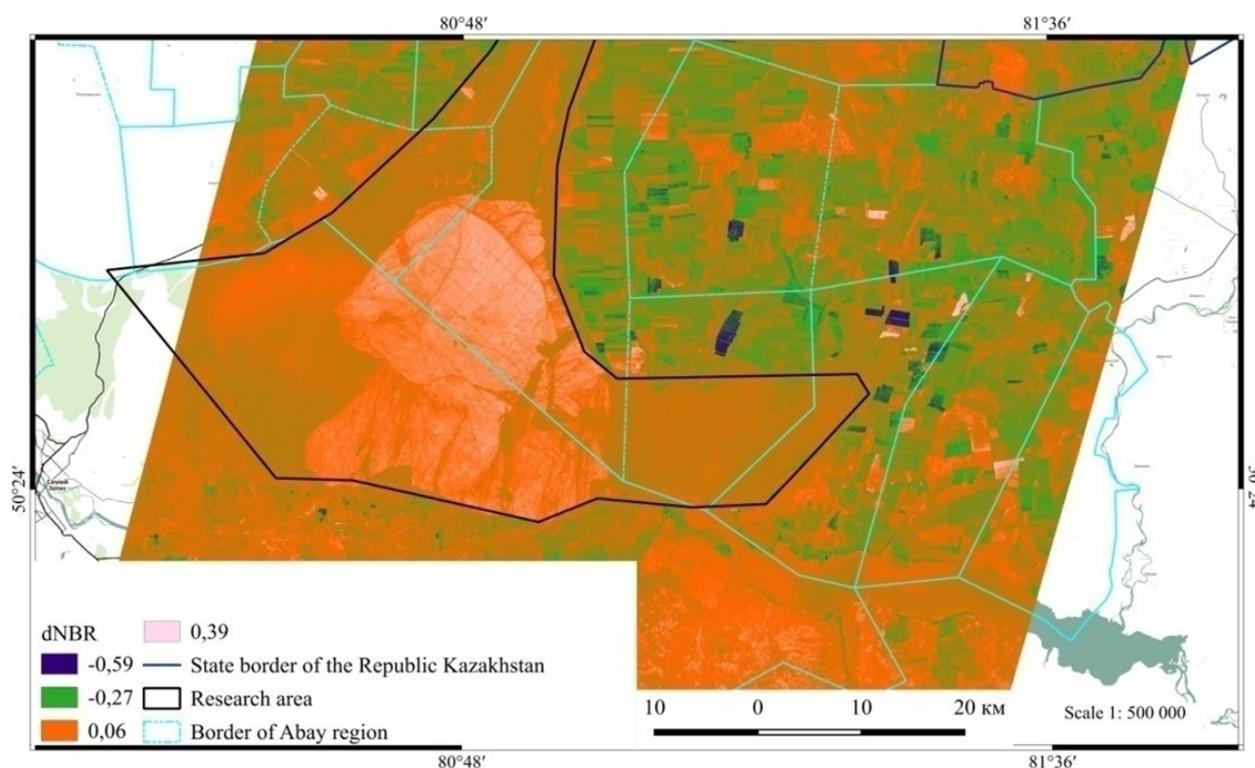


Fig. 6. Differenced Normalized Burn Ratio (dNBR)

Table 4. Accuracy assessment OBIA

Total land area classified for study 202 790,98 Ha		
Classes	PA (%)	Std.Dev. (%)
Coniferous	96 %	98 %
Deciduous	93 %	83 %
Water	93 %	100 %
Bareland	93 %	94 %
Burned area	94 %	96 %
Overall Accuracy		95 %
K-Mean		0.945

Forest fire hazard assessment is often carried out by specialized services that use various methods and simulations to predict and control forest fires, but before conducting an analysis, it should be considered that performing the necessary data identification increases the accuracy of the data obtained from satellite images. To do this, data sets are taken from local authorities, which include the analysis of the fire hazard in them, the assessment or use of fire hazard with the help of GIS. Based on the study, 5 key data sets were identified that were needed:

- 1) census units and Population Data “regions with the largest population”;
- 2) satellite images “normal vegetation difference index — NDVI”;
- 3) digital elevation model “aspect and slope — DEM, digital elevation model”;
- 4) forest fire that occurred “spatial structure/clustering”;
- 5) factors that negatively influence the occurrence of fires “amount of precipitation, reservoirs, soil moisture, river valleys, etc.”.

After that, it is necessary to take a statistical multiplier, dividing the data set into three different categories, which will give values that can be calculated against each other, fire hazard, vulnerability factors and backlash factors.

CONCLUSIONS

The study analyzed the importance and versatility of using remote sensing data in mapping, analyzing, and detecting wildland fires. Thus, instead of expensive and time-consuming work traditionally carried out on the ground, a much more economical, faster and safer study of the environment using GIS technologies with results of a certain accuracy was given. The study included research to identify potential fire risk factors and to determine the actual situation of a forest fire that occurred using various satellite methods, algorithms, areas and indices. After the study, the advantages and disadvantages of the results obtained were evaluated and a method was determined that gave the appropriate result. The resulting indices, with the results of object classification, serve as a typical example of timely observation of possible fire zones by local authorities.

To obtain high precision results on the Landsat object-oriented classification satellite, it is recommended that you perform the panchromatic sharpening conversion process, which allows you to reduce pixel sizes at high spatial resolution so that the image is rotated in more pixels and produces a larger pixel size. Also, statistical multipliers to account for fire risk, vulnerability factors, and backlash factors must then be incorporated into the standard channel ratio.

Although object-oriented classification gives good results, it requires experience in processing. The limits, the chosen index, may vary depending on the situation, although it is an effective way to quickly map the course of a fire, as it quickly determines the location of the burn and the severity of the fire to be mapped. In general, the generation of satellite data using the methods presented in these studies has the potential to provide economical conclusions for fire control and management in large areas of dense pine forests.

REFERENCES

- Abedzhanova A. S., Dzhaxylykov A. F., Rasskazov P. A., Apshikur B., Islyam G.* Automated system for optimizing the movement of urban passenger transport using GIS. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2023. V. XLVIII-5/W2-2023. P. 1–8. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-5-W2-2023-1-2023.
- Allen J. L., Sorbel B.* Assessing the differenced Normalized Burn Ratio's ability to map burn severity in the boreal forest and tundra ecosystems of Alaska's national parks. International Journal of Wildland Fire, 2008. No. 17(4). P. 463–475. DOI: 10.1071/WF08034.
- Apshikur B., Kurmangaliyev T. B., Goltsev A. G., Alimkulov M. M., Kapasov A. K.* The method of multi-criteria analysis for determining the flood-hazardous area and the development of protective structures. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2023. V. XLVIII-5/W2-2023. P. 9–17. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-5-W2-2023-9-2023.
- Brandon L. G., Johan A. B., Tineke K.* Verification of the differenced Normalised Burn Ratio (dNBR) as an index of fire severity in Afrotropical Forest. South African Journal of Botany, 2022. V. 146. P. 348–353. DOI: 10.1016/J.SAJB.2021.11.005.
- Dragozi E., Gitas I. Z., Stavrakoudis D. G., Minakou C.* Burn severity estimation using GeoEye imagery, object-based image analysis (OBIA), and Composite Burn Index (CBI) measurements. Proceedings of the Third International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment, 2015. V. 9535. P. 953515.
- Kulenova N., Toguzova M., Assylkhanova Z., Mamysheva A., Sadenova M., Rakhymberdina M.* Development of three-dimensional models of the spread of pollution on agricultural land in

industrial cities. AIP Conference Proceedings, 2022. V. 2570. P. 040014. DOI: 10.1063/5.0100029.

Kurnaz B., Bayik C., Abdikan S. Forest Fire Area Detection by Using Landsat-8 and Sentinel-2 Satellite Images: A Case Study in Mugla, Turkey. 2020. DOI: 10.21203/rs.3.rs-26787/v1.

Laurin G. V., Balling J., Corona P., Mattioli W., Papale D., Puletti N., Rizzo M., Truckenbrodt J., Urban M. Above-ground biomass prediction by Sentinel-1 multitemporal data in central Italy with integration of ALOS2 and Sentinel-2 data. Journal of Applied Remote Sensing, 2018. V. 12. Iss. 1. 016008. DOI: 10.1117/1.JRS.12.016008.

Liang H., Zheng C., Liu X., Tian Y., Zhang J., Cui W. Super-Resolution Reconstruction of Remote Sensing Data Based on Multiple Satellite Sources for Forest Fire Smoke Segmentation. Remote Sensing, 2023. V. 15. P. 4180. DOI: 10.3390/rs15174180.

Mitchell A. L., Rosenqvist A., Mora B. Current remote sensing approaches to monitoring forest degradation in support of countries measurement, reporting and verification (MRV) systems for REDD+. Carbon Balance Manage, 2017. V. 12. P. 9. DOI: 10.1186/s13021-017-0078-9.

Mitri G. H., Gitas I. Z. Fire type mapping using object-based classification of Ikonos imagery. International Journal of Wildland Fire, 2006. V. 15. P. 457–462. DOI: 10.1071/WF05085.

Muter O., Gudra D., Daumova G., Idrisheva Z., Rakhymberdina M., Tabors G., Dirnena B., Dobkeviča L., Petrova O., Apshikur B., Lunge M., Fridmanis D., Denissov I., Bekishev Ye., Kasparinskis R., Mukulysova Z., Polezhayev S. Impact of Anthropogenic Activities on Microbial Community Structure in Riverbed Sediments of East Kazakhstan. Microorganisms, 2024. V. 12. 246 p. DOI: 10.3390/microorganisms12020246.

Ongeri D., Kenduiywo B. K. Burnt area detection using medium resolution Sentinel 2 and Landsat 8 satellites. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020. V. XLIII-B5-2020. P. 131–137. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B5-2020-131-2020.

Polychronaki A., Gitas I. Z. Burned Area Mapping in Greece Using SPOT-4 HRVIR Images and Object-Based Image Analysis. Remote Sensing, 2012. V. 4. P. 424–438. DOI: 10.3390/rs4020424.

Rakhymberdina M. Y., Grokhotov E. V., Assylkhanova Z. A., Toguzova M. M. Using Space Survey Materials for Modeling Hydrodynamic Accidents at Mining Enterprises in Kazakhstan. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2022. V. XLVI-5/W1-2022. P. 193–198. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVI-5-W1-2022-193-2022.

Rakhymberdina M. Y., Kulenova N. A., Shaimardanov Z. K., Assylkhanova Z. A., Toguzova M. M., Kassymov D. K. Using Remote Sensing Data to Support Intelligent Agricultural GIS to Monitor the Condition of Arable Land and Crops. Chemical Engineering Transactions, 2022. V. 94. P. 883–888. DOI: 10.3303/CET2294147.

Rakhymberdina M., Sadenova M., Kulenova N., Asangaliyev Y., Shaimardanova B., Toguzova M., Varbanov P., Shaimardanov Zh. Nanopreparations Impact on Soybeans Growth and Development under Conditions of Piedmont Zone of East Kazakhstan. Chemical Engineering Transactions, 2021. V. 88. P. 1297–1302. DOI: 10.3303/CET2188216.

Sadenova M. A., Beisekenov N. A., Apshikur B., Khrapov S. S., Kapasov A. K., Mamyшева A. M., Klemes J. J. Modelling of Alfalfa Yield Forecasting Based on Earth Remote Sensing (ERS) Data and Remote Sensing Methods. Chemical Engineering Transactions, 2022. V. 94. P. 697–702. DOI: 10.3303/CET2294116.

Toguzova M. M., Rakhymberdina M. Ye., Kulenova N. A., Shaimardanov Z. K., Assylkhanova Z. A., Apshikur B., Beisekenov N. A. Analysis of Process Modeling in Modern Software Program to Support “Smart” Agriculture. *Chemical Engineering Transactions*, 2022. V. 94. P. 871–876. DOI: 10.3303/CET2294145.

Vlassova L., Mimbrero M. R., Llovería R. M. Analysis of the Relationship between Land Surface Temperature and Wildfire Severity in a Series of Landsat Images. *Remote Sensing*, 2014. V. 6(7). P. 6136–6162. DOI: 10.3390/rs6076136.

Yankovich E. P., Yankovich K. S. Classification of Territory on Forest Fire Danger Level Using GIS and Remote Sensing. *Predicting, Monitoring, and Assessing Forest Fire Dangers and Risks*, 2020. P. 258–267. DOI: 10.4018/978-1-7998-1867-0.ch011.

Yankovich K. S., Yankovich E. P., Baranovskiy N. V. Classification of Vegetation to Estimate Forest Fire Danger Using Landsat 8 Images: Case Study. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019. No. 4. P. 1–14. 6296417. DOI: 10.1155/2019/6296417.

А. А. Лаврусевич¹, Т. С. Алешина², О. А. Вадачкория³, И. А. Лаврусевич⁴,
Е. А. Машкова⁵, С. В. Шендяпина⁶, А. Н. Гордиенко⁷

АНАЛИЗ ДАННЫХ ДЗЗ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАРСТООПАСНОСТИ УЧАСТКА СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОДОРОГИ МЕЗМАЙ–ЛАГОНАКИ (КРАСНОДАРСКИЙ КРАЙ)

АННОТАЦИЯ

При проведении комплексных изысканий территории строительства автодороги от поселка Мезмай до пересечения с автодорогой плато Лагонаки – станция Даховская (Краснодарский край) были использованы ортофотопланы по данным космической съемки высокого разрешения, доступные через программу Google Earth, что позволило еще на предпроектной стадии оценить опасность развития карстовых процессов. Цель исследований — принятие проектных решений для нормального функционирования сооружения на территории развития карста. В статье наглядно показано, как применение космических снимков, данных лидарной съемки и карт-схем района строительства автодороги позволяет выделить наиболее важные компоненты геологической среды и факторы, способствующие развитию и активизации карстовых процессов. Используя метод сканирования исследуемой территории, получилось «снять» верхний слой лесного покрова и обнажить положение в рельефе участка, а также размеры, формы и количество карстовых проявлений. Это позволило предварительно оценить механизм карстового процесса, сформировавшего многочисленные карстовые воронки. При развитии данных форм рельефа в первую очередь действовал не провальный, а коррозионно-эрозионный процесс. Таким образом, развитие карстовых воронок на этом участке проектируемой автодороги не подпадает под «стандартные», описанные в СП, методики оценки карстовой опасности. Рекогносцировка трассы автодороги и обследование карстовых воронок в процессе маршрутной съемки полностью подтвердили высказанное предположение. Действительно, все исследованные карстовые воронки в известняках юрского возраста имели коррозионно-эрозионное происхождение. На основании проведенных инженерно-изыскательских и карстологических исследований сформулирован вывод о том, что при строительстве и эксплуатации дороги противокарстовых мероприятий не требуется. Необходим набор противоэрозионных мероприятий и мониторинг состояния автодороги в процессе эксплуатации.

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», 117997, Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, *e-mail*: lavrusevich@yandex.ru

² ФГБОУ ВО Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, д. 26, Москва, Россия, 129337, *e-mail*: kanz@mgsu.ru

³ Институт геоэкологии РАН им. Е. М. Сергеева, Уланский пер., д. 13 с. 2, Москва, Россия, 101000, *e-mail*: vadachkoria@mail.ru

⁴ ФГБОУ ВО Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, д. 26, Москва, Россия, 129337, *e-mail*: kanz@mgsu.ru

⁵ ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ) Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, ул. Давыдовская, д. 7, Москва, Россия, 121352, *e-mail*: lavrusevich@yandex.ru

⁶ ФГБОУ ВО Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, д. 26, Москва, Россия, 129337, *e-mail*: kanz@mgsu.ru

⁷ ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ) Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, ул. Давыдовская, д. 7, Москва, Россия, 121352, *e-mail*: a_gordienko@vniigochs.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автодорога, карст, провалы, известняки, коррозионно-эрозионные воронки

Andrey A. Lavrusevich¹, Tatiana S. Aleshina², Oleg A. Vadachkoria³, Ivan A. Lavrusevich⁴, Elena A. Mashkova⁵, Svetlana V. Shendyapina⁶, Aleksey N. Gordienko⁷

REMOTE SENSING DATA ANALYSIS OF GEOLOGICAL ENVIRONMENT COMPONENTS FOR THE PURPOSES OF KARST HAZARD ASSESSMENT IN THE TERRITORY OF THE MEZMAI-LAGONAKI ROAD CONSTRUCTION SITE (KRASNODAR REGION)

ABSTRACT

During carrying out comprehensive survey at the construction site of the road connecting Mezmay village with the existing road Lagonaki plateau – Dakhovskaya village (Krasnodar region), satellite images from the Google Earth program having sufficiently high resolution were used, which made it possible to assess the risk and danger of karst processes at the pre-design stage. The purpose of the research is to make design decisions for the normal construction process in the territory with developing karst processes. The article clearly shows how the use of satellite imagery, laser scanning data and maps of the road construction site provides for identification of the most important components of geological environment and factors contributing to development and activation of karst processes. Using LIDAR scanning of the study area it was possible to “remove” the upper forest layer (cover) and expose the relief of the site, determining size, shape and number of karst manifestations. This allowed performing preliminary assessment of the mechanism of the karst process that formed numerous depressions. These landforms are primarily formed not by sinkholes, but by corrosion-erosion processes. That is, the development of karst funnels on this section of the projected road does not fall under the “standard” methodology for assessing karst hazard described in the SP. The reconnaissance of the road route and the inspection of karst funnels on the spot fully confirmed the above assumption. Indeed, all studied depressions in limestones of the Jurassic age had a corrosion-erosion origin. Thus, on the basis of the conducted engineering survey and karstological studies, the conclusion is formulated that during the construction and reconstruction of the road anti-karst measures are not required. A set of anti-erosion measures and monitoring of the state of the road is required instead.

KEYWORDS: road, karst, sinkholes, limestones, corrosion-erosion funnels

-
- ¹ Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Miklouho-Maclay St. 23., Moscow, 117997, Russia, *e-mail:* lavrusevich@yandex.ru
 - ² FSEI HPE National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe hwy, Moscow, 129337, Russia, *e-mail:* kanz@mgsu.ru
 - ³ Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the RAS, 13/2, Ulansky ln., Moscow, 101000, Russia, *e-mail:* vadachkoria@mail.ru
 - ⁴ FSEI HPE National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe hwy, Moscow, 129337, Russia, *e-mail:* kanz@mgsu.ru
 - ⁵ All-Russian Scientific Research Institute of Civil Defence and Emergency Management EMERCOM of Russia, 7, Davydovskaya str., Moscow, 121352, Russia, *e-mail:* lavrusevich@yandex.ru
 - ⁶ FSEI HPE National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe hwy, Moscow, 129337, Russia, *e-mail:* kanz@mgsu.ru
 - ⁷ All-Russian Scientific Research Institute of Civil Defence and Emergency Management EMERCOM of Russia, 7, Davydovskaya str., Moscow, 121352, Russia, *e-mail:* a_gordienko@vniigochs.ru

ВВЕДЕНИЕ

Участок проектируемой трассы автодороги расположен в Апшеронском районе Краснодарского края, который протягивается с северо-запада на юго-восток от поселка Мезмай до пересечения с автодорогой «станция Даховская – турбаза Лагонаки», на км 22+536. Автодорога будет проходить по незастроенной территории. Это юг Краснодарского края, северный склон Главного Кавказского хребта, в пределах территории государственного заказника местного значения «Камышанова поляна».

Трасса проектируемой автодороги поднимется по северо-западному склону хребта Азиш-Тау, протянувшегося с северо-востока на юго-запад, преимущественно по существующей лесовозной дороге, от юго-восточной границы пос. Мезмай. Рельеф по трассе проектируемой автодороги находится в зависимости от особенностей геологического строения, тектоники и литологического состава пород. Перепад высот и уклон в направлении северо-запад, абсолютной отметки от 717,51 до 1416,63 м (по устьям пробуренных скважин).

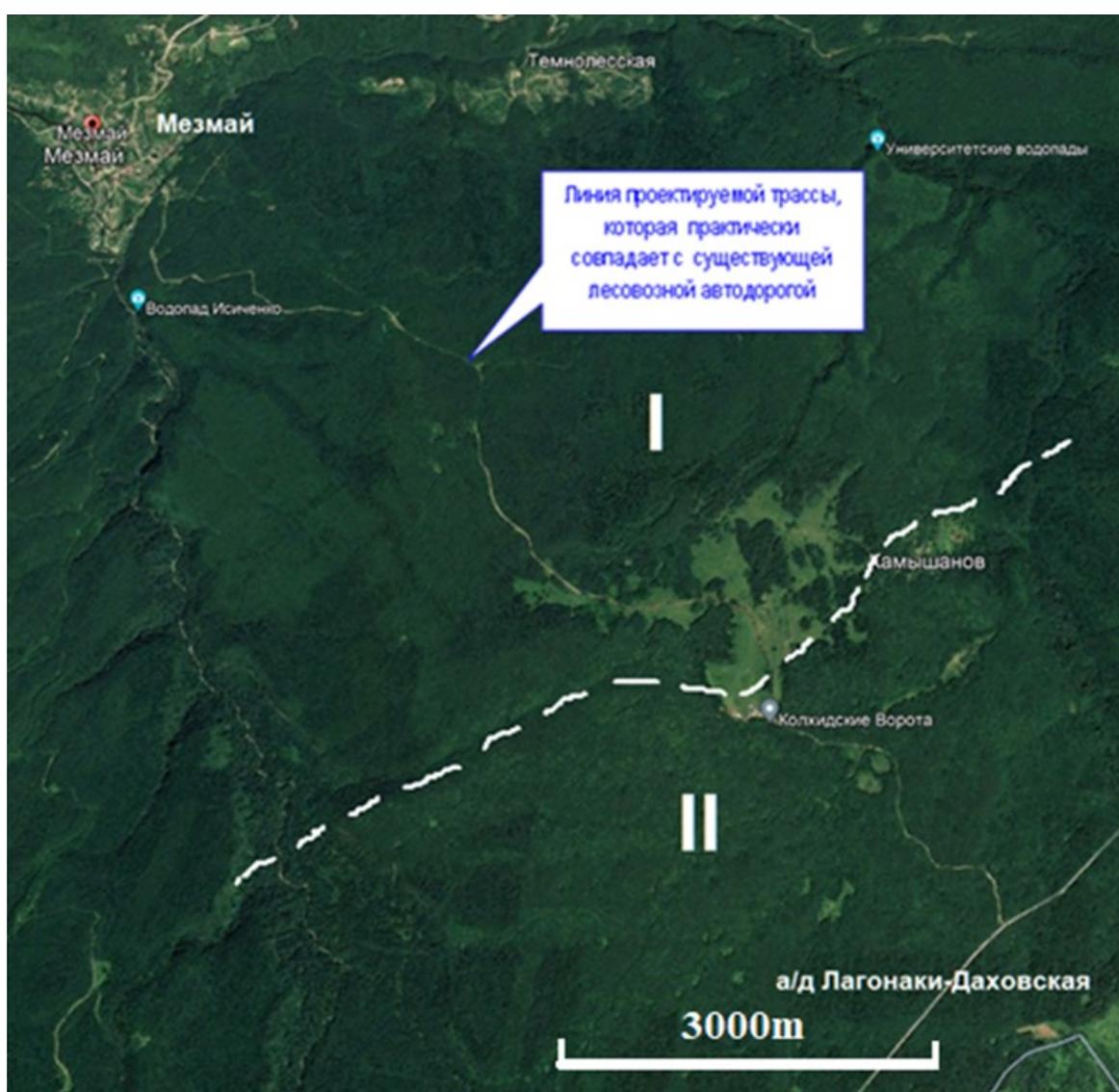


Рис. 1. Ситуационный план расположения проектируемой а/д Мезмай – Лагонаки – Даховская в междуречье рек Мезмай и Курджипс

Fig. 1. Situational plan of the location of the projected Mezmay – Lagonaki – Dakhovskaya highway in the mesopotamia of the Mezmay and Kurdzhips rivers

Анализ горных пород по проектируемой трассе автодороги Мезмай – Лагонаки – Даховская показал, что на участке практически повсеместно представлены отложения среднего и верхнего отделов юры. Это карстующиеся породы карбонатного типа (известняки, доломитизированные известняки, доломиты), которые доминируют в разрезе и относятся к весьма труднорастворимым разновидностям. Пестроцветные глины, прослой карбонатизированных песчаников и алевролитов имеют подчиненное значение. Четвертичные отложения в виде покровного или прерывистого чехла развиты практически повсеместно, отсутствуя лишь на скальных эскарпах куэст, отвесных скалах каньонов и на обнаженных, бронированных участках линии проектируемой трассы. Представлены континентальными образованиями, часто в сложных парагенетических сочетаниях [Государственная геологическая карта, 2002].

Решение задачи, после предварительного анализа ситуации проектируемой дороги, состояло в оценке интенсивности и опасности развития карстовых процессов. После анализа картографического материала, результатов изысканий прошлых лет, а также космоснимков и рекогносцировочных маршрутов, сделан вывод о развитии многочисленных карстовых воронок коррозивно-эрозионного типа, что практически исключает процесс провалообразования, и территория в соответствии с существующими СП не является карстоопасной. Ситуационный план участка представлен на рис. 1. Цифрами I и II выполнено дистанционное зонирование территории: I — участок автодороги с резким превышением рельефа и выходами коренных пород в виде «бронированных склонов» (рис. 2); II — относительно пологий, выровненный участок с Q_{IV} отложениями мощностью до 1,5 м и широким распространением поверхностных и подземных карстовых форм рельефа (воронки, поноры, пещеры и др.).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В 1962 г. Д. С. Соколов [1962] сформулировал четыре основных фактора, способствующих развитию карста и формированию карстовых форм рельефа:

- 1) наличие неустойчивых к воздействию воды пород;
- 2) водопроницаемость неустойчивых к воздействию воды пород;
- 3) наличие движущейся воды с определенным напорным градиентом;
- 4) агрессивность движущейся воды.

Самой важной особенностью геологического строения исследуемого участка является следующее: коренные породы, представленные карбонатными разностями, не перекрыты другими отложениями, которые могли бы препятствовать воздействию воды на карбонатный массив и находятся на поверхности. Это т. н. голый, обнаженный или открытый карст [Максимович, 1963, 1969]. Характер толщи — переслаивание карбонатных пород между собой и с маломощными некарстующимися отложениями (глины, песчаники, алевролиты) — значительно затрудняет развитие карста.

При дистанционном анализе было проведено зонирование территории, где выделены две зоны, отличающиеся друг от друга целым набором факторов (рис. 1). Самым важным из них является наличие многочисленных карстовых форм во второй, юго-восточной части территории (район II).

Карстующийся массив представляет собой куэсту с простиранием СВ 40°, с углами падения от 5 до 10°. Это треугольной формы пологонаклонная к северу структурная ступень, осложненная рядом малоамплитудных сбросов и флексур (рис. 3). Данные дизъюнктивные структуры фиксируются в деформациях раннеплиоценовой геоморфологической поверхности, формирующей главные водоразделы востока Лагонакского плато, и обособляют блоки более высоких порядков. Структуры второго

порядка южной части Мезмайской ступени — Юго-западномезмайская и Восточномезмайская структурные ступени — разделены Сухокурджипским сбросом, который проходит по прирусловой части долины Сухого Курджипса. По этому сбросу Восточномезмайская ступень опущена относительно Юго-западномезмайской ступени на 50 м по деформации понтической (раннеплиоценовой) поверхности и на 15–20 м по изгибу мохошевской поверхности [Несмеянов, 1999]. Таким образом, оформился достаточно крупный моноклиальный склон, сильно дислоцированный тектоническими движениями, особенно в верхней части, что привело к формированию раскрытой краевой области питания атмосферными осадками зон вертикальной нисходящей циркуляции. Это, в свою очередь, привело к формированию многочисленных коррозионных воронок, или воронок инфильтрационного и инфлюационного растворения карстующихся пород в поверхностной части массива. Скорость их развития была достаточно медленной; на поверхности формировались разнообразные асимметричные формы от блюдцеобразных до конусообразных с водопоглощающим понором на дне (рис. 4) [Несмеянов, 1999].



Рис. 2. Бронированный склон по трассе проектируемой автодороги. Выделенный район I (бронированные склоны, выходы доломитизированных известняков герпегемской свиты J2-3gr). Стрелка указывает на телефон (размер 7 x 14 см)

Fig. 2. An armored slope along the route of the projected highway. Designated area I (armored slopes, outcrops of dolomitized limestones of the Herpegem formation J2-3gr). The arrow points to the phone (size 7 x 14 cm)

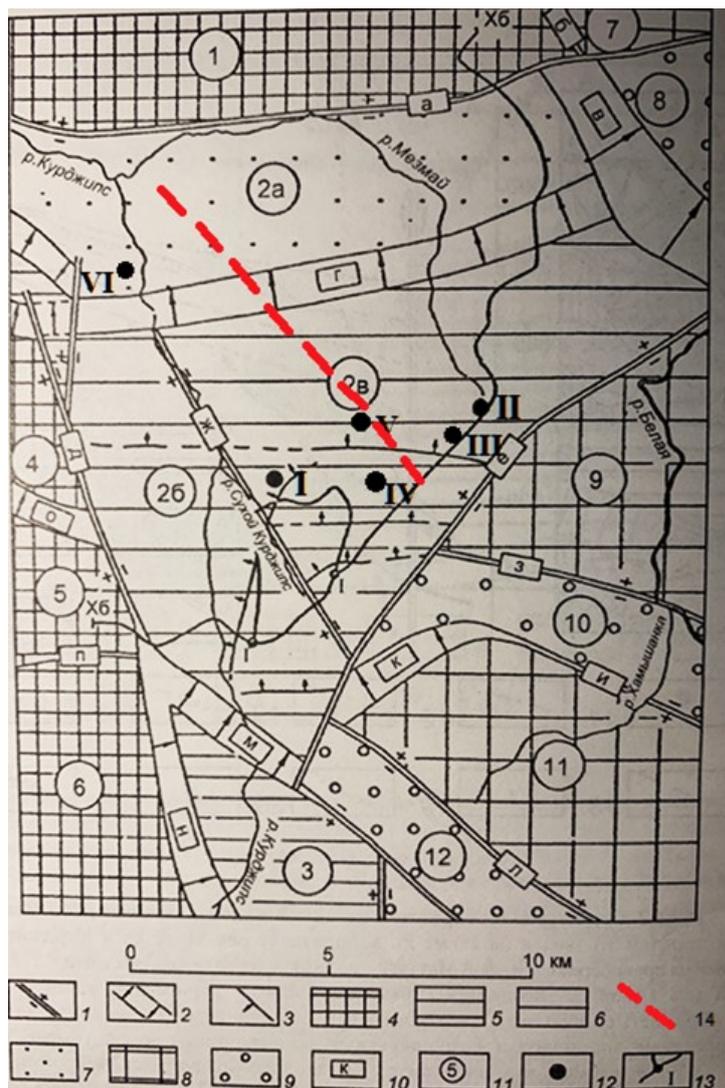
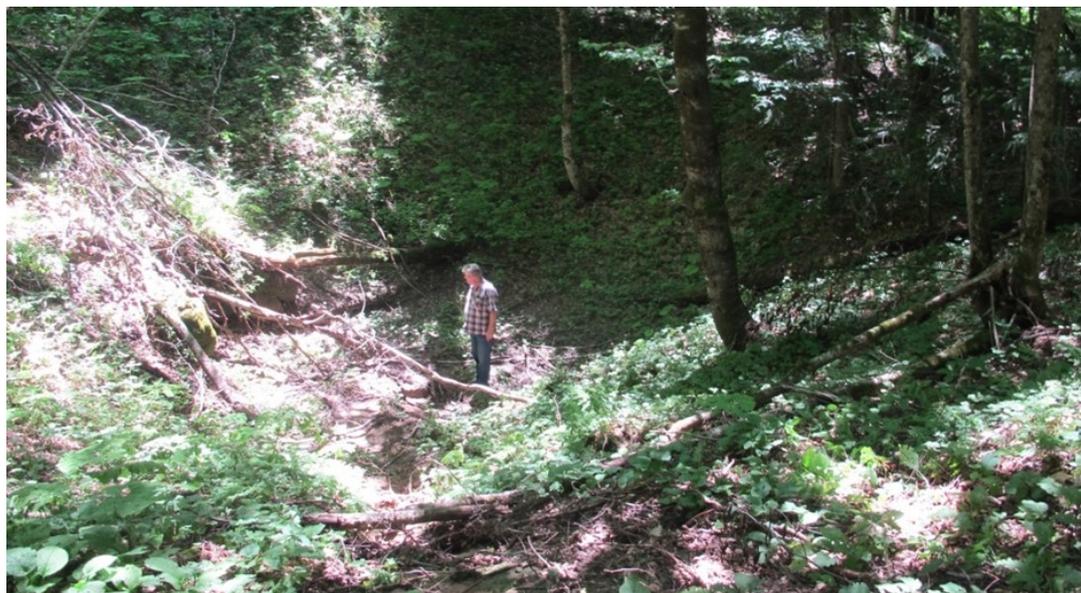


Рис. 3. Схема неотектонического районирования восточной части Лагонакского плато и смежной территории [Несмеянов, 1999]: 1 — сбросы с указанием поднятого (+) и опущенного (-) крыльев; 2 — широкая флексура; 3 — узкая, малоамплитудная флексура; 4–7 — структуры Лагонакского плато; 8–9 — структуры (горсты и грабены) за пределами плато; 10 — индексы разрывов и флексур; 11 — индексы блоковых структур; 12 — пещеры (I–VI) Мезмайской структурной ступени; 13 — линия профиля геоморфологических уровней от Гуамского (N21) до майкопского (Q32), 14 — проектируемая трасса автодороги. Цифрами обозначены: 1 — Гуамский горст; 2 — Мезмайская структурная ступень (2а — Северо-мезмайский грабен, 2б — Юго-западно-мезмайская структурная ступень, 2в — Восточно-мезмайская структурная ступень); 3 — структурная ступень Каменного моря; 4 — Северо-лагонакская структурная ступень; 5 — лагонакский горст; 6 — Нагойчукский горст; 7 — Сапунский горст; 8 — Новопрохладненский грабен; 9 — Дудугуитский горст; 10 — Хамышкинский грабен; 11 — Инженерный горст; 12 — Жолобный грабен. Буквами обозначены: а — Южногуамский сброс; б — Восточногуамский сброс; в — Буреломная флексура; г — Камышановская флексура; д — Восточнолагонакский сброс; е — Цербелевский сброс; ж — Сухокурджипский сброс; з — Северо-камышанкинский сброс; и — Южно-камышанкинский сброс; к — Раскальная флексура; л — Филимоновский сброс; м — Южно-курджипская флексура; н — Мурзикальская флексура; о — Буквенная флексура; п — Южно-цицинская сброс-флексура [Несмеянов, 1999]

Fig. 3. Scheme of neotectonic zoning of the eastern part of the Lagonaki plateau and adjacent territory [Nesmeyanov, 1999]: 1 — discharges indicating raised (+) and lowered (–) wings; 2 — wide flexure; 3 — narrow, low-amplitude flexure; 4–7 — structures of the Lagonaki plateau; 8–9 — structures (gorsts and grabens) outside the plateau; 10 — indices of discontinuities and flexures; 11 — indices of block structures; 12 — caves (I–VI) of the Mezmay structural stupa; 13 — profile line of geomorphological levels from Guam (N21) to Maikop (Q32); 14 — projected highway route. The numbers indicate: 1 — Guam mountain; 2 — Mezmay structural stage (2a — North Mezmay graben, 2b — Southwestern Mezmay structural stage, 2c — East Mezmay structural stage); 3 — Stone Sea structural stage; 4 — North Lagonaki structural stage; 5 — Lagonaki mountain; 6 — Nagoychuksky gorst; 7 — Sapunsky gorst; 8 — Novoprokhladnensky graben; 9 — Dudugushtsky graben; 10 — Khamyshkinsky graben; 11 — Engineering gorst; 12 — Zholobny graben. Letters are marked: a — South Guamian discharge; b — East Guamian discharge; c — Windbreak flexure; d — Kamyshanovskaya flexure; e — Vostochno-lagonaksky discharge; f — Cerbelevsky discharge; g — Sukhokurdzhipsky discharge; h — Severo-Kamyshankinsky discharge; i — Yuzhno-Kamyshankinsky discharge; j — Incandescent flexure; k — Filimonovsky discharge; l — Yuzhno-Kurdzhipskaya flexure; m — Murzikalskaya flexure; n — Letter flexure; o — Yuzhno-Tsitsinsky discharge-flexure [Nesmeyanov, 1999]



*Рис. 4. Понор диаметром более 0,6 м в нижней части
коррозионно-эрозионной карстовой воронки*
*Fig. 4. A hole with a diameter of more than 0.6 m in the lower part
of a corrosive-erosive karst funnel*

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При обработке полученных при инженерных изысканиях материалов необходимо осуществлять районирование исследуемой территории относительно карстовых провалов по интенсивности провалообразования по средним диаметрам карстовых провалов. Однако на исследуемой территории карстовые провалы отсутствуют. Все зафиксированные воронки имеют не провальный, а коррозионный характер. Исследуемые в процессе инженерно-геологических изысканий отрицательные карстовые формы рельефа связаны с формированием коррозионно-эрозионных форм рельефа (воронок с поглощающим понором), первоначальное развитие которых начинается с поверхности. Геологические

процессы на склонах воронок — оползни, обвалы, суффозии — вторичны, имеют подчиненное значение и реализуются уже после формирования первичных отрицательных форм рельефа, вызванных выщелачиванием карбонатных пород в зоне поверхностной нисходящей вертикальной циркуляции. В орогенных зонах развитие карста контролируется в первую очередь тектоническим строением территории. Важную роль представляют разрывные нарушения, вдоль которых в растворимых породах нередко формируются мощные карстовые зоны, распространяющиеся на большую глубину (рис. 5).

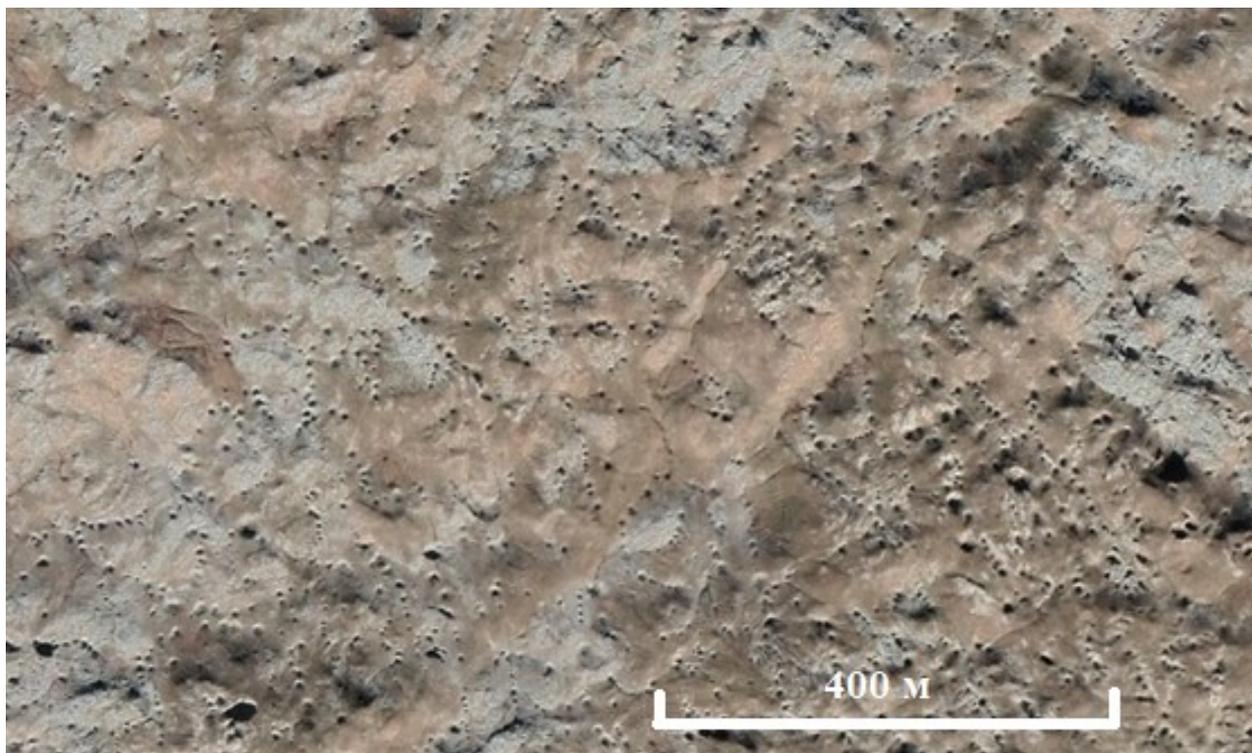


Рис. 5. Фрагмент водораздельной поверхности Бзыбского хребта (Абхазия). На космическом снимке видны многочисленные воронки коррозионно-эрозионного генезиса, приуроченные к зонам неотектонических нарушений (линейно вытянутые цепочки воронок)

Fig. 5. A fragment of the watershed surface of the Bzyb ridge (Abkhazia). The satellite image shows numerous craters of corrosive-erosive genesis confined to zones of neotectonic disturbances (linearly elongated chains of craters)

Наиболее распространенная карстовая форма на исследуемой территории — карстовые воронки коррозионно-эрозионного генезиса. Приведем их краткую морфологическую характеристику. Размер воронок самый разнообразный, однако проведенный статистический анализ территории, примыкающей к проектируемой дороге (рис. 6, 136 определений), показал, что наиболее часто встречающийся диаметр воронок составляет от 20 до 50 м.

Воронки, как правило, имеют асимметричную форму, хотя встречаются практически ровные (например, воронки в зоне примыкания проектируемой дороги к трассе Лагонаки – Даховская, рис. 7). Углы склонов воронок колеблются в широком диапазоне от 15 до 60°. Уступы воронок неровные, нередко видны выходы коренных пород. Глубина воронок колеблется от 5 до 25 м и более.

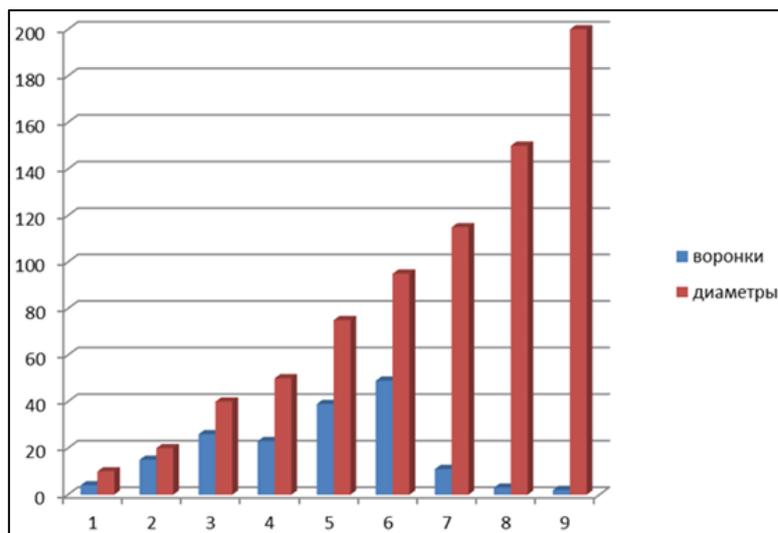


Рис. 6. График, иллюстрирующий количество воронок в зависимости от их диаметров.

Мода от 20 до 50 м [Лаврусевич и др., 2023]

Fig. 6. A graph illustrating the number of funnels depending on their diameters.

Mode from 20 to 50 m [Lavrusevich et al., 2023]

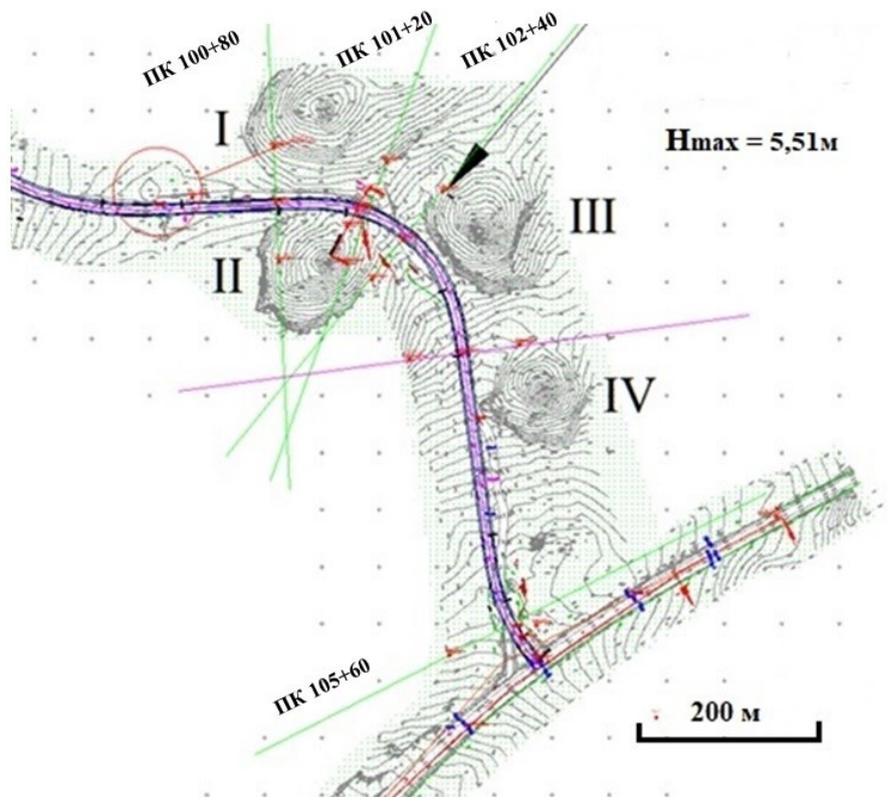


Рис. 7. Фрагмент топографического плана проектируемой трассы автодороги от ПК 100+80 до ПК 105+60, на участке примыкания к автодороге Лагонаки-Даховская в зоне развития коррозионно-эрозионных карстовых явлений

Fig. 7. A fragment of the topographic plan of the projected highway route from PC 100+80 to PC 105+60, at the site adjacent to the Lagonaki-Dakhovskaya highway in the zone of development of corrosive and erosive karst phenomena

Анализ данных спутниковой съемки, выполненной в зимний период (в отсутствие листвы), позволяет выполнить предварительную оценку количества и характера карстовых форм рельефа на исследуемом участке (рис. 8).

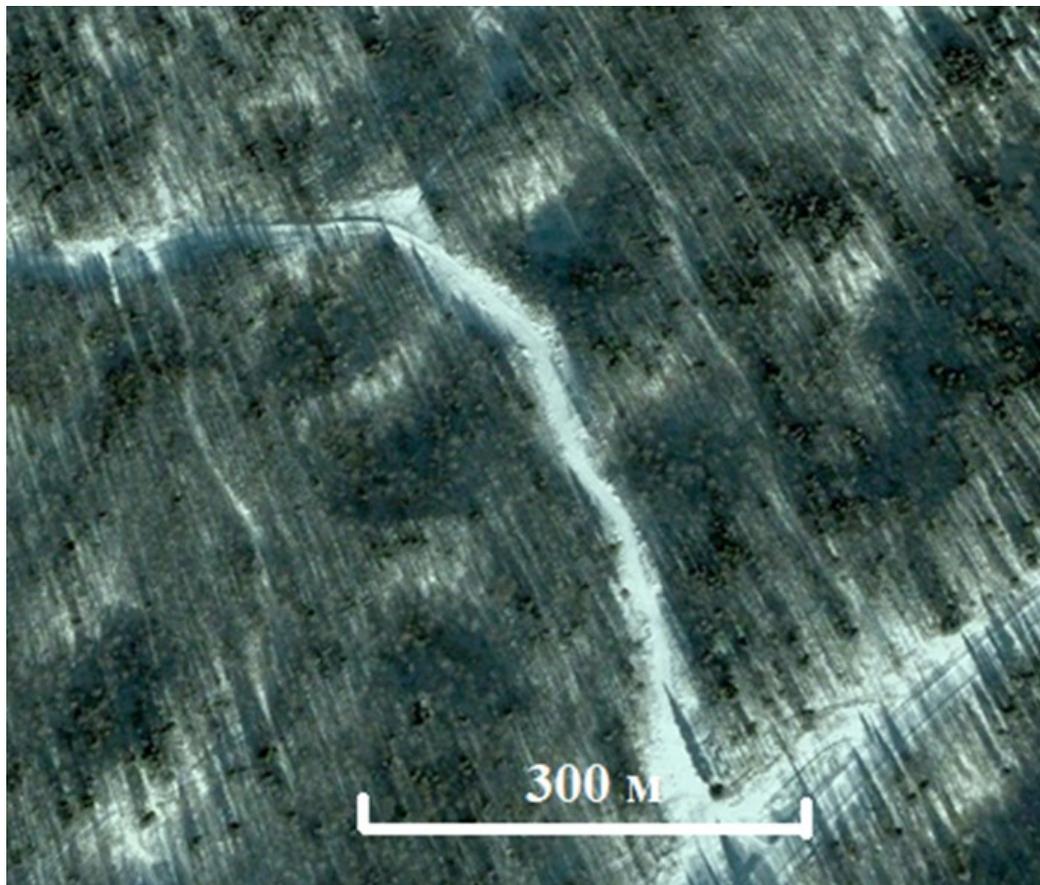


Рис. 8. Космическая съемка исследуемого участка, выполненная в зимнее время (ноябрь) при освещении наклонными лучами (солнце низко над горизонтом)

Fig. 8. Satellite image of the studied area, performed in winter (November) when illuminated by inclined rays (the sun is low above the horizon)

На рис. 9 показано, как в результате авиационной лидарной съемки была построена цифровая модель поверхности исследуемого участка без верхнего растительного слоя. Видны «оспины» коррозионно-эрозионных деформаций (воронки) на территории развития карста (II зона типизации территории по рис. 1). Проведенное дешифрирование территории позволило составить перечень коррозионно-эрозионных объектов с выносом их в натуру с указанием координат. Видно, что процесс развития карстовых воронок приурочен к зонам тектонических разломов, вдоль которых происходит их частичное слияние с формированием карстовых полей, имеющих общее простирание в северо-западном направлении по линии падения пластов куэсты (рис. 9).

Необходимо отметить, что не всегда можно судить о происхождении карстовой воронки по ее внешним очертаниям. Так, например, блюдцеобразная воронка в русском, камском и средневропейском типах карста может быть начальной или конечной стадией развития ряда генетических типов карстовых воронок. Для установления происхождения большинства карстовых воронок необходимо разбуривание их до карстующихся пород.

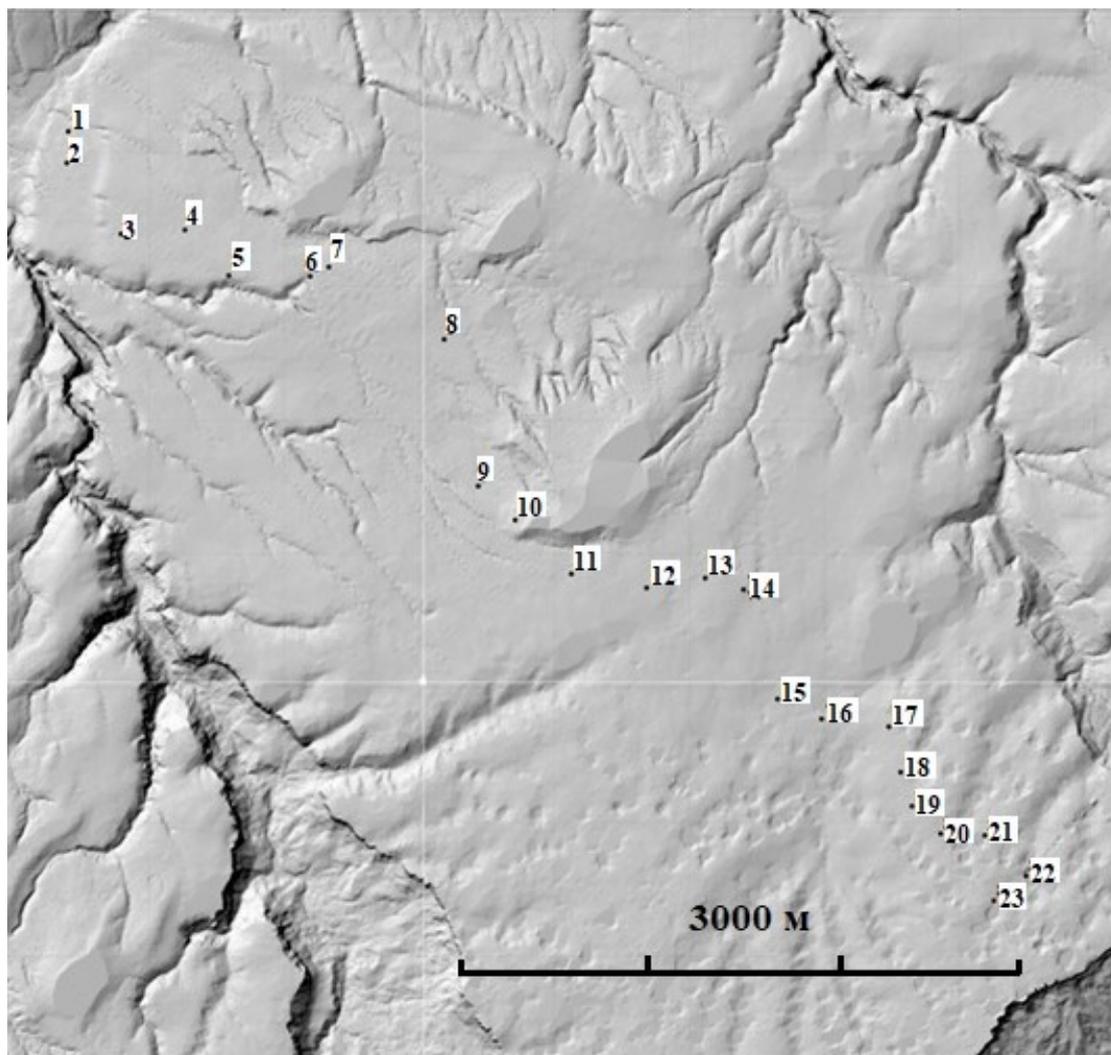


Рис. 9. Визуализация данных лидарной съемки исследуемого участка
Fig. 9. Visualization of lidar survey data of the studied area

Определение происхождения карстовых воронок имеет большое практическое значение. В районах, сложенных слаборастворимыми известняками и доломитами, где зона горизонтальной циркуляции находится глубоко, провальные карстовые воронки почти не образуются. Следовательно, условия строительства здесь более благоприятны, чем в районах с неглубоким залеганием зоны горизонтальной циркуляции, где развиты провальные воронки.

Аналогичная ситуация с воронками подробно описана Б. А. Вахрушевым с соавторами [2001] для Бзыбского хребта и Хипстинского массива, где их максимальное количество приходится на средне- и высокогорные зоны. Из карстовых форм здесь преобладают карры, воронки, котловины. В растворении известняков активное участие принимает также биологическая коррозия. Для среднегорного карста с высотами от 700 до 1 900 м характерны в основном коррозионные и коррозионно-эрозионные воронки (рис. 5).

Коррозионные воронки приурочены к субгоризонтальным или пологонаклонным (до 15°) поверхностям (рис. 10). Механизм образования воронок хорошо освещен в работах Р. Уильямса [Williams, 1985] и А. Б. Климчука [1987, 1989]. При выщелачивании трещин в эпикарстовой зоне в днище воронки и расширении водопоглощающей трещины в блоковой зоне образуется коррозионно-гравитационная воронка.

На дне такой воронки часто располагаются входы в вертикальные карстовые полости [Климчук, 1989].

Размеры и форма коррозионных воронок тесно связаны с возрастом и геолого-геоморфологическими условиями их заложения. Крупные воронки (20–40 м в диаметре) формируются на участках, рельеф которых унаследовано развивается с эрозионного этапа. Такие воронки имеют ранне- или среднеплейстоценовый (1,5–2 млн лет) возраст и приурочены в основном к среднегорной зоне. В высокогорной зоне массива интенсивное физическое выветривание, экзарационная денудация гляциального этапа развития территории обуславливают недоразвитость формирующихся здесь воронок [Климчук, 1989]. Их размеры редко превышают 10–15 м в диаметре.

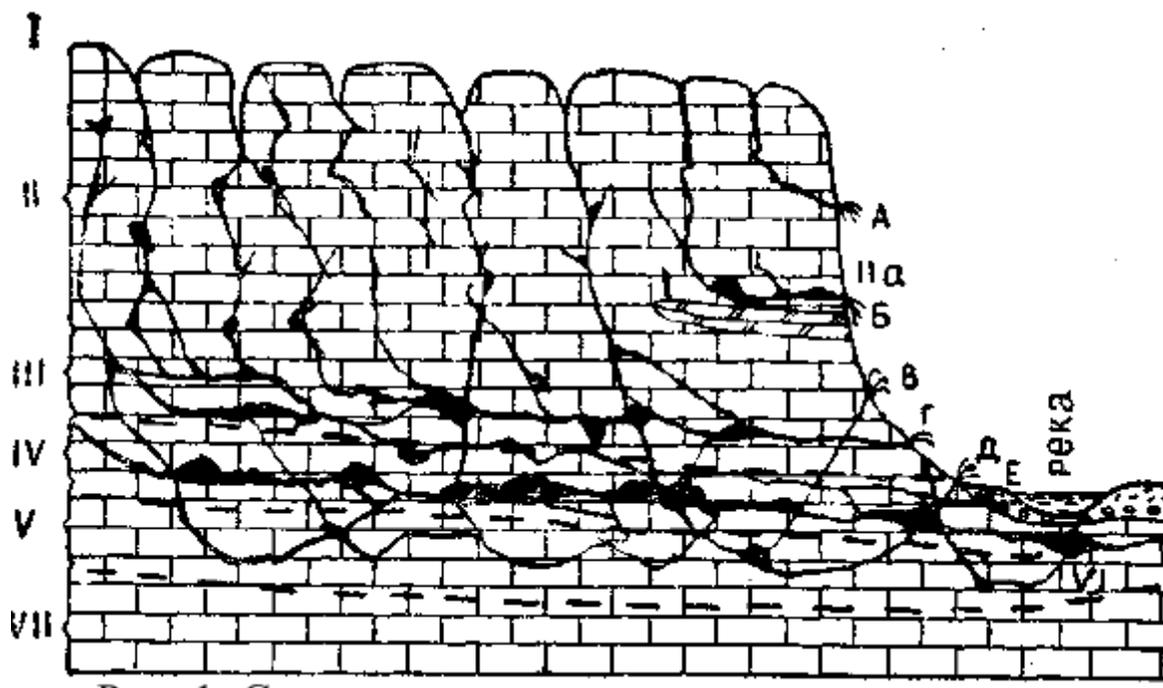


Рис. 10. Схема гидродинамических зон карстового массива, прорезанного рекой, являющейся базисом коррозии. I — зона поверхностной циркуляции; II — зона вертикальной нисходящей циркуляции; IIa — подзона подвешенных вод на местных водоупорах; III — зона колебания уровня карстовых вод или переходная; IV — зона горизонтальной циркуляции; V — зона сифонной циркуляции напорных вод; VI — зона поддолинной или подруслоевой циркуляции; VII — зона глубинной циркуляции. Карстовые источники зон циркуляции: A — вертикальной нисходящей; B — подвешенных вод; B–D — сифонной; Г — переходной; E — разгрузка вод зоны горизонтальной циркуляции в речные отложения [Максимович, 1963, 1969]

Fig. 10. Diagram of hydrodynamic zones of a karst massif cut through by a river which is the basis of corrosion. I — zone of surface circulation; II — zone of vertical downward circulation; IIa — subzone of suspended waters on local reservoirs; III — zone of fluctuations in the level of karst waters or transitional; IV — zone of horizontal circulation; V — zone of siphon circulation of pressure waters; VI — zone of submerged or subsurface circulation; VII — the zone of deep circulation. Karst sources of circulation zones: A — vertical descending; B — suspended waters; C–D — siphonal; D — transitional; E — unloading of the waters of the horizontal circulation zone into river sediments [Maksimovich, 1963, 1969]

Максимальные размеры коррозионные воронки приобретают в верхней части горно-лесного пояса, в интервале высот 1 300–1 800 м. Благоприятные микроклиматические условия, длительный период снеготаяния (в среднем вдвое более продолжительный, чем на открытых местах), снегозадерживающая роль лесов и высокая составляющая биологической коррозии приводят к образованию здесь гигантских воронок диаметром 100–150 м и глубиной 40–50 м.

Их формирование связывается с изотропией гидрогеологических свойств эпикарстовой зоны (кора выветривания известняковых массивов), неравномерной трещиноватостью и пониженной площадной водопроницаемостью в нижней блоковой зоне. Возникший фильтрационный порог препятствует нисходящему движению воды и обуславливает ее латеральное распространение к гидрогеологически активным тектоническим трещинам блоковой зоны. Вокруг водопоглощающих трещин блоковой зоны, в вышележащей трещиноватой коре выветривания формируется депрессия карстовых вод, в пределах которой резко возрастает активность карстовой коррозии. Происходит прямое отражение гидрогеологической депрессии подземных вод в морфологии поверхности. Возникает карстовая коррозионная воронка [Максимович, 1963, 1969].

В основу классификации воронок (рис. 11) положено два признака: характер деформации земной поверхности и время формирования воронки, которые свидетельствуют о процессах, происходящих в карстующемся массиве.

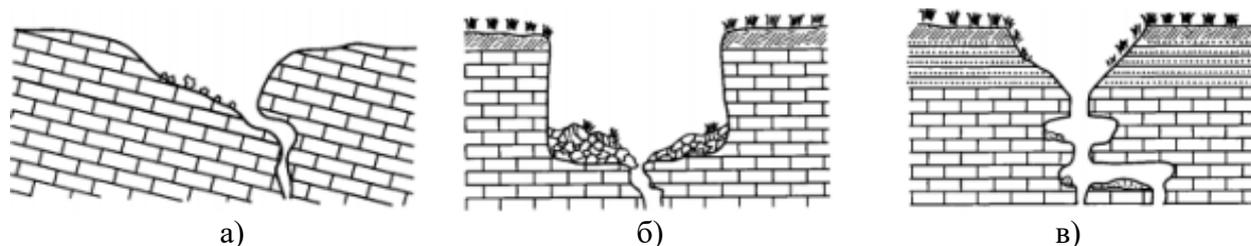


Рис. 11. Основные генетические типы карстовых воронок: а — воронка поверхностного выщелачивания (коррозионно-эрозионная);

б — провальная воронка; в — воронка просасывания

Fig. 11. The main genetic types of karst craters: a — is a surface leaching funnel (corrosion-erosion); b — is a sinkhole; c — is a suction funnel

На рис. 11 представлены следующие типы воронок:

- а) Коррозионные воронки, или воронки инфильтрационного и инфлюационного растворения карстующихся пород; в поверхностной части массива развиваются медленно, обычно от блюдцеобразных до конусообразных асимметричных форм с поглощающим понором на дне. В случае закупорки понора начинается регрессивное развитие воронки — превращение ее в озеро, заболачивание, заполнение делювием.
- б) Провальные воронки, образующиеся путем обрушения сводов полостей, возникающих в карстующихся породах или перекрывающих их рыхлых отложениях. Если покровные отложения представлены рыхлыми грунтами, провал быстро эволюционирует от колодеобразной формы к чашеобразной воронке. Коррозионно-суффозионные воронки являются следствием суффозии и последующего оседания рыхлых отложений небольшой мощности в трещины или полости в кровле карстующихся пород.

- в) Воронки просасывания, имеющие наиболее правильную коническую форму, т. к. их склоны формируются в рыхлых отложениях. Эта форма осложняется, если поглощение смываемого со склонов материала идет не в одном отверстии понора, а в линейных или крестообразных трещинных понорах, а также при наличии открывающихся в воронку эрозионных рытвин.

ВЫВОДЫ

Комплексное использование данных ДЗЗ, таких как космическая и лидарная съемка, совместно с наземными исследованиями позволяет проводить исследования территории на предмет карстоопасности с меньшими затратами и большей эффективностью.

Анализ современной динамики карстовых процессов, учитывающий тектонический, литологический, гидрогеологический, климатический, гидрологический, почвенно-растительный, ландшафтный и другие факторы влияния, на участке строительства проектируемой трассы а/д Мезмай – Лагонаки – Даховская свидетельствует о низкой активности современного карста.

В настоящее время условия для активного развития карстовых процессов на отрезке проектируемой трассы автодороги оцениваются как малоблагоприятные. Существующая с начала 70-х гг. XX в. автодорога (Лагонаки–Даховская) полноценно функционирует в течение длительного периода времени (более 50 лет). Деформаций дорожного полотна и сооружений дорожной инфраструктуры, вызванных проявлением карстовых процессов, не отмечалось. При строительстве и эксплуатации дороги мероприятий, связанных с проявлением карстовых процессов, не проводилось.

Повсеместно под маломощной толщей средне-, верхнечетвертичных и современных элювиальных хорошо проницаемых отложений вскрываются разной степени выветрелости и трещиноватости карбонатные породы — известняки, доломиты, доломитизированные известняки, карбонатные песчаники. Учитывая, что карбонатные породы являются трудно-растворимыми образованиями (до 0,05 мм в год), при отсутствии зон тектонического дробления, контролирующего активное развитие карста в рассматриваемом районе, данный процесс практически не развивается. В зонах же тектонических нарушений развиваются коррозионно-эрозионные воронки за счет выветривания и растворения самого верхнего, контактирующего с окружающей средой слоя карбонатов. Локально воронки сгруппированы (вытянуты) вдоль тектонических нарушений, что привело за четвертичный (Q_{I-IV}) период к формированию карстовых полей, имеющих северо-западное простирание.

Вблизи отрезка проектируемой трассы автодороги (во II зоне районирования территории) проведенными исследованиями отмечены карстовые воронки коррозионно-эрозионного происхождения.

Оценку карстоопасности в соответствии с видом В (т. е. провалоопасности под сооружением — п.8.2.2 СП.116.133330.2016) выполнить невозможно, т. к. зафиксированные на этом участке воронки имеют исключительно коррозионно-эрозионный генезис. Провальные же формы отсутствуют и, следовательно, показатель провалообразования равен 0 (VI категория устойчивости по п. 5.2.11 СП 11-105-97 ч. II).

Учитывая вышеизложенное, риск поражения полотна дороги провальными формами карста отсутствует. При строительстве и реконструкции дороги противокарстовых мероприятий не требуется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вахрушев Б. А., Дублянский В. Н., Амеличев Г. Н. Карст Бзыбского хребта. Западный Кавказ. М.: РУДН, 2001. 150 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации м-ба 1: 200 000. Серия: Кавказская. СПб.: Издательство ВСЕГЕИ, 2002.

Климчук А. Б. Условия и особенности карстообразования в приповерхностной зоне карбонатных массивов. Пещеры Грузии. Тбилиси: Мецниереба, 1987. № 11. С. 54–65.

Климчук А. Б. Роль приповерхностной зоны карстовых массивов в гидрогеологии и морфогенезе карста. Киев: ИГН АН УССР, 1989. 37 с.

Лаврусевич А. А., Хоменко В. П., Леоненко М. В., Лаврусевич И. А., Алешина Т. С., Макеева Т. Г., Кривоножко О. К., Валиев Р. П. Особенности оценки карстоопасности территории развития воронок коррозионно-эрозионного генезиса проектируемой автодороги Мезмай-Лагонаки. Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы инженерной геодинамики. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М.: Геоинфо, 2023. Т. 24. С. 181–185.

Максимович Г. А. Основы карстологии. В 2-х т. Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермь: Книжная типография № 2, 1963. Т. 1. 445 с.

Максимович Г. А. Основы карстологии. В 2-х томах. Вопросы гидрогеологии карста, реки и озера карстовых районов, карст мела, гидротермокарст (учебное пособие). Пермь: Книжная типография № 2, 1969. Т. 2. 529 с.

Несмеянов С. А. Геоморфологические аспекты палеоэкологии горного палеолита (на примере Западного Кавказа). М.: Научный мир, 1999. 392 с.

Соколов Д. С. Основные условия развития карста. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 320 с.

Williams P. W. Subcutaneous hydrology and the development of doline and cockpit karst. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1985. V. 29(4). P. 463–482. DOI: 10.1127/zfg/29/1985/463.

REFERENCES

Klimchuk A. B. Conditions and features of karst formation in the near-surface zone of carbonate massifs. *Caves of Georgia*. Tbilisi: Metsniereba, 1987. No. 11. P. 54–65 (in Russian).

Klimchuk A. B. Role of the near-surface zone of karst massifs in hydrogeology and karst morphogenesis. Kiev: Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1989. 37 p. (in Russian).

Lavrusevich A. A., Khomenko V. P., Leonenko M. V., Lavrusevich I. A., Aleshina T. S., Makeeva T. G., Krivonozhko O. K., Valiev R. P. Features of assessing the karst hazard of the territory of development of craters of corrosion-erosion genesis of the projected Mezmay-Lagonaki highway. *Sergeevsky readings. Fundamental and applied issues of engineering geodynamics. Proceedings of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology*. Moscow: Geoinfo, 2023. V. 24. P. 181–185 (in Russian).

Maksimovich G. A. Fundamentals of karst studies. In 2 v. *Issues of hydrogeology of karst, rivers and lakes of karst areas, chalk karst, hydrothermocarst (textbook)*. Perm: Book Printing House No. 2, 1969. V. 2. 529 p. (in Russian).

Maksimovich G. A. Fundamentals of karst studies. In 2 v. Questions of karst morphology, speleology and hydrogeology of karst. Perm: Book Printing House No. 2, 1963. V. 1. 445 p. (in Russian).

Nesmeyanov S. A. Geomorphological aspects of paleoecology of the mountain Paleolithic (on the example of the Western Caucasus). Moscow: Scientific World, 1999. 392 p. (in Russian).

Sokolov D. S. The main conditions for the development of karst. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1962. 320 p. (in Russian).

State Geological Map of the Russian Federation scale 1: 200 000. Series: Caucasian. St. Petersburg: RGRI, 2002 (in Russian).

Vakhrushev B. A., Dublyansky V. N., Amelichev G. N. Karst of the Bzyb ridge. Western Caucasus. Moscow: RUDN, 2001. 150 p. (in Russian).

Williams P. W. Subcutaneous hydrology and the development of doline and cockpit karst. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1985. V. 29(4). P. 463–482. DOI: 10.1127/zfg/29/1985/463.

Maretta L. Kazaryan¹, Mikhail A. Shahramanian^{2,3}, Vladimir S. Tikunov⁴,
Irina N. Tikunova⁵

APPLICATION OF DISCRETE ORTHOGONAL TRANSFORMATIONS FOR IDENTIFYING AND DISPLAYING MUNICIPAL SOLID WASTE IN GEOINFORMATION SYSTEMS ON THE EARTH'S SURFACE

ABSTRACT

Space monitoring in conditions of increased risk of emergencies of a natural and man-made nature and the involvement of medical and preventive measures to maintain the health of the population (flora, fauna) in critical situations is an urgent task. The method of digital spectral transformations is widely used in a variety of applied problems. In particular, when processing space information, it is advisable to use them. Cosmic information, in general, in mathematical representation, is a multidimensional variety. When working with ordinary images we have a two-dimensional manifold, when working with stereo images we have three-dimensional manifolds, when working with a series of stereo images (time series) we have four-dimensional manifolds. The mathematical basis for determining anomalous signal structures in the surrounding background is the concept of continuous orthogonal transformations; in this work we will specifically consider the Fibonacci transformations. The paper examines the problem of optimal zone coding using a discrete Fibonacci transform and analyzes the main properties of this transform, derives estimates of the spectrum of a discrete Fibonacci transform on a class of Lipschitz signals and clarifies the form of the selection matrix S when performing compression through zone coding using a discrete Fibonacci transform. An experiment is presented to identify unauthorized solid waste on the Earth's surface using research conducted on the basis of discrete orthogonal transformations.

KEYWORDS: compression of the signal, space monitoring, remote sensing of the Earth, emergency situations, medical and preventive measures, discrete orthogonal transformations

INTRODUCTION

The paper discusses a mathematical approach in research devoted to space monitoring and analysis of satellite images [Kazaryan, 2021].

One of the quantitative characteristics of any image is the spectral brightness of its elements. It is this characteristic that is fundamental when performing image recognition and identifying changes in certain areas of the Earth using satellite images [Crippen, 1990; Garcia et al., 2006; Schowengerdt, 2013].

¹ North Ossetian State Medical Academy of the Ministry of Health of the Russian Federation, 40, Pushkinskaya str., Vladikavkaz, Republic of North Ossetia — Alania, 362019, Russia,
e-mail: maretta@bk.ru

² SSI "Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring 'AEROCOSMOS'", 4, Gorokhovskiy ln., Moscow, 105064, Russia, *e-mail: 7283763@mail.ru*

³ Financial University under the Government of the Russian Federation, 49/2, Leningradskiy ave., Moscow, 125167, Russia, *e-mail: 7283763@mail.ru*

⁴ Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail: vstikunov@yandex.ru*

⁵ Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia,
e-mail: irina.tikunova@icloud.com

Space monitoring in conditions of increased risk of emergencies of a natural and man-made nature and the involvement of medical and preventive measures to maintain the health of the population (flora, fauna) in critical situations is a global, urgent task [Nadudvari, 2014; Manzo, 2016; Kazaryan, Voronin, 2021].

When performing monitoring, periodic observation of a fixed section of the study area is necessary. Photographic surveys from an Earth satellite are exposed to external factors that interfere with obtaining objective information — the state of the atmosphere, the season of the year, the position of the sensor, etc. To get out of the situation, additional procedures are used: atmospheric correction, creation of index images, normalization. They are performed during filming and this is inconvenient in terms of additional time and material costs [Schovengerdt, 2013].

It is necessary to look for another way to solve the problem, and this solution is to use the apparatus of discrete orthogonal transformations (DOT) [Hall, 1967; Gonzalez, 2019; Umnyashkin, 2021].

It should be noted that the main reasons for the increased interest in the study and application of DOT are related to the transition to a new reference system in the spectral region, linearity, reversibility and energy conservation, which is characteristic of orthogonal transformations, the presence of effective fast algorithms, etc. [Golubov et al., 2008].

Aerospace research problems are faced with the problem of reducing redundancy and efficient coding (data compression), which arises in connection with the processing of huge flows of information presented in the form of digital signals.

The task of compressing space images and discarding non-informative elements leads to an increase in brightness, which is the main feature in recognizing municipal solid waste (MSW) using GIS associated with images on the Earth's surface. The problems of constructing and using data compression systems are closely related to the automation of scientific research. In this regard, the task of data compression, being the main means of increasing the efficiency of space image processing, acquires great practical importance.

There are two main methods for selecting spectral components: zonal and threshold. Zonal selection consists of isolating a set of components occupying certain fixed areas of the spectrum, and the threshold compression method preserves only those spectral components whose value exceeds a set threshold. Threshold coding systems provide a more correct choice of transmitted samples (in terms of the magnitude of distortion), but they have disadvantages, in particular, the need to encode additional information about the addresses of transmitted samples. So, we will investigate the following problem.

Task. Find such a DOT for a given class of signals (N — dimensional random vectors) such that the signal reconstructed from M ($M < N$) spectrum components has a minimum (in the sense of root-mean-square) deviation from the input.

As is known [Golubov et al., 2008], this problem has an analytical solution and this is the Karunen-Loeve transformation (K-L), which is built on the basis of the eigenfunctions of the covariance matrix K . In applied problems, its use is not advisable due to the fact that it is necessary to perform a large number of calculations: $O(N^3)$ operations to determine the eigenfunctions K and $O(N^2)$ operations for the transformation itself.

For applied problems, Fourier transforms, real trigonometric transforms of Hadamard, Walsh, Haar, etc., which have fast algorithms, are widely used (FA).

In this work we will consider Fibonacci DOT (DTFb) [Stakhov, 1981, 1984]. Of course, these transformations cannot represent some alternative to the classical DOT, but in some cases they have useful applications [Fraenkel, 1985, 1989].

RESEARCH MATERIALS AND METHODS

Preliminary studies: properties of the Fibonacci Transformation

Let's consider orthogonal Fibonacci transformations [Agaian, Alaverdian, 1988; Agaian et al., 1988; Bertrand-Mathis, 1989; Agaian, 1990; Bergman, 1997].

Fibonacci transformation. Let $\varphi_0(x)$ integrated on $[0,1)$ function, N natural number, $\Delta_i = \left[\frac{i-1}{N}, \frac{i}{N}\right)$, $i=1,2,K,N$. Fair ratio $\prod_{i=1}^N \Delta_i = [0,1)$.

Let us introduce a number of notations (1):

$$\varphi_1(x) = \begin{cases} \varphi_0(x) & \text{by } x \in \Delta_1 \\ -\varphi_0(x) & \text{by } x \in \Delta_2 \\ 0 & \text{by } x \in \prod_{i=3}^N \Delta_i \end{cases} \quad (1)$$

$$\varphi_k(x) = \begin{cases} \varphi_i(x) & \text{by } x \in \Delta_i, i = \overline{1,k} \\ -[\varphi_{k-1}(x) + \varphi_{k-2}(x)] & \text{by } x \in \Delta_{k+1} \\ 0 & \text{by } x \in \prod_{i=k+2}^N \Delta_i \end{cases}$$

Function system $\{\varphi_k(x)\}$, $k = \overline{0,N}$ called the Fibonacci system. The Fibonacci system is orthogonal (proof below), but not orthonormal. Let's introduce another system (2) and we will also call it the Fibonacci system:

$$\Phi_{i,k}(x) = \begin{cases} \frac{\varphi_k(x)}{\sqrt{\varphi_i(x)\varphi_{i+2}(x)}} & \text{by } x \in \bigcup_{i=1}^{k+1} \Delta_i \\ 0 & \text{by } x \in \bigcup_{i=k+2}^{k+1} \Delta_i, i = \overline{1,N-1}, k = \overline{1,N} \end{cases} \quad (2)$$

$$\Phi_{N,k}(x) = \frac{\varphi_k(x)}{\sqrt{\varphi_N(x)\varphi_{N+1}(x)}} \quad k = \overline{1,N}, \text{ where } \varphi_{n+1}(x) = \varphi_{n-1}(x) + \varphi_n(x), n = 2,3,K$$

This system with $\varphi_0 = const$ is orthonormal. The proof of this statement is given below.

Let us introduce the concept of a discrete Fibonacci function. For a natural number N , we define the functions $\varphi_N(x, k)$:

$$\varphi_N(x, k) = \varphi_k\left(\frac{2x+1}{2N}\right), x=0,1,K,N-1, k=1,K,N$$

and matrix (3):

$$\varphi_N = \|\varphi_N(x, k)\|, x=0,1,K, N-1, k=1,K, N \quad (3).$$

Let's call it the Fibonacci matrix. Here is a general view of the Fibonacci matrix (4):

$$\Phi_N = \begin{bmatrix} \varphi_1 & -\varphi_1 & 0 & 0 & \Lambda & \Lambda & \Lambda & 0 & 0 \\ \varphi_1 & \varphi_2 & -\varphi_2 & 0 & \Lambda & \Lambda & \Lambda & 0 & 0 \\ \varphi_1 & \varphi_2 & \varphi_3 & -\varphi_3 & \Lambda & \Lambda & \Lambda & 0 & 0 \\ \Lambda & \Lambda \\ \varphi_1 & \varphi_2 & \varphi_3 & \Lambda & \varphi_i & -\varphi_i & \Lambda & 0 & 0 \\ K & \Lambda \\ \varphi_1 & \varphi_2 & \varphi_3 & \Lambda & \Lambda & \Lambda & \Lambda & \varphi_{N-1} & -\varphi_{N-1} \\ \varphi_1 & \varphi_2 & \varphi_3 & \Lambda & \Lambda & \Lambda & \Lambda & \varphi_{N-1} & \varphi_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

Let us present the Fibonacci matrix corresponding to the orthonormal Fibonacci system for the case of $N = 8$ as an example.

$$\Phi_8 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & (1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0) \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & (1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0) \\ \frac{1}{\sqrt{10}} & (1 & 1 & 2 & -2 & 0 & 0 & 0) \\ \frac{1}{\sqrt{24}} & (1 & 1 & 2 & 3 & -3 & 0 & 0) \\ \frac{1}{\sqrt{65}} & (1 & 1 & 2 & 3 & 5 & -5 & 0) \\ \frac{1}{\sqrt{168}} & (1 & 1 & 2 & 3 & 5 & 8 & -8) \\ \frac{1}{\sqrt{442}} & (1 & 1 & 2 & 3 & 5 & 8 & 13 & -13) \\ \frac{1}{\sqrt{714}} & (1 & 1 & 2 & 3 & 5 & 8 & 13 & 21) \end{bmatrix}$$

Let us list the main properties of the Fibonacci system.

Property № 1. System $\{\varphi_k(x)\}$, $k = \overline{1, N}$ is orthogonal on $[0,1)$. Proof:

If $k < m$, then

$$\int_0^1 \varphi_k(x) \varphi_m(x) dx = \sum_{i=1}^{k+1} \int_{\Delta_i} \varphi_k(x) \varphi_m(x) dx \quad (5)$$

According to the statement $\varphi_k(x)$ (1), we will have:

$$\varphi_k(x) = \varphi_m(x) \text{ by } x \in \bigcup_{i=1}^k \Delta_i,$$

$$\varphi_k(x) = 0 \text{ by } x \in \bigcup_{i=k+2}^N \Delta_i,$$

From here it goes,

$$\sum_{i=1}^{k+1} \int_{\Delta_i} \varphi_k(x) \varphi_m(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k \varphi_i^2 - \int_{\Delta_{k+1}} \varphi_k(x) \varphi_{k+1}(x) dx = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^k \varphi_i^2 - \varphi_k \varphi_{k+1} \right] \quad (6),$$

where φ_i — meaning $\varphi_i(x)$ on interval Δ_i .

In interval Δ_i , $\varphi_i(x)$, $i = \overline{1, N}$ are constantly and define by $\varphi_i = \varphi_{i-1} + \varphi_{i-2}$, in other words are numbers of Fibonacci. Therefore, the equality is true (7):

$$\sum_{i=1}^k \varphi_i^2 = \varphi_k \varphi_{k+1} \quad (7)$$

With looking on (6) and (7) statement (5) among zero. Therefore, system $\varphi_k(x)$, $k = \overline{1, N}$ — is orthogonal.

Property № 2. System $\Phi_{i,k}(x)$, $k = \overline{1, N}$ — is orthonormal (proof similar to point 1).

Property № 3. Let $\alpha = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$, $\beta = \frac{1-\sqrt{5}}{2}$, и $\varphi_k(x) = \frac{\alpha^k - \beta^k}{\sqrt{5}}$, $k = 1, 2, K$ (Binet formula [Stakhov, Luzhnetsky, 1981]), then the Fibonacci matrix at $\varphi_0 = 1$ looks like:

$$\Phi_N = \frac{1}{\sqrt{5}} \begin{bmatrix} \frac{\alpha-\beta}{\sqrt{(\alpha-\beta)(\alpha^3-\beta^3)}} & -\frac{\alpha^2-\beta^2}{\sqrt{(\alpha-\beta)(\alpha^3-\beta^3)}} & \Lambda & 0 & 0 \\ \frac{\alpha-\beta}{\sqrt{(\alpha^2-\beta^2)(\alpha^4-\beta^4)}} & \frac{\alpha^2-\beta^2}{\sqrt{(\alpha^2-\beta^2)(\alpha^4-\beta^4)}} & \Lambda & 0 & 0 \\ \Lambda & \Lambda & \Lambda & \Lambda & \Lambda \\ \frac{\alpha-\beta}{\sqrt{(\alpha^{n-1}-\beta^{n+1})(\alpha^{n+1}-\beta^{n+1})}} & \Lambda & \Lambda & 0 & \frac{\alpha^n-\beta^n}{\sqrt{(\alpha^n-\beta^n)(\alpha^{n+1}-\beta^{n+1})}} \end{bmatrix}$$

Let $\{\varphi_k\}$ — sequence of numbers, then α, β — positive real numbers, and for any n the following relation holds:

$$\varphi_n \varphi_{n+1} = \alpha \sum_{k=1}^n \beta^{n-k} \varphi_k^2,$$

then the Fibonacci matrix looks like (8):

$$\Phi_N(\alpha, \beta) = \begin{bmatrix} \frac{\alpha \varphi_1}{\sqrt{\varphi_1 \varphi_3}} & -\frac{\sqrt{\beta} \varphi_1}{\sqrt{\varphi_1 \varphi_3}} & 0 & 0 & \Lambda & 0 & 0 \\ \frac{\alpha \sqrt{\beta} \varphi_1}{\sqrt{\varphi_2 \varphi_4}} & \frac{\alpha \varphi_2}{\sqrt{\varphi_2 \varphi_4}} & -\frac{\beta \varphi_2}{\sqrt{\varphi_2 \varphi_4}} & 0 & \Lambda & 0 & 0 \\ \Lambda & \Lambda & \Lambda & \Lambda & \Lambda & \Lambda & \Lambda \\ \frac{\alpha (\sqrt{\beta})^{n-2} \varphi_1}{\sqrt{\varphi_{n-1} \varphi_{n+1}}} & \frac{\alpha (\sqrt{\beta})^{n-2} \varphi_2}{\sqrt{\varphi_{n-1} \varphi_{n+1}}} & \Lambda & \Lambda & \frac{\alpha \varphi_{n-1}}{\sqrt{\varphi_{n-1} \varphi_{n+1}}} & -\frac{\alpha \sqrt{\beta} \varphi_{n-1}}{\sqrt{\varphi_{n-1} \varphi_{n+1}}} & 0 \\ \frac{\sqrt{\alpha} (\sqrt{\beta})^{n-1} \varphi_1}{\sqrt{\varphi_n \varphi_{n+1}}} & \frac{\sqrt{\alpha} (\sqrt{\beta})^{n-2} \varphi_2}{\sqrt{\varphi_n \varphi_{n+1}}} & \Lambda & \Lambda & \frac{\sqrt{\alpha} \sqrt{\beta} \varphi_{n-1}}{\sqrt{\varphi_n \varphi_{n+1}}} & \frac{\sqrt{\alpha} \varphi_n}{\sqrt{\varphi_n \varphi_{n+1}}} & -5 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Property № 4. $\Phi_N \Phi_N^T = I_N$.

Property № 5. The determinant of a Fibonacci matrix of order N is equal to the product of the diagonal elements and the number φ_{n+1} , those first $N + 1$ Fibonacci numbers.

$$\det\|\varphi_n\| = \prod_{i=1}^{N+1} \varphi_i, \quad \det\|\Phi_N\| = 1 \quad (9)$$

Property № 6. For the practical application of DOT, it is important to have a way to quickly calculate it, a fast conversion algorithm. The main criterion for an algorithm when implemented on a computer is the number of arithmetic operations. Direct (10) and inverse (11) Fibonacci transformations have the form:

$$Y = \Phi_N X \quad (10),$$

$$x = \Phi_N^{-1} Y = \Phi_N^T Y \quad (11),$$

where $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ — input vector (signal),

Φ_N — the Fibonacci matrix corresponding to the orthonormal Fibonacci system.

Let's look at these algorithms in detail. From (7) we have:

$$y_i = \sum_{k=1}^i \Phi_k x_k - \Phi_i x_{i+1}, \quad \Phi_k = \frac{\varphi_k}{\sqrt{\varphi_k \varphi_{k+2}}}, \quad k = \overline{1, N-2}.$$

From here we will have the following recurrent formula:

$$\begin{aligned} y_{i+1} &= \sum_{k=1}^{i+1} \Phi_k x_k - \Phi_{i+1} x_{i+2} = \sum_{k=1}^i \Phi_k x_k - \Phi_i x_{i+1} + \Phi_{i+1} x_{i+1} - \Phi_{i+1} x_{i+2} + \Phi_i x_{i+1} = \\ &= y_i + x_{i+1} (\Phi_i + \Phi_{i+1}) - \Phi_{i+1} x_{i+2} = y_i + \Phi_{i+2} x_{i+1} - \Phi_{i+1} x_{i+2}, \\ y_1 &= \Phi_1 (x_1 - x_2) \end{aligned}$$

So,

$$y_{i+1} = y_i + \Phi_{i+2} x_{i+1} - \Phi_{i+1} x_{i+2}, \quad i = \overline{1, N-2} \quad (12)$$

$$y_1 = \Phi_1 (x_1 - x_2)$$

$$y_N = y_i + \Phi_{N+1} x_N, \quad \Phi_{N+1} = \frac{\varphi_{N+1}}{\sqrt{\varphi_N \varphi_{N+1}}}.$$

Fig. 1a shows the algorithm of the direct fast Fibonacci transformation for $N=8$. Let's consider the Fibonacci inverse transformation algorithm. From (11) we have:

$$x_i = -\frac{\varphi_{i-1}}{\sqrt{\varphi_{i-1} \varphi_{i+1}}} y_{i-1} + \varphi_i \left(\sum_{k=i}^{N-1} \frac{y_k}{\sqrt{\varphi_k \varphi_{k+2}}} + \frac{y_N}{\sqrt{\varphi_N \varphi_{N+1}}} \right), \quad i = \overline{N-2, 2} \quad (13)$$

Let

$$T_i = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{y_k}{\sqrt{\varphi_k \varphi_{k+2}}} + \frac{y_N}{\sqrt{\varphi_N \varphi_{N+1}}}, \quad i = \overline{N-1, 2} \quad (14)$$

Expression (14) is represented as follows:

$$T_{i-1} = T_i + \frac{y_{i-1}}{\sqrt{\varphi_{i-1} \varphi_i}}.$$

So,

$$x_{i-1} = \frac{\varphi_{i-2}}{\sqrt{\varphi_{i-2} \varphi_i}} y_{i-2} + \varphi_{i-1} T_{i-1}, \quad i = \overline{N, 3}$$

$$x_1 = T_1 + \frac{y_1}{\sqrt{2}}$$

$$x_N = -\frac{\varphi_{N-1}}{\sqrt{\varphi_{N-1} \varphi_{N+1}}} + \frac{y_N \varphi_N}{\sqrt{\varphi_N \varphi_{N+1}}} \quad (15)$$

Formula (14) is a fast inverse transformation scheme for $N=8$, where:

$$g_i = \frac{\varphi_i}{\sqrt{\varphi_{i-1} \varphi_{i+1}}}, \quad i = \overline{1, N-1}, \quad g_N = \frac{\varphi_n}{\sqrt{\varphi_n \varphi_{n+1}}}, \quad r_i = \frac{g_i}{\varphi_i}, \quad i = \overline{1, N}$$

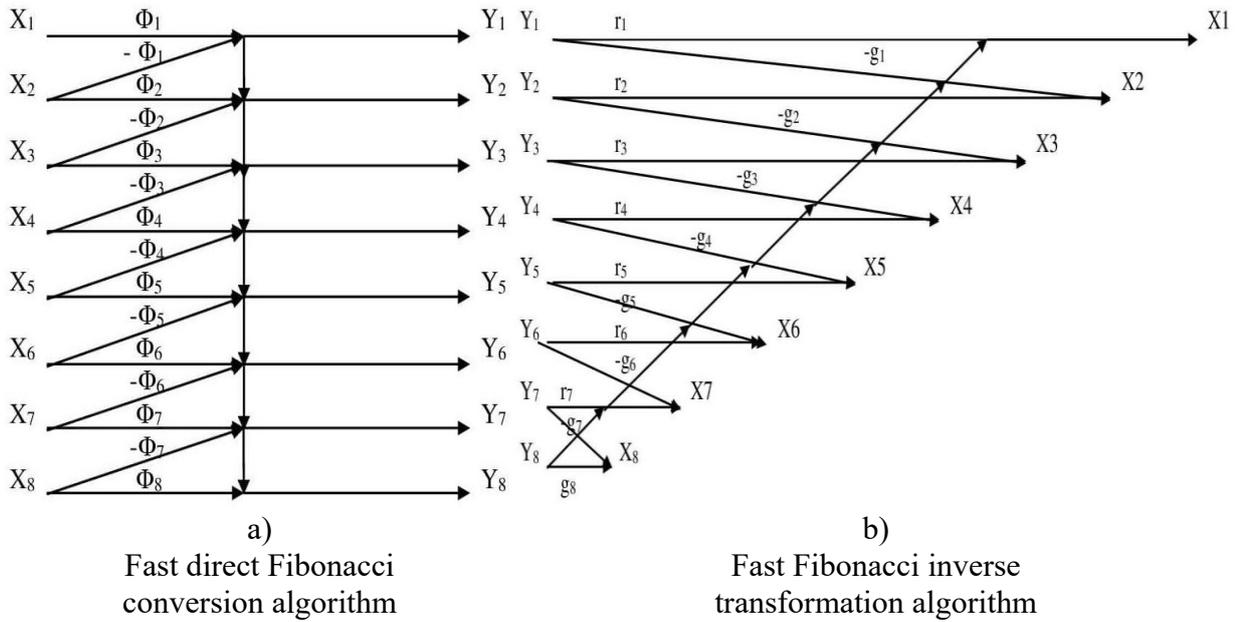


Fig. 1. Representation of the fast Fibonacci transformation algorithm for $N = 8$

Property № 7. The complexity of calculating the forward and reverse Fibonacci transformations. The lower bound of the complexity of algorithms [Golubov et al., 2008] calculating the orthogonal transformation based on the basis of F is estimated:

$$\mu^+ L^+ + \mu^\times L^\times \geq \frac{\log(|\Delta F|)}{\log(2A)} \quad (16),$$

where μ^+ and μ^\times — weighty coefficients,
 L^+ and L^\times — the number of additions and subtractions.

$$\Delta F = \max_{i,j} \{ \Delta F_{i,j} \},$$

where $\Delta F_{i,j}$ — the determinant of the minor of the matrix F .

$$A \geq \max_j \{ |\lambda_j|, |\mu_j| \},$$

where λ_j and μ_j — constants used in the class of algorithms that calculate the transformation F .

For the discrete Fibonacci transformation:

$$\Delta F = \prod_{i=1}^{N+1} \varphi_i, \quad A = \varphi_N.$$

For convenience, instead of $\{\varphi_n\} n = \overline{1, N}$ we will consider the basic functions $\{\sqrt{5} \varphi_n\} n = \overline{1, N}$.

Fibonacci numbers $\{\varphi_n\}$ $n = \overline{1, N}$ is the nearest integer to the number $\frac{\alpha^n}{\sqrt{5}}$, where $\alpha = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$; then you can write:

$$\log(\Delta F) = \sum_{n=1}^{N+1} \log(\sqrt{5} \varphi_n) = \left[\log \alpha \sum_{n=1}^{N+1} n \right] = \left[\log \alpha \cdot \frac{(N+1)(N+2)}{2} \right],$$

and so on:

$$\mu^+ L^+ + \mu^\times L^\times \geq \left[\frac{(N+1)(N+2)}{2(1+N \log \alpha)} \cdot \log \alpha \right] \quad (17)$$

Let $C = L^+ + L^\times$. It follows from (12) and (15) that with a direct transformation $L^+ = 2N - 2$, $L^\times = 2N - 1$, and with the reverse conversion $L^+ = 2N - 2$, $L^\times = 2N$. Therefore,

$$\frac{N}{2} + 1 \leq C \leq 4N - 3$$

Property № 8. The Karunen-Loew transform and the Fibonacci transform. When solving our task of decrypting satellite images in order to monitor for the presence of household waste, we will use the Fibonacci transform (instead of the Karunen-Loew transform). The basis for such a decision is the following statement [Agaian, 1990; Agaian, Alaverdian, 1996].

Statement. Let f_N — a random signal with a covariance matrix

$$K = \{k_{m,n}\}, \quad m, n = \overline{1, N}$$

$$k_{m,n} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r_{m,j} r_{n,j}, \quad m, n = \overline{1, N} \quad (18),$$

where

$$r_{ij} = \sqrt{N} \sum_{t=1}^N \frac{\varphi_t \sqrt{\lambda_t}}{\sqrt{\varphi_i \varphi_{i+2}}} h_{t,j} \quad i, j = \overline{1, N} \quad (19),$$

$$h_{t,j} = (-1)^{\sum_{l=0}^{p-1} k_l j_l}, \quad \lambda_t \geq 0, \quad t = \overline{1, N} \quad (20),$$

(t_0, t_1, K, t_{p-1}) and (j_0, j_1, K, j_{p-1}) — binary representations of numbers $t-l$ and $j-l$.

Then it's fair (21):

$$K_N \Phi_N = \Phi_N \Lambda_N, \Lambda_N = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \quad (21)$$

Proof. The expression (17) is presented in the following form:

$$r_{ij} = \sqrt{N} \sum_{t=1}^N \frac{\varphi_{i,t}}{\sqrt{\varphi_{i,t} \varphi_{i+2,t}}} \sqrt{\lambda_{t,j}} h_{t,j} \quad i, j = \overline{1, N},$$

where

$$\varphi_{i,t} = \varphi_t, \quad \lambda_{t,j} = \lambda_t$$

In matrix form, you can write this expression as (22):

$$R_N = \sqrt{N} \Phi_N \Lambda_N^{\frac{1}{2}} H_N \quad (22),$$

where H_N — the Walsh-Hadamard matrix of order N .

Given (20), we write (16) as (23):

$$K_N = \frac{1}{N} R_N R_N^T \quad (23)$$

Substitute (21) in the left part of equation (19):

$$\frac{1}{N} (\sqrt{N} \Phi_N \Lambda_N^{\frac{1}{2}} H_N) (\sqrt{N} H_N^T \Lambda_N^{\frac{1}{2}} \Phi_N^T) \Phi_N = \Phi_N \Lambda_N^{\frac{1}{2}} H_N H_N^T \Lambda_N^{\frac{1}{2}} \Phi_N^T \Phi_N = \Phi_N \Lambda_N,$$

This was exactly what needed to be proved.

Property № 9. It is known that [Ivashko, 1983] the i -th Fibonacci number can be obtained as a solution to a linear difference equation:

$$\begin{aligned} \varphi_i - \varphi_{i-1} - \varphi_{i-2} &= 0; \\ \varphi_i &= \frac{\sqrt{5}}{5} (\alpha^i - \beta^i) \\ \alpha &= \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \approx 1,618 \\ \beta &= \frac{1 - \sqrt{5}}{2} \approx -0,618 \end{aligned}$$

Function $y_1(i) = \alpha^i$ — is an increasing exponent, and $y_2(i) = \beta^i = (-1)^i (0.618)^i$ — alternating decaying sequence.

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \varphi_i = \frac{\sqrt{5}}{5} (\alpha^i - \beta^i) = \frac{\sqrt{5}}{5} \alpha^i .$$

In [Ivashko, 1983] it is proved that

$$\lim_{\substack{i \rightarrow \infty \\ N \rightarrow \infty}} \sum_{j=1}^N \varphi_i(j) = \begin{cases} 1, & i < N \\ \alpha^{\frac{3}{2}} \approx 2.058, & i = N \end{cases} \quad (24)$$

The lag, shift, and convolution theorems do not hold for the Fibonacci basis, but Parseval's equality holds.

Here is a mathematical formulation of the problem of information compression by means of the Fibonacci addition. Let's consider the implementation of some random process with certain quantitative characteristics (mathematical expectation = 0, and covariance matrix $\Sigma_{\bar{x}}$) and we denote this vector of dimension N as follows — $\bar{x} = (x_0, \mathbf{K}, x_{N-1})$.

We have a non-degenerate matrix of basic functions of some orthogonal system $\{\varphi_k(t)\}_{k \geq 0}$, on the basis of which an orthogonal transformation is formed F (25):

$$F = \begin{bmatrix} \varphi_0(0) & \varphi_0(1) & \mathbf{K} & \varphi_0(N-1) \\ \varphi_1(0) & \varphi_1(1) & \mathbf{K} & \varphi_1(N-1) \\ \mathbf{K} & \mathbf{K} & \mathbf{K} & \mathbf{K} \\ \varphi_{N-1}(0) & \varphi_{N-1}(1) & \mathbf{K} & \varphi_{N-1}(N-1) \end{bmatrix} \quad (25)$$

Let

F^{-1} is a reverse conversion;

S is the matrix of choice of rank m , where $1 \leq m \leq N$ dimensions $m \times N$;

W is the dimension recovery matrix $N \times m$.

The task is to choose F_0, S_0, W_0 , satisfying the following conditions:

$$\rho(\bar{x}, F^{-1} W S F \bar{x}) \rightarrow \min .$$

Here, ρ is the specified metric.

Let's present the algorithm of the problem in the form of the following flowchart (Fig. 2).

The task is to find the optimal method of zone coding. If $k = N/N_0$ is given, then such spectral components are replaced by zeros, in which the recovery error is minimized:

$$\varepsilon^* = \sup_{\bar{x} \in (X, \rho)} \varepsilon .$$

Consider the following set of vectors with real components (26):

$$X_{\Delta} = \left\{ \bar{x} = (x_0, x_1, \mathbf{K}, x_{N-1}) : \max_k |x_{k-1} - x_k| \leq \Delta \right\} \quad (26),$$

where $N = r^n$,

and the vector $\bar{y}_s = (0, K, 0, y_{r^s}, y_{r^{s+1}}, K, y_{r^{s+1}}, 0, K, 0)$ $s=0, K, n-1$ — is s -th pack of vector y .

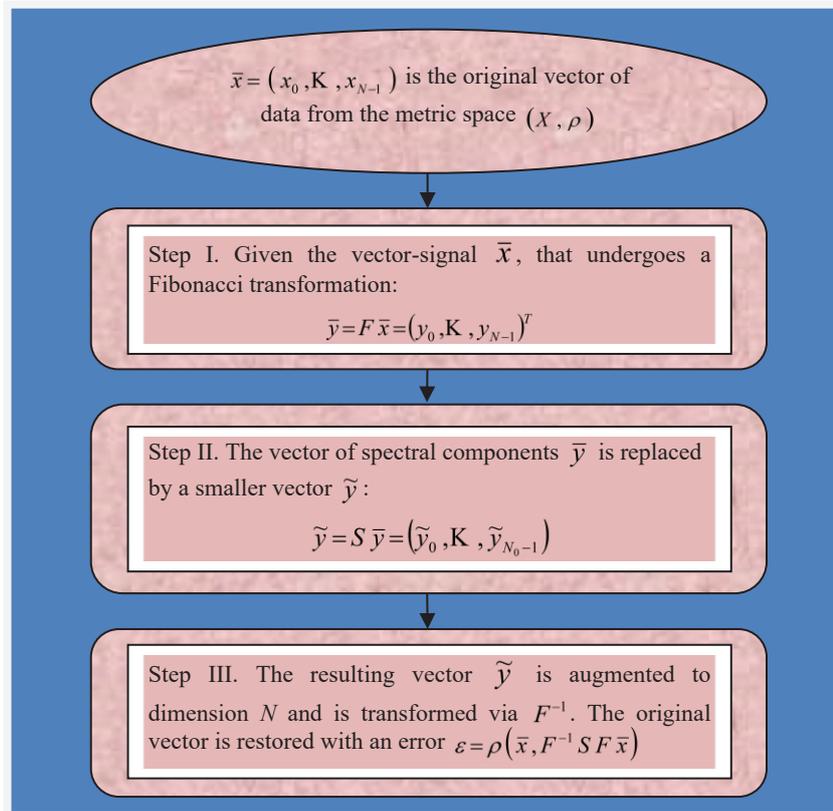


Fig. 2. The algorithm of the problem of finding the optimal method of zone coding in data compression by means of the Fibonacci transformation

To determine the optimal method of zone encoding during compression using the Fibonacci transform, it is necessary to investigate the following extreme problem: $y_j \rightarrow \text{extr}$ on condition $\bar{x} \in X_\Delta$, where

$$y_j = x_0 \varphi_j(0) + x_1 \varphi_j(1) + x_{N-1} \varphi_j(N-1) \quad (1 \leq j \leq N-1)$$

To solve this problem, it is necessary to use the principle of optimality in dynamic programming [Lezhnev, 2017]. The dynamic planning process will be carried out in the opposite direction, i. e. a decision will be made from the end to the beginning.

Let (27) be the maximum task:

$$y_j \rightarrow \max \text{ on condition } \bar{x} \in X_\Delta, \text{ t. e. } |x_{k-1} - x_k| \leq \Delta, \quad k = \overline{1, N-1},$$

where

$$y_j = x_0 \varphi_j(0) + x_1 \varphi_j(1) + x_{N-1} \varphi_j(N-1) \quad (1 \leq j \leq N-1) \quad (27)$$

Let $\hat{x}_0, K, \hat{x}_{N-2}$ in task (28) be selected. Then the last step is to choose x_{N-1} provided that $|x_{N-2} - x_{N-1}| \leq \Delta$. Let us say:

$$\hat{x}_{N-1} = \hat{x}_{N-2} + \Delta \cdot \text{sign} \varphi_j(N-1) \quad (28)$$

The solution of problem (28) after substitution (29) will have the form:

$$\begin{aligned} \hat{y}_j &= \hat{x}_0 \varphi_j(0) + \hat{x}_1 \varphi_j(1) + K + \hat{x}_{N-2} \varphi_j(N-2) + [\hat{x}_{N-2} + \Delta \cdot \text{sign} \varphi_j(N-1)] \varphi_j(N-1) = \\ &= \hat{x}_0 \varphi_j(0) + \hat{x}_1 \varphi_j(1) + K + \hat{x}_{N-2} [\varphi_j(N-2) + \varphi_j(N-1)] + \Delta \cdot |\varphi_j(N-1)| \end{aligned}$$

Now consider the following task (29):

$$y_j \rightarrow \max \text{ with task } \bar{x} \in X_\Delta, \text{ so } |x_{k-1} - x_k| \leq \Delta, \quad k = \overline{1, N-2} \quad (29),$$

where

$$y_j = \sum_{i=0}^{N-3} x_i \varphi_j(i) + x_{N-2} [\varphi_j(N-2) + \varphi_j(N-1)] + \Delta \cdot |\varphi_j(N-1)| \quad (1 \leq j \leq N-2).$$

Let's assume that $\hat{x}_0, K, \hat{x}_{N-3}$ in the problem (30) are optimal, then:

$$\hat{x}_{N-2} = \hat{x}_{N-3} + \Delta \cdot \text{sign} [\varphi_j(N-2) + \varphi_j(N-1)],$$

and the solution of the problem (30) will look like:

$$\begin{aligned} \hat{y}_j &= \hat{x}_0 \varphi_j(0) + \hat{x}_1 \varphi_j(1) + K + \hat{x}_{N-3} \varphi_j(N-3) + [\hat{x}_{N-3} + \Delta \cdot \text{sign}(\varphi_j(N-2) + \varphi_j(N-1))] \times \\ &\times [(\varphi_j(N-2) + \varphi_j(N-1))] + \Delta |\varphi_j(N-1)| = \hat{x}_0 \varphi_j(0) + \hat{x}_1 \varphi_j(1) + K + \hat{x}_{N-3} [\varphi_j(N-3)] + \\ &+ \varphi_j(N-2) + \varphi_j(N-1) + \Delta |\varphi_j(N-2) + \varphi_j(N-1)| + \Delta |\varphi_j(N-1)| \end{aligned}$$

Continuing this process, we have that with the optimal choice of components $\hat{x}_1, \hat{x}_2, K, \hat{x}_{N-1}$, satisfying the conditions of the problem (30), we will have:

$$\max_{\bar{x} \in X_\Delta} y_j = x_0 \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \varphi_j(i) + \Delta \cdot \sum_{m=1}^{N-1} \left| \sum_{i=m}^{N-1} \varphi_j(i) \right|, \quad j = \overline{1, N-1} \quad (30)$$

According to the orthogonality of the matrix DTFb and the presence of rows consisting of identical non-zero elements, we have:

$$\sum_{i=0}^{N-1} \varphi_j(i) = 0, \quad j = \overline{1, N-1} \quad (31)$$

Taking into account (32), we will have:

$$\max_{\bar{x} \in X_\Delta} y_j = \Delta \cdot \sum_{m=1}^{N-1} \left| \sum_{i=0}^{m-1} \varphi_j(i) \right|, \quad j = \overline{1, N-1} \quad (32)$$

Considering task (30) as a minimum task, we get (33):

$$\min_{\bar{x} \in X_\Delta} y_j = -\Delta \cdot \sum_{m=1}^{N-1} \left| \sum_{i=0}^{m-1} \varphi_j(i) \right|, \quad j = \overline{1, N-1} \quad (33)$$

From (33) and (34) it follows for the Fibonacci matrix $F = \|\varphi_j(i)\|_{j,i=0, N-1}$, and the DTFb, so

$$\bar{y} = Fx = (y_0, y_1, \dots, y_{N-1})^T,$$

is right:

$$\max_{\bar{x} \in X_\Delta} |y_j| = \Delta \cdot \sum_{m=1}^{N-1} \left| \sum_{i=0}^{m-1} \varphi_j(i) \right|, \quad j = \overline{1, N-1} \quad (34)$$

Using the ratio (35), we find the form of the matrix S for DTFb.

Statement. Let the original data vector belong to the class of vectors with real components (26) and let F be a Fibonacci matrix of order N (25). Then, the following inequality holds (35):

$$\max_{\bar{x} \in X_\Delta} |y_j| \leq \Delta 2.058 (N-1) \quad (1 \leq j \leq N-1) \quad (35)$$

Proof. According to (24), we have:

$$\lim_{\substack{i \rightarrow \infty \\ N \rightarrow \infty}} \sum_{i=0}^{m-1} \varphi_i(j) = \begin{cases} 1, & i < m-1 \\ \alpha^{\frac{3}{2}} \approx 2.058, & i = m-1 \end{cases} \quad (36)$$

$$\text{With } i < m-1, \max_{\bar{x} \in X_\Delta} |y_j| = \Delta(N-1)$$

$$\text{With } i = m-1, \max_{\bar{x} \in X_\Delta} |y_j| = \Delta 2.058 (N-1) \quad (37),$$

This was exactly what needed to be proved.

Corollary 1. When increasing the value of j , the value of the spectrum \bar{y} (37) it will increase, i. e. it is a monotonously increasing function, therefore, when compressing, it is necessary to replace the initial components of the vector with zeros \bar{y} .

Corollary 2. By virtue of Parseval's equality $\|\bar{x}\|_2 = \|\bar{y}\|_2$ the ratio (37) makes it possible to determine the maximum value of the DOT error using this additional.

Experiments

Soil degradation is a set of processes that lead to changes in soil functions, quantitative and qualitative changes in their properties, gradual deterioration and loss of fertility. The main cause of soil degradation is an anthropological factor: industrialization, urbanization, pollution with solid and liquid waste, poisoning of the soil with pesticides [Kazaryan et al., 2018 (a, b), 2019 (a, b)].

As an experimental part of the article, we investigate the problem of applying discrete orthogonal transformations using the example of the Fibonacci transformation for satellite images obtained from the artificial Earth satellite (ASE) Landsat, for aerospace monitoring of solid waste objects, so multispectral images are used, for example, obtained from Landsat-4-5 TM satellites for a given observation period (OP), usually at least 10 years. Data on the amount of precipitation in the study area for the same period. The images must be geo-linked, atmospherically adjusted and cloud-free. Used channels are 1-7 [Kazaryan et al., 2018 (a, b), 2019 (a, b)].

Let's consider as one of the methods of processing multispectral images that allow us to improve the results of decryption, the method of applying orthogonal transformations, in particular, the Fibonacci transformation is considered.

It is known that the bands of multispectral images very often turn out to be correlated [Shovengerdt, 2013]. The reason for this correlation may be:

- correlation of spectral properties of objects (this is possible, for example, with low reflectivity of vegetation in the visible part of the spectrum);
- topography (the level of shading due to topographic features can be considered the same in all ranges of registration of reflected solar radiation);
- overlapping of registration ranges (ideally, this factor is excluded when developing a sensor, but in practice this is not always done).

Such a correlation leads to the appearance of redundant information. The goal that we face is to try to get rid of it with minimal errors. First, let's consider the representation of a satellite image using orthogonal transformations. Next, we will consider data compression or the selection of certain features, i. e. we will make the transition to a new basis for measurements in fixed spectral channels.

It is known [Glumov, 1967; Chernov, 2013; Chernov, 2020] that an orthogonal transformation, which, on the one hand, provides a representation of the signal, and on the other hand, is optimal in the sense of the RMS criterion. This is the Karunen-Loew transformation. Let's consider how much more profitable it is to use other additional methods when decrypting satellite images.

The transformation matrix of the orthogonal transformation under study is fixed for a given type of sensor and shooting system, therefore, for each new shooting system, it is necessary to calculate new additional coefficients using the principal component method.

Let's consider the essence of the proposed method. The physical justification for it is as follows. In multispectral shooting systems, the image is formed in accordance with the reflection of electromagnetic energy from objects in narrow spectral zones.

The image in certain channels captures the reflection of the spectral brightness of the source object in a given range of the electromagnetic spectrum, i.e., the energy reflected from the surface

is measured by the camera system and recorded as the brightness of the corresponding image element.

The multispectral image is represented as a matrix (38):

$$P_M = \begin{pmatrix} \overline{P_{11}} & \dots & \overline{P_{1M}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \overline{P_{N1}} & \dots & \overline{P_{NM}} \end{pmatrix} \quad (38)$$

and contain the k images $P_{(k)}$, each of which represents the brightness values measured in narrow spectral zones (k is the number of channels of the shooting system). Vector $\overline{P_{ij}} = (p_{ij}^1, p_{ij}^2, \dots, p_{ij}^k)$ contains the brightness values of the elements p_{ij} in each channel of the filming system [Kazaryan et al., 2018 (a, b), 2019 (a, b)].

For different objects, the spectral luminances in different ranges of the electromagnetic spectrum, although different, are strongly correlated. Measurements in narrow spectral zones (channels) performed by a multispectral survey system do not eliminate correlation dependence. Thus, the measurement system does not form an orthogonal basis. Orthogonal transformations carry out the transition from the measurement space of spectral brightness of objects to the space of features associated with the properties of a given class of objects.

So, the experiment consists of performing two steps: the first is to apply an orthogonal transformation to the original image, which will make it possible to decorrelate the component vectors of the image and reduce the dimension of the image; the second is to build a trainable classifier to perform the task of pattern recognition.

Let's consider the implementation of the first part, namely, the selection of features.

The type of object that is subject to changes in the presence of solid household waste is considered: clean soil, i. e. we are interested in the sign of brightness.

The purpose of experimental studies is to evaluate the accuracy of soil decryption based on comparing the results of visual decryption from the original image and the image obtained using the DOT, as well as on the basis of comparing the results of classification without training using the K-MEANS algorithm from the original image, from an image with an orthogonal transformation.

After segmenting the selected SI, we define homogeneous clusters.

The further numerical algorithm is defined as follows. Let the initial matrix X of brightness of dimension $N * N$ is the realization of some random process with certain properties. Let's entertain the following notation:

- F — is a discrete orthogonal Fibonacci transformation;
- δ — is the value of the deviation of the original signal;
- F^{-1} — reverse conversion;
- k — is the compression ratio;
- S — is a matrix of choice of dimension $m * N$ of rank m , $1 \leq m \leq N$

Description of the Algorithm

Let's convert the digital image “ X ” to the spectral region “ Y ” as follows: $Y = FX$, where F is a discrete orthogonal Fibonacci transformation. Even if we consider the input signal to be set exactly, then the vector $\overline{Y} = SFX$ to be further processed is distorted. As a result of these actions, the original vector is restored with errors:

$$\varepsilon_1 = \rho_{l_2} (X, F^{-1}S^T SFX_\delta) \quad (39),$$

where l_2 — is the standard metric.

Using the example of individual transformations, we will evaluate the possibility of using an additional one in the task of recognizing open-type debris areas from satellite images X . To do this, for this type of transformation, we will find the matrices $W = F^{-1}SF$, at which the minimum deviation value is reached for a given class of objects (littering areas) $\varepsilon = \rho(WX, C)$, where F^{-1} — is the inverse matrix DOT (in particular, it can be an inverse or pseudo-inverse matrix), $X = f^{-1}(Y) = F^{-1}Y$, S — the matrix of class selection, C — the matrix of selection of reference areas occupied by known MSW in the field of observation, ρ — some norm.

RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

The regression analysis method

Let's find the matrix W for the halftone image X using the standard deviation method:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \sum_{i,j} a_{ij}^2 \rightarrow \min, \quad A = [a_{ij}]_{n*m} = WX - C \quad (40),$$

W is not tied to any type of OT and sets some affine transformation of the original matrix X into the desired matrix C — a binary image of the selection of the test area (element values: 1 — area, 0 — background). For a given image X of size $n \times m$, the W operator is unique and restores the area C with a given accuracy D .

Criterion (40) is transformed into a system of equations:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial a_{ij}} = 0 = \sum_{k=1}^m a_{ik} x_{jk} \quad (41)$$

$$a_{ij} = w_{i1}x_{1j} + w_{i2}x_{2j} + \dots + w_{in}x_{nj} - c_{ij}, \quad i = 1 \dots n, j = 1 \dots m$$

$$X = [x_{ij}]_{n*m}, \quad W = [w_{ij}]_{n*n}, \quad C = [c_{ij}]_{n*m}$$

As a result of solving a system of linear algebraic equations (41) from mn equations, we find:

$$W = \left(\left(D \cdot (XC^T) \Big|_{n^2 * 1} \Big|_{n * n} \right) \right)^T, \quad D = I_n \otimes B, B = (XX^T)^{-1} \quad (42),$$

where \otimes and \cdot — operations of Kronecker and ordinary matrix products,

$A \Big|_{n*m}$ — the operation of transforming the size of the matrix A to size $n = m$ (when moving through the elements in the column directions, starting from the first element),

I_n — a unit matrix of size n .

Matrix of class area allocation according to its standard: $E = WX$.

Discussion of the results of the regression analysis method

Let's look at the example of specific images of the result of the experiment.

Fig. 3 shows an example of the transformation and restoration of the reference area (MSW Kuchino polygon, August 2011). From the figure it can be seen that for the “native” image X , the matrix $E = C$, and for another X' , close in date to the shooting from X — $E' \approx C$.

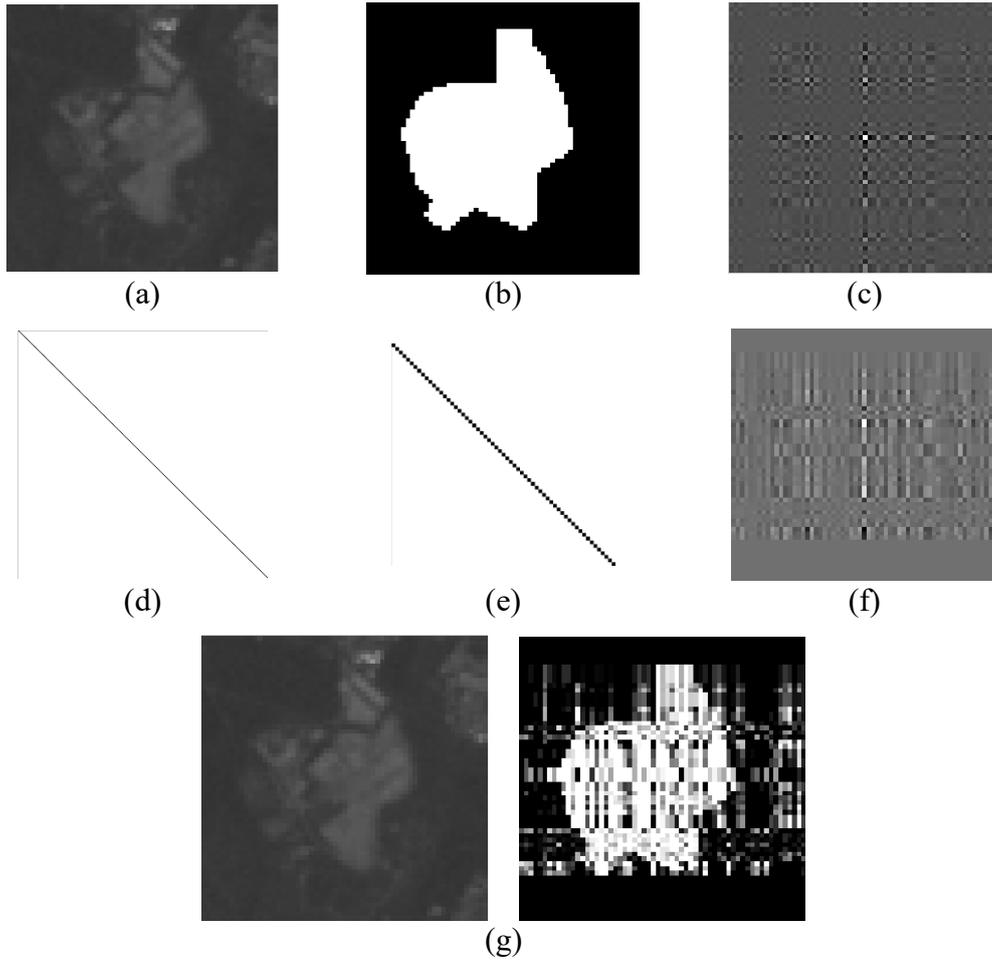


Fig. 3. a) the original image X ($n = m = 64$); b) the reference C (identical to the matrix E); c) matrix B ; d) the unit matrix I_n ; e) the Kronecker product D (diagonal blocks — matrix B); f) matrix W ; g) matrix E' for another image X' ($E' \approx E$)

It is clear that the more input images $\{X^k\}$ are taken over a wider observation period T and the more channels $\{X^{lk}\}$, the more accurate the selection of the object on which the standard is built. Then, plus, the more reference areas $\{C^p\}$, the more accurate the selection is not only of all objects on which the corresponding ones are built standards, but also within the limits of the very class of these objects.

More generally, the input matrices X and C : can be obtained through the Kronecker product:

$$X = J_{1*p} \otimes X', C = J_{l*k*1} \otimes C', \quad X^1 = \begin{bmatrix} X^1 \\ \dots \\ X^k \end{bmatrix}, X^k = \begin{bmatrix} X^{1k} \\ \dots \\ X^{lk} \end{bmatrix}, C^1 = [C^1 \quad \dots \quad C^p],$$

where $J_{n \times m}$ — matrix of units of size $n \times m$, k — the number of images covering the observation area U during the observation period T , l is the number of channels, p is the number of standards lying on the area U . X^{lk} and C^p — matrices of size $nm \times 1$ (transformation from matrices of size $n \times m$).

Coefficient matrix (the operation of constructing a block diagonal matrix W from the main diagonal w):

$$W = I_n \otimes w = \begin{bmatrix} W^1 & & & \\ & W^2 & & \\ & & \dots & \\ & & & W^k \end{bmatrix}, \quad w = [W^1 \quad W^2 \quad \dots \quad W^k],$$

where W — the desired matrix of $nmlk \times nmlk$ size coefficients describing this class of objects; W^k are matrices of $nml \times nml$ size coefficients obtained for the k -th snapshot.

Block-diagonal matrix $E = I_n \otimes e = WX$, where $e = [E^1 \ E^2 \ \dots \ E^k]$ will have a size of $nmlk \times l$. If the OT is not carried out on all channels, but on each separately:

$$W^k = I_l \otimes w^k, E^k = I_l \otimes e^k, W^{lk} = I_m \otimes w^{lk}, w^k = [W^{1k} \quad W^{2k} \quad \dots \quad W^{lk}], \\ e^k = [E^{1k} \quad E^{2k} \quad \dots \quad E^{lk}], w^{lk} = [W'^{1k} \quad W'^{lk} \quad \dots \quad W'^{lk}].$$

W^{lk} — coefficient matrices of size $n \times n$ obtained on the l -th channel of the k -th image using the model (42) for $X = J_{1*p} \otimes X^{lk} \Big|_{n*m}$ and $C = C'$ (for the “final” OT).

Each W^k matrix identifies a class on a specific day of shooting (chronological, seasonal), detection image: $E^k = W^k X^k$.

The Karunen-Loew transformation

The Karunen-Loew transformation (principal component method) consists in the transition from a system of k old variables (factors) to a system of $k' < k$ new variables (principal components). The original image X , consisting of channels $\{X^l\}$, $l = 1 \dots k$, converted to an image Y , converted to an image $\{Y^l\}$, $l = 1 \dots k'$.

To do this, an OT:

$$Y^l = v X^l, \quad v = [v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_k]^T, \quad X^l = [X^{l1} \quad X^{l2} \quad \dots \quad X^{lk}]^T,$$

where v_l — the eigenvectors of the matrix $C = [c_{ij}]$ of size $k \times k$ (the dimensions of the vectors are $k \times l$), arranged in descending order of eigenvalues d_i ;

c_{ij} — the correlation coefficient between the above factors X^i and X^j .

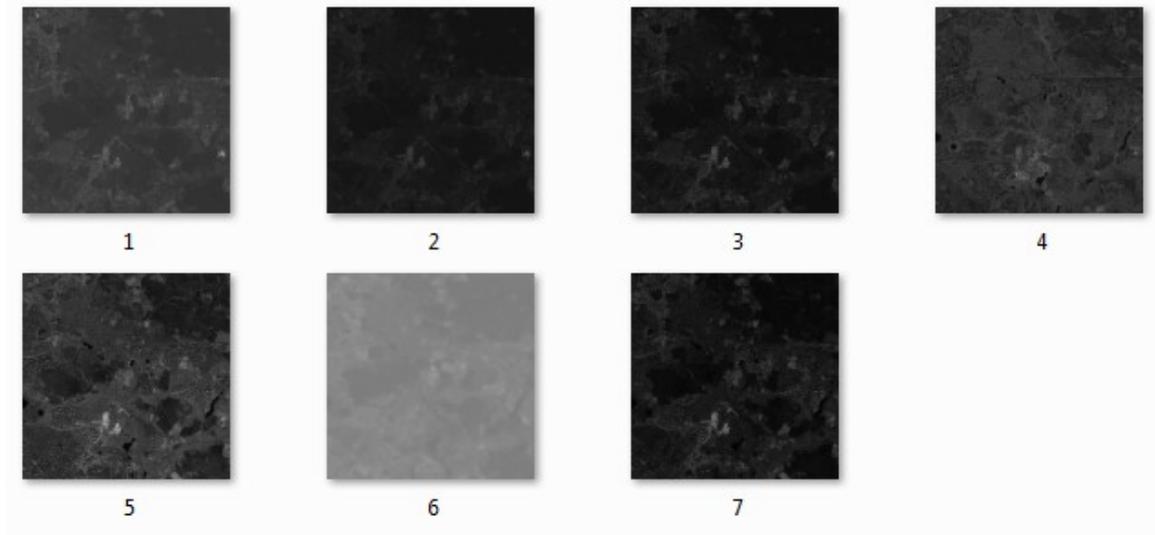
$$X^{li} = \frac{X'^{li} - m_i}{s_i},$$

where m_i and s_i — mathematical expectation and standard deviation of the sample X'^{li} ;
 X'^{li} — vector columns of dimensions $nm \times l$ obtained by transformation from matrices X^l of dimensions $n \times m$.

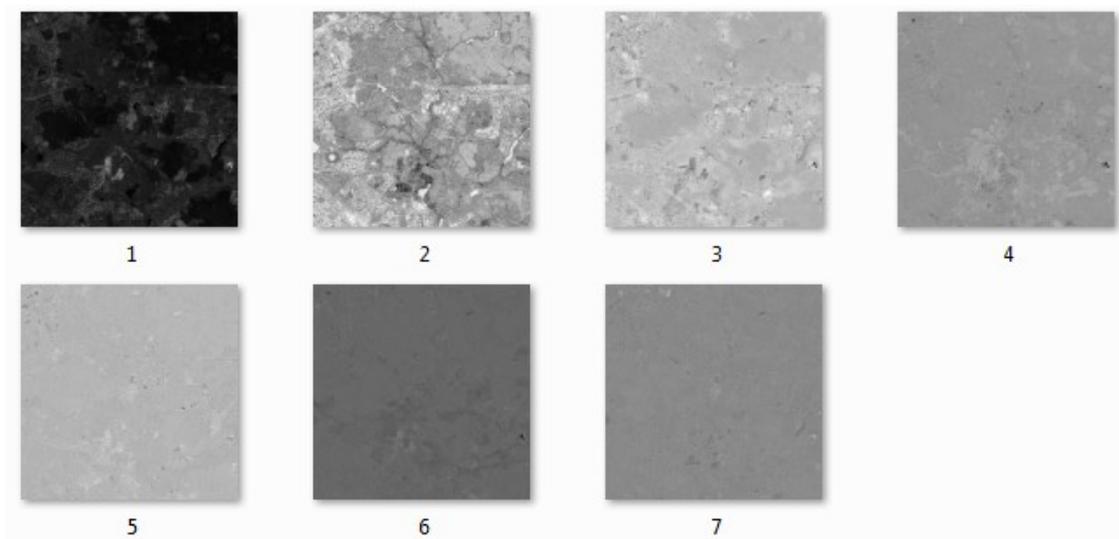
From the matrix $Y' = [Y^1 Y^2 \dots Y^k]$ the first $k' < k$ columns are selected — a matrix of the main components is obtained $Y = [Y^1 Y^2 \dots Y^{k'}]$. Usually, $k' = 1 \dots 4$.

Discussion of the results of the Karunen-Loew transformation

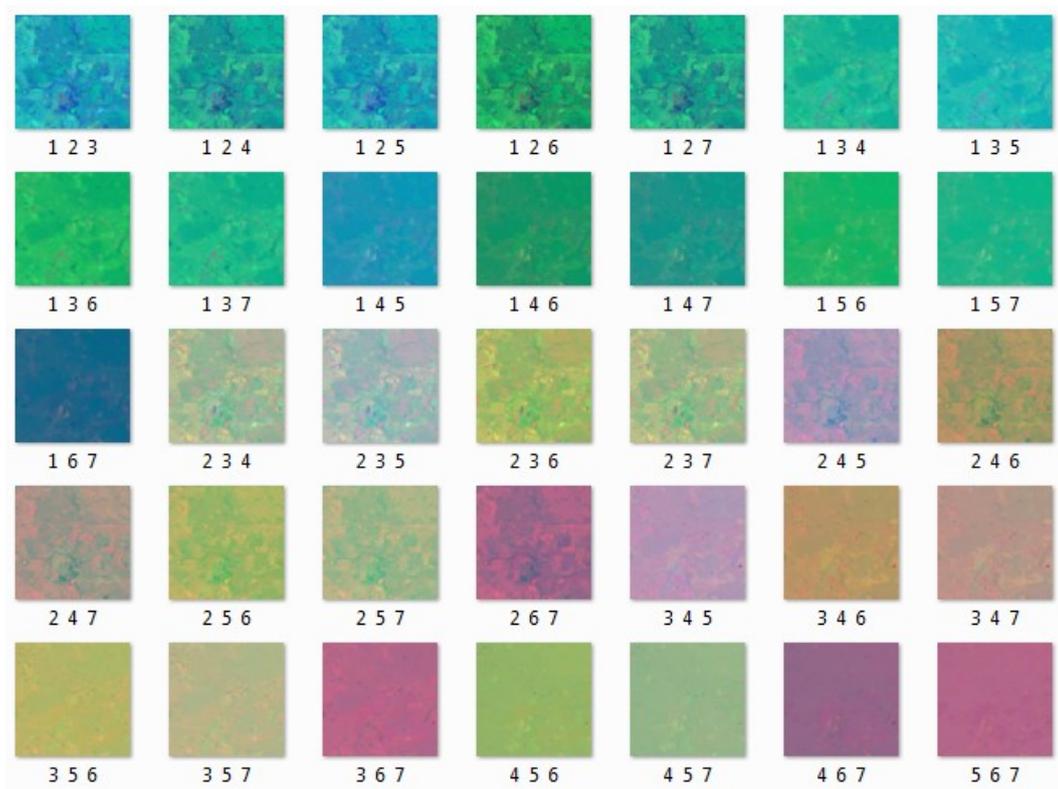
Fig. 4 shows an example of constructing the main components for a multispectral image of the observation area (Balashikha district, Zheleznodorozhny island, August 2011). Despite the fact that the most significant components are 1–3, the best selection of areas of debris and open soil highlighted in dark blue (d) is given by combination 1 (on the red channel), 2 (on the green channel) and 6 (on the blue channel) main components.



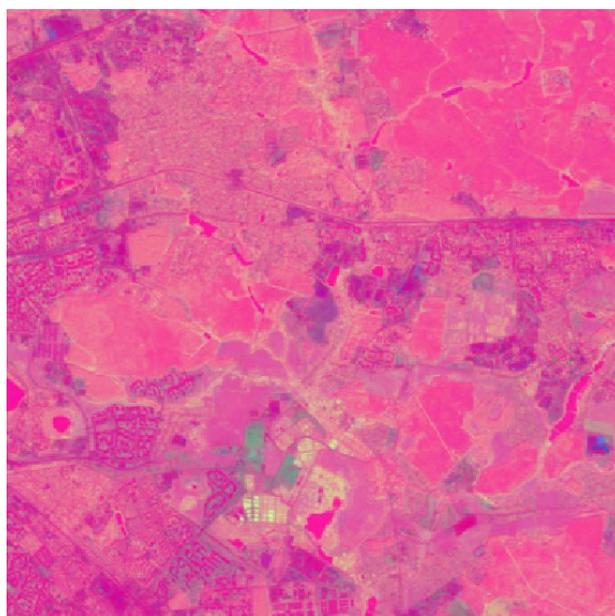
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4. Application of the principal component method in the problem of recognizing areas of debris: a) the original image X (canals X^l); b) main components Y^l ; c) combination of the main components; d) the best combination ([1 2 6] canals). The transformation operator v is calculated for each image X , i. e. there is no “universal” transformation. In the output composite images, the color of the litter selection may be different, but it differs from the background

The transformation operator v is calculated for each image X , i. e. there is no “universal” transformation. In the output composite images, the color of the litter selection may be different, but it differs from the background.

Fibonacci transformation

The Fibonacci transformation in matrix form can be written as (43):

$$Y = FX, \quad X = F^{-1}Y \quad (43),$$

where X and Y — are matrices of a halftone image of size $n \times n$ in brightness and frequency space; F and F^{-1} — are linear operators of size $n \times n$ of the forward and reverse Fibonacci transformations for the corresponding images X and Y .

The matrix X is obtained by changing the size of the original matrix X with $m \times m$ before $n \times n$, where $n = 2^N$, $N = 1, 2, \dots$, that is, a change in spatial resolution. To do this, the functional is interpolated $z = X(x,y)$, set by a grid of values $x = 1 \dots m$, $y = 1 \dots m$ with a step $h = 1$ (m values along the abscissa and ordinate axes), in the functional $z = X(x,y)$, set by a grid of values $x = 1 \dots m$, $y = 1 \dots m$ with a step $h = (m-1) / n$ (n values along the abscissa and ordinate axes).

The compression of the Y matrix is provided by the compression matrix (selection matrix) (44):

$$S = I_n \otimes s, \quad s = \begin{bmatrix} J_{1 \times n'} & O_{1 \times (n-n')} \end{bmatrix} \quad (44),$$

where $O_{n' \times m}$ — a matrix of size zeros $n \times m$, $n' = n / K$, where $K = 2^{N'}$ — compression ratio of a two-dimensional signal, $N' < N$, $N' = 1, 2, \dots$

The effect of the operator S on Y , acting as a low-pass filter (from l to n'), leads to another direct conversion result: $Y' = SFX$. As a result of the reverse conversion F^{-1} matrix Y' signal $X' = F^{-1} Y'$ is restored with precision (45):

$$\varepsilon_1 = \rho_{l_2}(X, X') = \sqrt{\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_{ij} - x'_{ij})^2} \quad (45),$$

where l_2 — the standard deviation of the difference matrix $D = X - X'$, $X = [x_{ij}]_{n \times n}$;
 $X' = [x'_{ij}]_{n \times n}$, ε_1 — error in restoring a two-dimensional signal as a result of DOT.

Let's evaluate the recovery errors $\varepsilon_1, \varepsilon'_1$ for Fibonacci conversion at different compression ratios $j = N'$ and on different channels i of the original image X of the littering area (Kuchino landfill, August 2011). We believe $N = 10$, $\alpha = 10^{-4}$.

Discussion of the results of the Fibonacci transformation

Fig. 5 shows the matrices $E_1 = [\varepsilon_1(i,j)]$, $E_2 = [\varepsilon_2(i,j)]$, $E'_1 = [\varepsilon'_1(i,j)]$, $E'_2 = [\varepsilon'_2(i,j)]$, of sizes $l \times (N - 1)$. We see that the maximum accuracy is observed on the 6-th (thermal) channel and it changes slightly during compression. Matrices $E_1 \approx E'_1$.

Fig. 6 shows an example of signal recovery at $N' = N / 2 = 5$. It can be seen from Fig. 6e that an increase in spatial resolution and a decrease in the compression ratio have little effect on the recovery result. In other words, the image of littering can be restored both while maintaining and even reducing the spatial resolution, and with its strong compression. This is due to the fact that the littering texture is characterized by a random, random spatial distribution of pixel brightness.

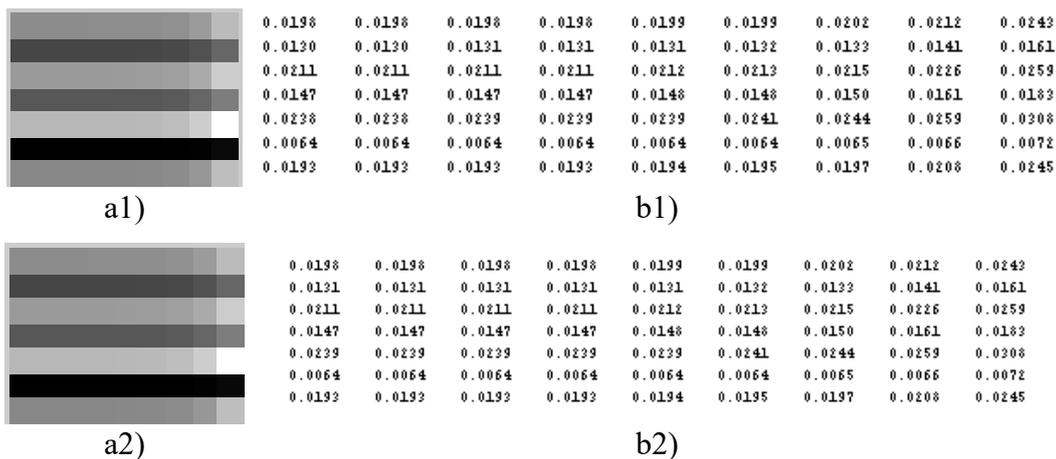
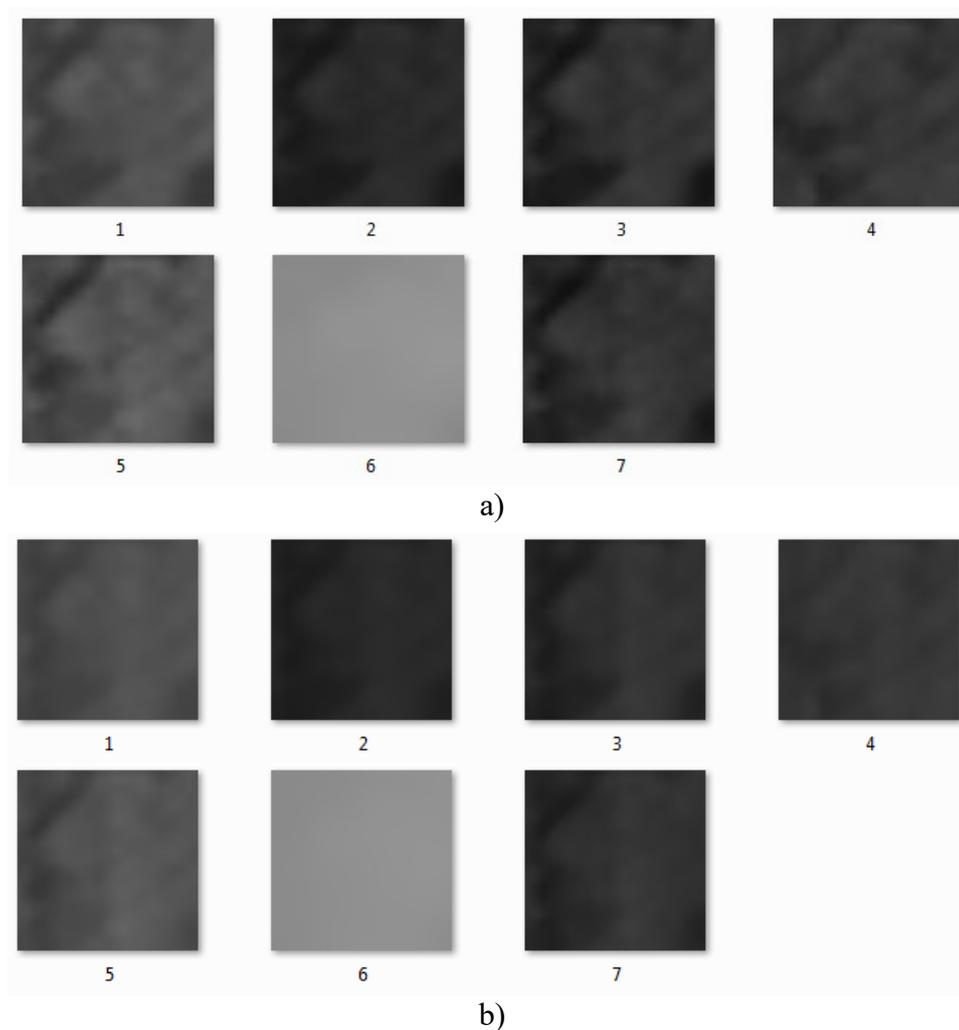
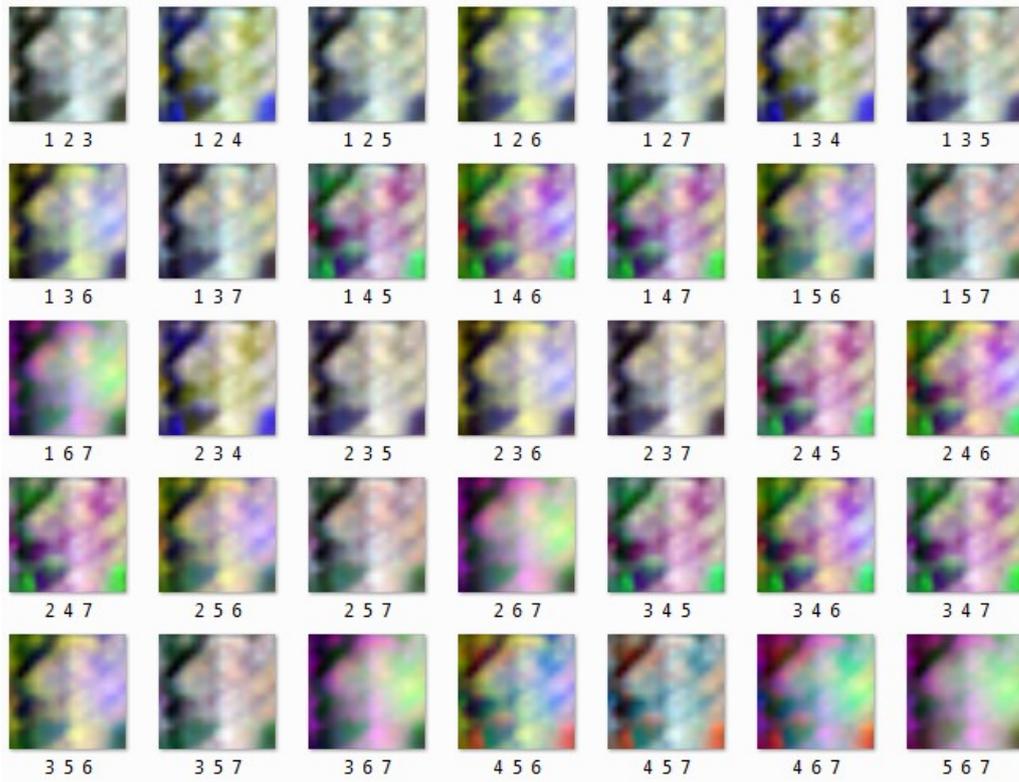
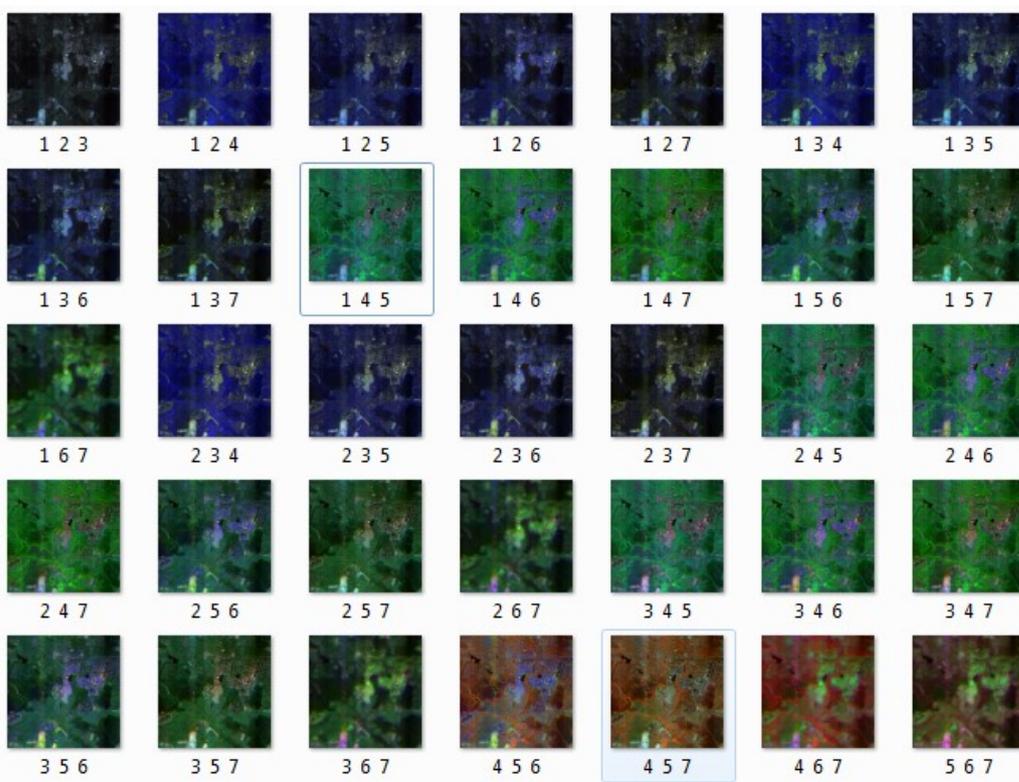


Fig. 5. Recovery errors: 1) ϵ_1 ; 2) ϵ'_1 ; a) on different channels and at different compression ratios; b) matrices

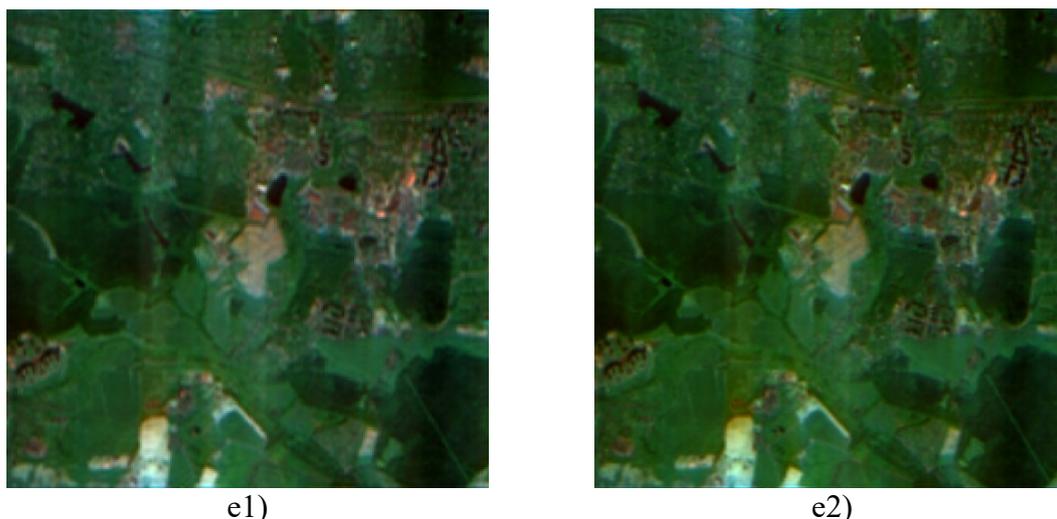




c)



d)



*Fig. 6. An example of the Fibonacci transformation of a littering image:
a) the original images (with an increase in spatial resolution, $N = 10$);
b) the Fibonacci transformation with compression ($N' = 5$);
c) the composites of transformations (combining different channels, $N = 8$, $N' = 2$);
d) the best transformation (combination [3 5 7]);
e) examples of images (1 — $N = 8$, $N' = 2$; 2 — $N = 10$, $N' = 3$)*

CONCLUSIONS

The paper provides a detailed mathematical study of Fibonacci transformations. A statement related to the Karunen-Loew transformation and a theorem are proved, in which the type of the selection matrix S is specified when performing compression by means of zone coding using a discrete Fibonacci transformation.

An experiment is being conducted, which is carried out in two stages. The first stage is the application of a DOT onto the original image to perform image decorrelation and decrease the dimension of the original image accordingly. The second stage consists in the formation of a trained classifier for decrypting the image.

These studies find application in conducting space monitoring of the Earth using a remote sensing device to prevent environmental and emergency situations on a global scale.

REFERENCES

- Agaian S. S.* Successes and problems of fast orthogonal transformations. Recognition, classification, prognosis. Moscow: Nauka, 1990. Iss. 3. P. 146–214 (in Russian).
- Agaian S. S., Aizenberg N. N., Alaverdian S. B.* Discrete Fibonacci transformation. Problems of theoretical cybernetics. Abstracts of the III World Conference. Gorky, 1988. P. 5–67 (in Russian).
- Agaian S., Alaverdian S.* Fast orthogonal Fibonacci transform. Osaka, Japan: Proc. Int. Coll. On Coding Theory, 1998. P. 335–353.
- Bergman G.* A number system with an irrational base. Mathematics Magazine, 1957. No. 31. P. 98–119.
- Bertrand-Mathis A.* Comment écrire les nombres entiers, dans une base qui n'est pas entière. Acta Mathematica Hungarica, 1989. V. 54. No. 3–4. P. 237–241 (in French).
- Chernov V. M.* Discrete orthogonal transformations on fundamental domains of canonical number systems. Computer optics, 2013. V. 37. No. 4. P. 484–488 (in Russian).

- Chernov V. M.* Discretionary orthogonal transformations at the molecular level associated with complete researchers. Proceedings of the Institute of Mathematics and Mechanics of the Russian Academy of Sciences, 2020. V. 26. No. 3. P. 249–257 (in Russian).
- Crippen R. E.* Calculating the vegetation index faster. Remote Sensing of Environment, 1990. V. 34. P. 71–73.
- Fraenkel A.* Systems of numeration. American Mathematical Monthly, 1985. V. 92. P. 105–114.
- Fraenkel A.* The use and usefulness of numeration systems. Information and Computation, 1989. V. 81. No. 1. P. 46–61.
- Garcia L. A., Foged N., Cardon G.* A GIS-Based Model to Estimate Relative Reductions in Crop Yield Due to Salinity and Waterlogging: Philosophy and Development. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006. No. 132(6). P. 553–563.
- Glumov N., Myasnikov V., Sergeyev V.* Polynomial bases for image processing in a sliding window. Pattern Recognition and Image Analysis, 1994. V. 4. No. 4. P. 408–413.
- Golubov B. I., Efimov A. V., Skvortsov V. A.* Walsh series and transformations: Theory and applications. Moscow: URSS, LKI, 2008. 352 p. (in Russian).
- Gonzalez R., Woods R.* Digital image processing. Moscow: Technosphere, 2019. 1104 p. (in Russian).
- Gradstein I. S., Ryzhik I. M.*, Tables of integrals, sums, series and products. Moscow: Fizmatgiz, 1963. 1100 p. (in Russian).
- Hall M.* Combinatorial Theory. Waltham (Massachusetts)–Toronto–London: Blaisdell Publishing Company, 1967.
- Ivashko A. V.*, Algorithms and devices for digital processing and data transmission based on integer exponential basis sequences. Abstract of the dissertation... of PhD of technical sciences. Kharkov, 1983. 20 p. (in Russian).
- Kazaryan M. L.* Mathematic — systemic researching with the involvement of fractals when processing of space surveillance systems on recognition of waste disposal objects. Aerospace Research in Bulgaria. Bulgarian Academy of Sciences. Space Research and Technology Institute, 2021. V. 33. P. 124–139.
- Kazaryan M. L., Shakhramanyan M. A., Nedkov R., Borisova D., Avetisyan D.* Fractal presentation of space images during waste disposal sites monitoring. Proceedings of Seventh International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2019), 2019 (a). V. 111740. DOI: 10.1117/12.2532890.
- Kazaryan M. L., Shahramanian M. A., Voronin V. V.* The automated space-monitoring system of waste disposal sites. Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments III, Berlin, Germany: Proceedings of SPIE Remote Sensing, 2018 (a). V. 1079318. DOI: 10.1117/12.2500059.
- Kazaryan M. L., Shahramanian M. A., Zabunov S.* Investigation of the similarity algorithm of the satellite images storage system for stability on the basis of Haar wavelets according to Tikhonov. Aerospace Research in Bulgaria, Bulgarian Academy of Sciences. Space Research and Technology Institute, 2019 (b). V. 31.
- Kazaryan M. L., Shahramanian M. A., Zabunov S.* Investigation of the basic Haar wavelet-transformations in the problem of decryption of space images on detection of waste disposal fields. Aerospace Research in Bulgaria. Bulgarian Academy of Sciences. Space Research and Technology Institute, 2018 (b). V. 30. P. 96–103.

Kazaryan M. L., Voronin V. V. Satellite image processing based on percolation for physico-chemical analysis of soil cover of industrial waste facilities. *Sensors and Systems for Space Applications XIV. Proceedings of SPIE*, 2021. V. 117550W. DOI: 10.1117/12.2587769.

Korn G., Korn T. Handbook of Mathematics for researchers and Engineers. Definitions, theorems, formulas. Moscow: Nauka, 1978. 832 p. (in Russian).

Lezhnev A. Dynamic programming in economic problems: A textbook. Moscow: Prosveshchenie–Binom, 2017. 505 p. (in Russian).

Manzo C. Integrated remote sensing for multi-temporal analysis of anthropic activities in the south-east of Mt. Vesuvius National Park. *Journal of African Earth Sciences*, 2016. V. 122. P. 63–78.

Nadudvari A. Thermal mapping of self-heating zones on coal waste dumps in Upper Silesia (Poland). *International Journal of Coal Geology*, 2014. V. 128–129. P. 47–54.

Shovengerdt R. A. Remote sensing. Models and methods of image processing: A textbook. Moscow: Technosphere, 2013. 624 p. (in Russian).

Stakhov A., Luzhnetsky V. Computer arithmetic of digital computers in Fibonacci codes and the “golden” proportion. Moscow: Academy of Sciences of USSR, 1981. 64 p. (in Russian).

Umnyashkin S. V. Fundamentals of the theory of signal processing: A textbook. Moscow: Technosphere, 2021. 550 p. (in Russian).

Igor N. Kartsan^{1,2}, Aleksandr O. Zhukov^{3,4}, Vladimir O. Skripachev⁵

MODEL FOR CALCULATING THE SPEED OF DELIVERY OF REMOTELY SENSED EARTH OBSERVATION INFORMATION

ABSTRACT

In full accordance with the observed intensive growth of the global market for products and services based on space-based information provided by space-based Earth observation assets, satellite missions and space-based Earth remote sensing technologies are currently undergoing rapid development. Space images are important for monitoring emergency situations: floods and inundations, forest fires and earthquakes. A wide range of Earth remote sensing satellites equipped with many types of target equipment are used to obtain all that information. In the course of developing the design of a space-based operational data transmission system, which is based on a heterogeneous orbital constellation using a network of relay satellites, it is necessary to model the ballistic structure of the Earth remote sensing orbital constellation. The efficiency of Earth remote sensing information delivery to consumers should be considered under various options of building a network of relay satellites, taking into account the characteristics of existing and prospective high-speed radio lines of satellites. During modeling it is also necessary to take into account that in the case of a single repeater satellite the best picture on the minimum times of information delivery efficiency from the Earth remote sensing satellite is observed for a low-orbit repeater satellite, and the best picture on the maximum times of information delivery efficiency from the Earth remote sensing satellite is observed for a geostationary repeater satellite. An algorithm for model formation of an orbital constellation of different types of satellites with given initial ballistic characteristics is created. The presented algorithm consists in sequential calculation of initial conditions of reference satellites for each plane, and then, according to the initial conditions of the reference satellite, calculation of initial conditions of other satellites of the given plane.

KEYWORDS: Earth remote sensing, satellites, transponder satellite, orbit, efficiency of information delivery

INTRODUCTION

Russia successfully operates a constellation of Earth remote sensing satellites (ERS satellites) for socio-economic purposes, consisting of the following actively operating satellites:

- Meteor-M satellites;
- Elektro-L satellites;
- The Kanopus-V family (including the Kanopus-V-IR satellites);
- Arktika-M satellites.

Strategic planning documents in the area of space activities in the interests of socio-economic development set the task of ensuring the development of the main technical

¹ Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, 2, Kapitanskaya str., Sevastopol, 299011, Russia, *e-mail*: kartsn2003@mail.ru

² Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31, Gazety Krasnoyarsky Rabochy ave., Krasnoyarsk, 660037, Russia, *e-mail*: kartsn2003@mail.ru

³ Expert and Analytical Center, 33, Talalikhina str., Moscow, 109316, Russia, *e-mail*: aozhukov@mail.ru

⁴ Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, 48, Pyatnitskaya str., Moscow, 119017, Russia, *e-mail*: aozhukov@mail.ru

⁵ Expert and Analytical Center, 33, Talalikhina str., Moscow, 109316, Russia, *e-mail*: skripatchevv@inbox.ru

characteristics of domestic satellites for socio-economic, scientific and dual-use applications to a level not inferior to the best foreign analogs.

In terms of remote sensing of the Earth from space, the goal is to ensure round-the-clock and all-weather observation of Russia territory, as well as to create a scientific and technical foundation for Russia full-fledged representation in all segments of the world market of space services [Agapov, 2000; Ozdogan, 2010; Kartsan et al., 2018; Erunova, Yakubailik, 2019; Ivanova et al., 2019; Erunova, Yakubailik, 2020; Barkova, Zhukov, 2021].

The main requirements of consumers to ERS data are to achieve the following characteristics of space data in the future:

- In terms of spatial resolution. The maximum value is set at the level of the best world analogs (0.2 m for optical and 0.5 m for radar data).
- Frequency and efficiency of ERS data acquisition depend on the technical capabilities of Russian ERS satellites, except for tasks related to monitoring of emergency situations (ES) and dynamics of natural processes, as well as on the development of multi-satellite orbital constellations (OC). For such tasks overestimated requirements from the side of information users, for example, from 0.1 hours (close to real time mode), are a guideline for the development and improvement of technical means of receiving, receiving, processing and delivery to the consumer; and also depend on the development of multi-satellite OC.
- On radiometric resolution of optical data. It is defined by 3 intervals: 8–12 bits, 12–14 bits (for oceanography) and up to 16 bits (for tasks of power agencies).
- Radiometric resolution of infrared (IR)- and ultra-high frequency (UHF)-surveys is set in accordance with the requirements of the World Metrology Organization (WMO) and the level of world analogues.
- By spectral range. The values are chosen in accordance with the zones of solar radiation transmission by the Earth's atmosphere. In general, the intervals correspond to the visible, near, middle and far infrared ranges of the electromagnetic spectrum. To account for atmospheric scattering and to solve individual tasks, the visible range includes the blue channel (0.43–0.45 μm). Solution of thematic tasks related to vegetation cover and chemical composition of compounds in the atmosphere implies narrow-band spectral imaging.
- In terms of georeferencing accuracy. For medium resolution optical data, the sub-pixel accuracy is assumed, for high and ultra-high resolution optical data the accuracy of orbital parameters referencing is set at the level of world analogs (not more than 2–5 pixels of the initial resolution), for radar data and low-resolution optical data the accuracy is not set;
- Frequency of ERS data update will be increased by more than an order of magnitude from 0.2 times per day to 8 times per day.

RESEARCH MATERIALS AND METHODS

Formation of the OC model of different-type satellites with given initial ballistic characteristics consists of 2 stages:

1. Formation of the ballistic structure of the satellites included in the OC as a solution to the problem of determining the initial conditions of each satellite from the OC.
2. Assignment to each satellite of its own type(s) by specifying the characteristics of the onboard equipment placed on it.

The following terminology is used in the development of the algorithm for the formation of the ballistic structure of the OC. The first satellite of the first orbital plane is called fundamental, and the first satellite of each subsequent orbital plane is called a reference for this plane.

The algorithm consists in sequential calculation of initial conditions of the reference satellites for each plane, and then, according to the initial conditions of the reference satellite, calculation of the initial conditions of the other satellites of the given plane.

All calculations of initial conditions are performed in the form of osculating Keplerian elements in the true equatorial date system, i. e. the initial conditions of the fundamental satellite are reduced to Keplerian elements; on their basis, the Keplerian elements of the reference satellites for the other planes are calculated, and then the Keplerian elements of all other satellites in each plane are calculated.

This set of Keplerian elements is further referred to as Keplerian formants. Finally, if necessary, the Keplerian formants of all satellites are reduced to the type of initial conditions required for the chosen algorithm (TLE for the SGP algorithm, phase vector for numerical integration) [Redowan et al., 2014; Kartsan et al., 2016; Tyapkin et al., 2017; Sankey et al., 2018; Wang et al., 2018; Vermeulen et al., 2021].

As input data for the algorithm of OC model formation is given:

1. The number of orbital planes N .
2. The number of satellites in each orbital plane M .
3. Initial conditions of the fundamental satellite (the first satellite of the first plane) in the form of Keplerian orbit elements in the true equatorial date system:
 - a) major semi-major axis of the orbit $a_{1,1}$;
 - b) orbital eccentricity $e_{1,1}$;
 - c) orbital inclination $i_{1,1}$;
 - d) longitude of the ascending node of the orbit $d_{1,1}$;
 - e) orbital perigee argument $w_{1,1}$;
 - f) average orbital anomaly $m_{1,1}$;
 - g) the time at which the initial conditions are given $t_{1,1}$.
4. Angle between ascending nodes of neighboring orbital planes $d_{ln}g$.
5. Algorithm of satellite location in the orbital plane; determines which of the initial conditions parameters of satellites located in the same plane changes: mean anomaly, latitude argument or initial conditions time.
6. The value by which the parameter specified in clause 5 is changed: the angle between the mean anomalies of neighboring satellites of the d_m plane, the angle between the latitude arguments of neighboring satellites of the d_{arg_lat} plane, or the time shift between the initial conditions time of neighboring satellites of the d_t plane. Hereafter, this value is referred to as the separation.
7. The value by which the parameter specified in clause 5 is changed for all satellites of each subsequent plane: the angle between the mean anomalies of the corresponding satellites of neighboring planes $dshift_m$, the angle between the latitude arguments of the corresponding satellites of neighboring planes $dshift_{arg_lat}$, or the time shift between the times of the initial conditions of the corresponding satellites of neighboring planes $dshift_t$. Setting this value to non-zero will allow us to introduce asynchrony of location of corresponding satellites in neighboring planes. Hereinafter this value is called phase shift.

The algorithm of OC model formation consists of the following steps:

1. Calculation of the longitude of the ascending node of the reference satellites of each plane. The Keplerian elements of the reference satellites of each plane differ from the Keplerian elements of the fundamental satellite by the longitude of the ascending node and phase offset.

2. Depending on the algorithm specified in item 5 of the input data, the initial data of the reference satellites are calculated in different ways.
3. Calculation of the Keplerian elements of the remaining satellites. The Keplerian elements of the satellites of a fixed plane differ from the Keplerian elements of the reference satellite of this plane either by the mean anomaly or by the time of initial conditions, depending on the algorithm specified in item 5 of the input data.

Thus, the algorithm allows obtaining the values of the Keplerian shapes and initial conditions for all satellites of a given OC.

When solving the problem of synthesizing the orbital constellation, different parameters of Keplerian formations of different satellites appear to be related.

Thus, the values of the Keplerian frames of the reference satellites are related to the values of the Keplerian frames of the fundamental satellite, and the frames of all other satellites are related to the frames of the reference satellites [Artyushenko, Kucherov, 2013; Kobets et al., 2015; Aleksakhina et al., 2016; Kucherov, 2018; Loupian et al., 2019; Mukhamedjanov et al., 2019].

In this case, some relationships between the Keplerian formants should change with the change of the parameter of the reference or fundamental satellites. For example, if the large semi-major axis of the fundamental satellite changes, its orbital period $drac_{p_{1,1}}$ will change.

In case the satellites in the plane were spaced uniformly in time, i. e. the initial condition times were tied to the draconic period of the fundamental satellite, they should be recalculated based on the new value of the period. The same applies to the phase shift between the corresponding satellites of neighboring orbital planes.

Separately, the inclination, which ensures solar synchronization of the orbit, should be taken into account. If the satellite's semi-major axis or eccentricity changes, the inclination should be recalculated.

Thus, in a sun-synchronous constellation with uniform separation and with uniform phase shift in time, if the semi-major axis of the fundamental satellite is changed, the semi-major axis of all reference satellites should be changed, followed by all other satellites.

Recalculation of the sun-synchronous inclination of the fundamental satellite should be performed, followed by a change in the inclination of all reference satellites, and then all other satellites.

The draconic period of the fundamental satellite should be recalculated, as well as the magnitude of the time shift of the initial conditions of the satellites in one plane, and the magnitude of the time phase shift of the initial conditions of the corresponding satellites on neighboring orbital planes.

Subsequent typification of satellites is achieved by adding satellites with appropriate equipment [Congalton, Green, 2009; Kolecka, Kozak, 2014; Patel et al., 2016; Jain et al., 2018; Chymyrov, Bekturov, 2019; Proshin et al., 2019].

For remote sensing satellites, the following characteristics of the on-board equipment are specified:

- maximum roll angle of a satellite or a platform with a remote sensing complex;
- maximum inclined range from the remote sensing satellite;
- pitch deflection angle;
- lens focal length;
- element size;
- matrix line length;
- information flow (possible recalculation from the number of matrices, matrix size, radiometric resolution);
- time of shooting of one object of observation;

- compression parameter of on-board information processing system;
- algorithm of LRM calculation.

The listed characteristics of remote sensing satellites make it possible to determine the following parameters:

- remote sensing satellite swath of view;
- instantaneous viewing area of the satellite;
- assessment of remote sensing information quality by pixel projection size;
- assessment of remote sensing information quality by LRM level, including for the matrix in time delay and accumulation mode;
- estimation of data volume of received ERS data.

The listed characteristics allow determining the following parameters:

- estimation of the data volume of the received ERS data.

The geostationary orbit parameters of relay satellites (SR) are calculated for a given longitude of the SR sub-satellite point. The following radio link (RL) characteristics are specified for SRs:

- list of remote sensing data transmission rates;
- range.

RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

Comparison of different options for building space remote sensing systems can be made on the basis of criteria related to their probabilistic time characteristics. In this case, both separately functioning objects, such as OC, and the system as a whole, which is a set of its constituent objects, can be analyzed.

In the simplest variant of calculating the efficiency of remote sensing information delivery to consumers, the time interval of spacecraft observation of the object of observation (OO) and the time interval of spacecraft location in the radio visibility zone of the information reception point (IRP), which can also be considered as the IRP line-of-sight zone, are taken into account.

Let us consider the problem of analyzing the frequency of spacecraft observation from a point on the Earth's surface. If we focus only on the potential possibility of direct contact, then the fact of finding a satellite in the line of sight of the OO or IRP will be determined by the phase of the satellite flight and is quite simply determined mathematically. However, the choice of the time of attempting to detect a satellite may be random.

On the other hand, when analyzing the characteristics of a particular orbit or orbital constellation, mathematical models are used for which the initial conditions for calculating the satellite motion are set, relating to a specific but arbitrarily chosen moment of time.

Accordingly, despite the predetermination of the satellite motion and the given location of the IRP point or the grid of OO nodes, the result of the satellite detection attempt is completely determined by the moment of setting the initial conditions and the moment of the detection attempt.

The resulting analysis value of spacecraft (or satellite constellation) observation frequency normalized by 1 can be interpreted as an indicator of spatial accessibility or simply accessibility. If continuous intervals of time of absence of at least one satellite over the subscribers will be investigated, the maximum and average time obtained as a result of the study has a physical meaning of the time of waiting for the readiness of the satellites OC.

If we study the distribution of waiting times for satellites to approach a given location of ground receiving and transmitting points, the obtained characteristic describes the efficiency of information delivery. For the analysis of satellite availability, the choice of time interval during

which mathematical modeling is performed and, accordingly, during which the results are averaged, is of great importance.

Let us consider the example of a low-flying spacecraft with a flight altitude of 1 500 km, inclination of 82.5° and zero eccentricity. We limit the zone of spatial accessibility of the satellite for subscribers to a place angle of 10° . Accordingly, we can allocate several time intervals for mathematical modeling.

Time intervals, not exceeding the time of satellite passage over the OO: being in the range from 1 to 16 minutes. Time interval: 1 period of satellite orbit — approximately 116 minutes. Time intervals: 1 day, which is 1 440 minutes, and a time interval much longer than 1 revolution — for example, 100 revolutions or 11 600 minutes.

The time intervals of 1–16 minutes allow us to investigate issues related to estimating the duration of satellite contact with OOs located at different latitudes. Accordingly, the parameter describing these characteristics is called “operational readiness”.

From a practical point of view, the problem of finding the average time of continuous contact between satellites and satellites is of great interest, since this time determines the average load on the onboard equipment of satellites, and the maximum time naturally does not exceed the time of the satellite overflight over satellites located along the path of the subsatellite point. In the case under consideration, this time is 16 minutes. The minimum time of the subscriber’s contact with the satellite respectively is 1 minute — the order of the main time discretizes of modeling.

By changing the formulation of the event to be investigated as a result of mathematical modeling it is possible to consider events related to continuous time intervals of satellite observation. In this case, in the course of calculations the events related to the formed continuous observation intervals are detected with the subsequent processing allowing to find the frequency of occurrence of the continuous observation time interval not less than a given value and, on this basis, to determine the most frequently recurring situation.

On the other hand, the time intervals of satellite motion modeling from 1 to 16 minutes allow to accumulate satellite observation results for subscribers located in the areas covered by the consecutive position of 1 to 16 visibility zones and, accordingly, cover a small part of the Earth surface.

Therefore, such a sample is not representative for analyzing the entire Earth surface, which forms the event space. By changing the formulation of the event to be investigated by simulation modeling, operational readiness can be investigated. Thus, when considering the problem concerning the case of a single satellite, it is possible to consider events characterizing continuous intervals of satellite observation time.

In this case, in the course of calculations, the events concerning the formed continuous observation intervals are detected with the subsequent accumulation of values of their duration and finding the maximum and average value of the realized interval of continuous visibility of the satellite. Let us consider a time interval equal to 1 period of satellite orbit.

When a single satellite moves along the orbit for a time interval of 1 revolution, some part of the Earth’s surface for the considered case of the satellite orbit, at least once, will be within its visibility. Accordingly, this area will be called the working area of the revolution.

The part of the Earth’s surface, which during 1 revolution will not fall within the visibility of the satellite even once, will be called the blind region of the revolution (Fig. 1). Attempts to detect satellites are made every minute at points on the Earth’s surface located at the nodes of a uniform rectangular grid tied to the Mercator projection. The event associated with successful detection of a satellite is denoted by the number 1, and the event associated with the absence of a satellite is denoted by the number 0. Accumulating by summing the results of attempts to detect a satellite over a subscriber in each node of the grid, and then dividing by the total number of

attempts, it is possible to calculate the frequency of satellite detection over the OO in the working area of the coil. Accordingly, the sample time interval for modeling 1 turn is also not representative, because on the surface of the Earth there are areas with OO, located in which no satellite has ever been observed. This is evidenced by the presence of the blind region of the revolution (Fig. 1).

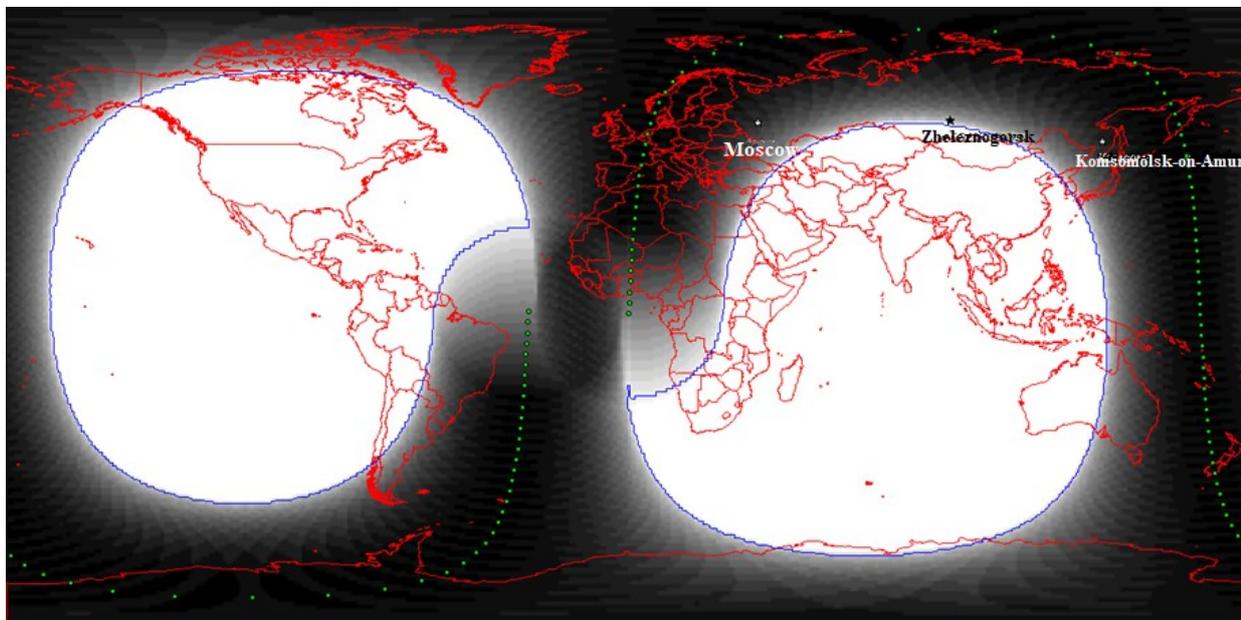


Fig. 1. Blind coil area

Fig. 1 shows that the working region of the turn is formed by successive superposition of the instantaneous visibility zones of satellites, forming the so-called visibility zone track. At the moment of the beginning and end of the turn, the visibility zones overlap each other with an offset equal to the angle of rotation of the Earth for the time t of the satellite rotation period. In the considered case, this angle will be $15^\circ * 116 / 60 = 29^\circ$. The angle of 29° is approximately half of the size of the visibility zone.

In order to correctly analyze the average time of contact between the spacecraft and the satellite, it is necessary to process the accumulation results only in those nodes of the grid where non-zero data accumulation results are registered, namely, only in the working part of the turn.

Otherwise, the contribution to the final processing of the grid nodes not covered by the visibility zones during the duration of 1 revolution may distort the results obtained. In the case of an orbit with a satellite flight altitude of 1 500 km and an inclination of 82.5° , the orbital period is almost exactly equal to 116 minutes.

Then, the time interval of 1 day will be 1 440 minutes and, on this time, interval will fit approximately 12.5 turns. The value of about 100 turns is considered to be quite large and in the case of the orbit under consideration is a time interval of about 8 days. For this time interval, the simulation of the distribution of the frequency of satellite appearance over the OO, expressed as a percentage of the total number of analyzed moments of time is shown in Fig. 2.

The blue lines in Fig. 2 show the distribution isolines. Thus, the isoline value of 14 % limits the region where the detection frequency of a single satellite in the considered orbit is about 14 % or slightly higher. The specified area is located in the circumpolar region. The shape of the isoline is a line lying along the latitude of 80° . The linear shape of the isoline indicates that the calculation time interval is sufficient and the obtained distribution is very close to stationary.

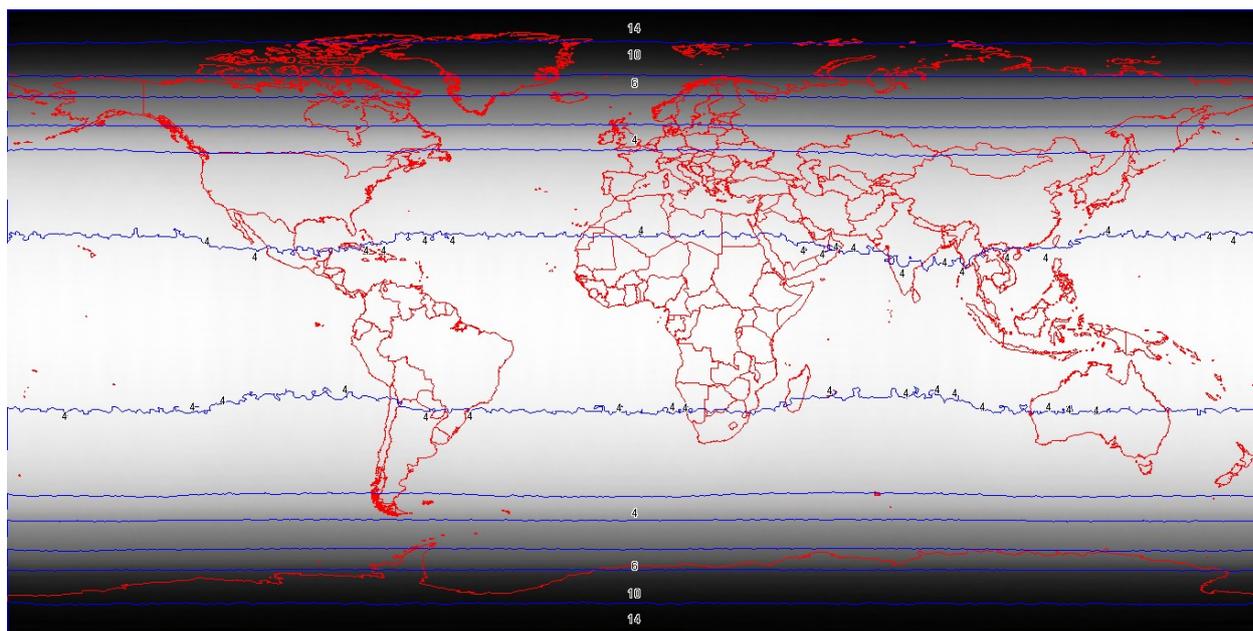


Fig. 2. Two-dimensional distribution of the frequency of occurrence of the satellite over OO, averaged to the total number of analyzed time points

Accordingly, if the accumulation time is sufficiently long, we can characterize the two-dimensional distribution by a one-dimensional distribution obtained by averaging the two-dimensional distribution over all longitude values. This will result in the graph shown in Fig. 3.

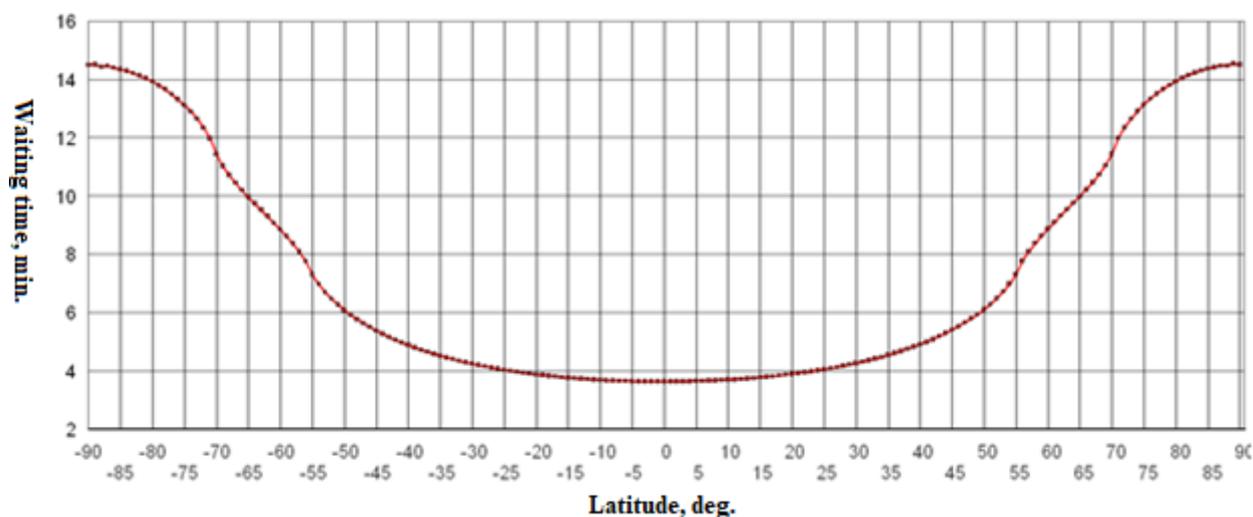


Fig. 3. The dependence of the relative frequency of the presence of satellite over OO located at different latitudes, expressed as a percentage — averaging over all longitude values

Continuous time intervals during which there is no contact between the OO and the satellite are considered below. Fig. 1 shows the working and blind regions of one revolution. Accordingly, the ground points located in the blind region of a revolution will gradually cover the working region as the Earth rotates daily. However, the daily rotation rate of the Earth is 15° per hour, and the size of the blind area of a single revolution of a single satellite is tens of degrees.

In the case under consideration, the maximum longitude size of the blind spot is approximately 160° , and it is this size that will determine the maximum waiting time for the satellite approach by an observer located in the most unfavorable place of the blind spot, which will be about 10.8 hours, or 653 minutes (Fig. 4).

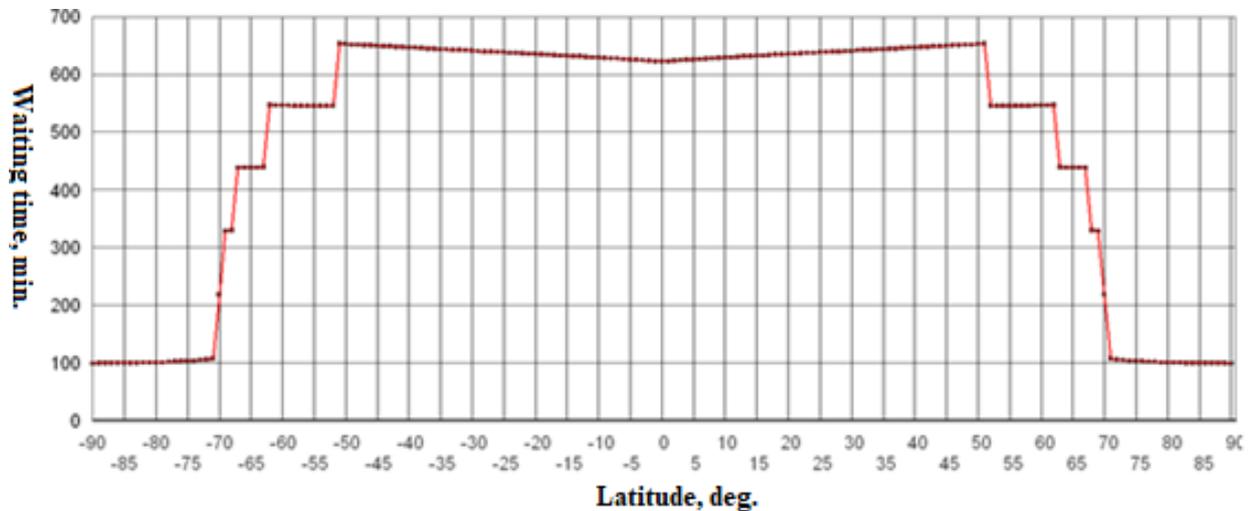


Fig. 4. Maximum realizable waiting time for reentry of a single satellite for different latitudes

It is also possible to consider not the maximum realized waiting time, but the average waiting time. However, due to the fact that the maximum waiting times are quite large, boundary effects in the simulation time interval can be of significant importance in the averaging procedure. In order to avoid them, only those time instants should be averaged that are within the simulation time interval to a sufficient depth determined by the maximum realized waiting time.

CONCLUSIONS

The presented algorithm includes several modeling stages, including various possible parameters, various stages, various types and number of orbits, and many other features that must be taken into account when solving the problem of modeling the formation of an orbital grouping of satellites of various types with specified initial ballistic characteristics. All calculations of the initial conditions are performed in the form of contiguous Keplerian elements in the true equatorial date system.

A model for calculating the operability of remote sensing information delivery to consumers for different variants of building space remote sensing systems can be presented on the basis of criteria related to their probabilistic time characteristics.

In the course of further work, a study was conducted on ways to promptly deliver Earth remote sensing information to consumers in various variants of building a network of repeater satellites, including a comparison of the time of operational delivery of information for an orbital grouping with a different number of Earth remote sensing spacecraft in low Earth orbit.

The presented model also allows us to compare the methods of operational delivery of Earth remote sensing information, including a comparative analysis of the minimum, average and maximum delivery times.

The result of simulation modeling within the framework of the conducted research was the identification of general and particular patterns for a single Earth remote sensing spacecraft in low Earth orbit and an orbital grouping of 36 Earth remote sensing spacecraft also in low Earth orbit

based on graphical diagrams displaying statistics for calculating the efficiency of information delivery in various variants of building a network of repeater satellites.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported by the Russian Federation State Task No. FNNN-2024-0016.

REFERENCES

- Agapov V.* TDRS-H opens up new possibilities for satellite data transmission. *Space News*, 2000. V. 10. No. 8(211). P. 31–34 (in Russian).
- Aleksakhina A. A., Kucherov B. A., Khromenkov A. S.* Use of existing and future information technologies in planning the utilization of spacecraft control facilities. *Space and rocket science*, 2016. No. 6(91). P. 140–148 (in Russian).
- Artyushenko V. M., Kucherov B. A.* Increasing the efficiency of conflict-free control of satellite constellation under resource constraints. *Electrical engineering and information complexes and systems*, 2013. V. 9. No. 3. P. 59–66 (in Russian).
- Barkova M. E., Zhukov A. O.* Analysis of existing and prospective concepts of inter-satellite laser communication. *Technologies of obtaining and processing information about dynamic objects and systems. II All-Russian Scientific and Practical Conference*, 2021. P. 25–33 (in Russian).
- Chymyrov A., Bekturov A.* Evaluation of the modern Earth Gravitational Models over territory of the Kyrgyz Republic. *International Journal of Geoinformatics*, 2019. V. 15. No. 4. P. 77–83.
- Congalton R. G., Green K.* Assessing the accuracy of remotely sensed data Principles and practices, 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009. 183 p.
- Erunova M., Yakubailik O.* GIS technologies for agricultural monitoring in the regional agriculture system of the Krasnoyarsk territory. *Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, Ed. 2.2. Sofia, 2019. V. 19. P. 863–870. DOI: 10.5593/sgem2019/2.2/S11.106.
- Erunova M., Yakubailik O.* Monitoring of agricultural vegetation development based on time series analysis of satellite data. *Proc. SPIE 11560, 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics*, 1156054 (12 November 2020). DOI: 10.1117/12.2575663.
- Ivanova Y. N., Ivanov K. S., Bondareva M. K., Ermolaev V. A., Zhukov A. O.* Experience and possibilities of application of space remote sensing systems for forecasting gold mineralization in hard-to-reach areas on the example of the Polar Urals. *Bulletin of Peoples. Friendship University of Russia. Series: Engineering Research*, 2019. V. 20. No. 2. P. 123–133 (in Russian). DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-2-123-133.
- Jain A. O., Thaker T., Chaurasia A., Patel P., Singh A. K.* Vertical accuracy evaluation of SRTM-GL1, GDEM-V2, AW3D30 and CartoDEM-V3.1 of 30-m resolution with dual frequency GNSS for lower Tapi Basin India. *Geocarto International*, 2018. V. 33. Iss. 11. P. 1237–1256. DOI: 10.1080/10106049.2017.1343392.
- Kartsan I. N., Efremova S. V., Khrapunova V. V., Tolstopiatov M. I.* Choice of optimal multiversion software for a small satellite ground-based control and command complex. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018. V. 450. Iss. 2. 022015. DOI: 10.1088/1757-899X/450/2/022015.
- Kartsan I. N., Goncharov A. E., Zelenkov P. V., Kovalev I. V., Fateev Y. L., Tyapkin V. N., Dmitriev D. D.* Applying filtering for determining the angular orientation of spinning objects during interference. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/155/1/012020.

- Kobets D. A., Matveev A. M., Mazurov A. A., Proshin A. A.* Organization of automated multithreaded processing of satellite information in remote monitoring systems. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2015. V. 12. No. 1. P. 145–155 (in Russian).
- Kolecka N., Kozak J.* Assessment of the accuracy of SRTM C- and X-Band high mountain elevation data: A case study of the Polish Tatra Mountains. *Pure and Applied Geophysics*, 2014. No. 171(6). P. 897–912. DOI: 10.1007/s00024-013-0695-5.
- Kucherov B. A.* Problem statement for optimization of spacecraft control distribution under resource constraints. *Information Technology Bulletin*, 2018. No. 4(18). P. 32–43 (in Russian).
- Loupian E. A., Proshin A. A., Bourtsev M. A., Kashnitskiy A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A.* Operational experience and development of a Center for Collective Use of systems for archiving, processing and analysis of satellite data (“IKI Monitoring” Center for Collective Use). *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2019. V. 16. No. 3. P. 151–170 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- Mukhamedjanov I. D., Konstantinova A. M., Loupian E. A., Gafurov A. A.* Approaches to the construction of the satellite service system for Amu Darya river and its tributaries. *Proceedings of the XVII All-Russian Open Conference “Actual Problems of Remote Sensing of the Earth from Space”*, 11–15 November 2019. Moscow: Space Research Institute of RAS, 2019. P. 111 (in Russian). DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a.
- Ozdogan M.* The spatial distribution of crop types from MODIS data: Temporal unmixing using Independent Component Analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2010. No. 114(6). P. 1190–1204. DOI: 10.1016/j.rse.2010.01.006.
- Patel A., Katiyar K. S., Prasad V.* Performances evaluation of different open source DEM using differential global positioning system (DGPS). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2016. No. 19(1). P. 7–16.
- Proshin A. A., Loupian E. A., Kashnitskiy A. V., Balashov I. V., Bourtsev M. A.* Current Capabilities of the “IKI-Monitoring” Center for Collective Use. *Aachen: CEUR Workshop Proceedings*, 2019. V. 2534. P. 39–44.
- Redowan M., Akter S., Islam N.* Analysis of forest cover change at Khadimnagar National Park, Sylhet, Bangladesh, using Landsat TM and GIS data. *Journal of Forestry Research*, 2014. No. 25(2). P. 393–400. DOI: 10.1007/s11676-014-0467-9.
- Sankey T. T., McVay J., Swetnam T. L., McClaran M. P., Heilman P., Nichols M.* UAV hyperspectral and lidar data and their fusion for arid and semi-arid land vegetation monitoring. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2018. V. 4. No. 1. P. 20–33. DOI: 10.1002/rse2.44.
- Tyapkin V. N., Kartsan I. N., Dmitriev D. D., Efremova S. V.* Algorithms for adaptive processing of signals in a flat phased antenna array. *Proceedings of International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2017. 7998452. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998452.
- Vermeulen L. M., Munch Z., Palmer A.* Fractional vegetation cover estimation in southern African rangelands using spectral mixture analysis and Google Earth Engine. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021. V. 182. 105980. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105980.
- Wang B., Jia K., Liang S., Xie X., Wei X., Zhao X., Yao Y., Zhang X.* Assessment of Sentinel-2 MSI spectral band reflectances for estimating fractional vegetation cover. *Remote Sensing*, 2018. V. 10. No. 12. P. 1927. DOI: 10.3390/rs10121927.

О. А. Петрова¹, Г. К. Даумова², Н. Ф. Денисова³, Г. М. Искалиева⁴, А. В. Елисеева⁵

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СНЕЖНЫХ ЛАВИН В ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается использование ГИС-технологий при исследовании лавинной активности в Восточно-Казахстанской области. Представленные в статье результаты исследования получены на первом этапе обследования территории области по различным факторам, которые могут иметь значение для уровня лавинной опасности в регионе. Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) необходимы для разработки мониторинговых систем лавинной опасности и научного обоснования размещения датчиков системы на лавиноопасных склонах. Первым шагом в проведенном исследовании является построение цифровой модели рельефа (ЦМР) с использованием данных SRTM. Далее в работе приведен обзор использованных в исследовании методов идентификации атмосферных осадков. В основе этих методов лежит использование данных оптического дистанционного зондирования, что включает в себя оценку специальных показателей и индексов. Были рассмотрены такие показатели, как индекс NDSI для оценки покрытия поверхности Земли снегом или ледниками; набор данных CHIRPS и GSMaP для оценки климатических опасностей, связанных с осадками; данные реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ECMWF для оценки климата и погоды за последние несколько десятилетий в Восточно-Казахстанской области. Кроме этого, для понимания характеристик подстилающей поверхности, влияющей на самопроизвольный сход лавин в частности, был использован индекс NDWI для оценки увлажненности исследуемой территории. По результатам исторических спутниковых данных снимков Sentinel-2 для Восточно-Казахстанской области были построены разные цифровые модели на основе вышеназванных показателей. Получившиеся модели были использованы на первом этапе оценки территории области по климатическим характеристикам для дальнейшего создания цифровых моделей более высокого разрешения по самым проблемным лавиноопасным участкам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГИС, лавины, мониторинг, климатические данные, цифровая модель рельефа

¹ Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, ул. Серикбаева, д. 19, Усть-Каменогорск, Казахстан, 070004, *e-mail*: OPetrova@edu.ektu.kz

² Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, ул. Серикбаева, д. 19, Усть-Каменогорск, Казахстан, 070004, *e-mail*: gulzhan.daumova@mail.ru

³ Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, ул. Серикбаева, д. 19, Усть-Каменогорск, Казахстан, 070004, *e-mail*: NDenisova@edu.ektu.kz

⁴ Институт ионосферы, садоводческое товарищество «Ионосфера», Каменское плато, д. 117, Алматы, Казахстан, 050020, *e-mail*: igm.ionos@gmail.com

⁵ Институт ионосферы, садоводческое товарищество «Ионосфера», Каменское плато, д. 117, Алматы, Казахстан, 050020, *e-mail*: yelisseyevaa@gmail.com

**Olga A. Petrova¹, Gulzhan K. Daumova², Natalya F. Denisova³, Gulnara M. Iskaliyeva⁴,
Alena V. Yelisseyeva⁵**

GEOINFORMATION RESEARCH FOR MONITORING SNOW AVALANCHES IN THE EAST KAZAKHSTAN REGION OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ABSTRACT

The article discusses the use of GIS technologies in the study of avalanche activity in the East Kazakhstan Region. The research results presented in the article were obtained at the first stage of the survey of the territory of the region according to various factors and criteria that may be important for the level of avalanche activity in the region. Earth remote sensing (ERS) data is necessary for the development of avalanche hazard monitoring systems and scientific substantiation of the placement of sensors of the system on avalanche-prone slopes. The first step in this research is to build a digital elevation model (DEM) using SRTM data. The paper then provides an overview of the atmospheric precipitation identification methods used in the research. These methods are based on the use of optical remote sensing data, which includes the assessment of special indicators and indices. The following indicators were considered: the NDSI index for assessing the coverage of the Earth's surface with snow or glaciers; the CHIRPS and GSMaP dataset for assessing climatic hazards associated with precipitation; data from the ERA5 reanalysis of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts ECMWF to assess the climate and weather over the past few decades in the East Kazakhstan Region. In addition, to understand the characteristics of the underlying surface affecting spontaneous avalanches in particular, the NDWI index to assess the moisture content of the studied area. Based on the results of historical satellite data from Sentinel-2 images, various digital models were built for the East Kazakhstan Region based on the above-mentioned indicators. These models were used at the first stage of assessing the territory of the region by climatic characteristics to further create higher-resolution digital models for the most problematic avalanche-prone areas.

KEYWORDS: GIS, avalanches, monitoring, climate data, digital elevation model

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день большое значение имеют вопросы изменения климата и последствия этого процесса не только на глобальном, но и на региональном уровне. К ним относятся различные катаклизмы природного характера: сильные засухи и природные пожары. Противоположная ситуация — обильные осадки и наводнения, а также возрастающая с каждым годом лавинная активность. Самопроизвольный сход лавин все чаще провоцируется экстремальными погодными условиями: обильными осадками, резкими потеплениями в зимний период, сильными ветрами. Эта ситуация становится характерной для Восточно-Казахстанской области.

¹ D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 19, Serikbayeva str., Ust-Kamenogorsk, 070004, Kazakhstan, *e-mail:* **OPetrova@edu.ektu.kz**

² D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 19, Serikbayeva str., Ust-Kamenogorsk, 070004, Kazakhstan, *e-mail:* **gulzhan.daumova@mail.ru**

³ D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 19, Serikbayeva str., Ust-Kamenogorsk, 070004, Kazakhstan, *e-mail:* **NDenisova@edu.ektu.kz**

⁴ Ionosphere Institute, Horticultural Association “Ionosphere”, 117, Kamenskoe plat., Almaty, 050020, Kazakhstan, *e-mail:* **igm.ionos@gmail.com**

⁵ Ionosphere Institute, Horticultural Association “Ionosphere”, 117, Kamenskoe plat., Almaty, 050020, Kazakhstan, *e-mail:* **yelisseyevaa@gmail.com**

Климат Восточно-Казахстанского региона отличается разнообразием между степями, полупустынями и горными районами. В целом, резко континентальный климат области обусловлен ее расположением в центральной части Евразии. Он характеризуется значительными колебаниями температур (как сезонными, так и суточными), холодной и снежной зимой, жарким и сухим летом. Климатические особенности восточной части этой территории сформированы горными хребтами Саур-Тарбагатайским, Калбинским и Алтайскими гор с вечными ледниками на горных массивах. Зимы в области холодные и продолжительные, минимумы температур достигают $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$. Распределение годового количества атмосферных осадков по области очень неравномерно; наибольшее количество выпадает в горных и предгорных районах.

Площадь Восточно-Казахстанской области после отделения области Абай в 2022 г. составляет $97\,800\text{ км}^2$. В горных районах Восточного Казахстана живет и работает большое количество людей, имеется туристическая инфраструктура, разветвленная сеть автодорог. Все это находится в зонах влияния лавиноопасных участков. В связи с этим важным шагом для области является разработка мониторинговой системы лавинной опасности. Такая система будет представлять собой программно-аппаратный комплекс для анализа лавинной обстановки и передачи соответствующих оповещений, в первую очередь службам Департамента по чрезвычайным ситуациям, которые обеспечивают профилактические мероприятия по лавинной безопасности. Стратегия создания этой системы включает сбор различных исторических, архивных и текущих данных о метеорологических параметрах, состоянии и морфологии склонов, включая данные ДЗЗ и создание цифровых двойников, данные о самопроизвольных сходах лавин и обработку их методами прямого и обратного моделирования и машинного обучения.

Первичное исследование территории может проводиться с использованием методов ДЗЗ. В первую очередь необходимо построение цифровых моделей рельефа изучаемой местности. На первом этапе разработки системы мониторинга были проанализированы данные ДЗЗ по различным показателям за последние 4 года и созданы цифровые модели рельефа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методология проведения работы основывается на подходах геоинформационного картографирования с учетом современных тенденций использования аэрокосмической информации.

В мониторинге лавин и лавиноопасных участков цифровые модели рельефа необходимы для сбора информации о рельефе, топографии и других факторах, которые помогают в предотвращении лавин и управлении лавинными рисками. Для этого использовались два варианта цифровых моделей.

DEM — широко используется в мониторинге лавин и лавиноопасных участков благодаря своей способности предоставлять детальную информацию о рельефе и топографии района [Polidori, ElHage, 2020; Baghsorkhi, 2022].

Способы использования DEM в мониторинге лавин нацелены на определение нескольких значимых для возникновения лавиноопасной обстановки показателей:

- определение уклона: вычислить уклон поверхности; это позволяет идентифицировать крутые склоны, которые могут быть подвержены образованию и спуску лавин;
- определение высоты снежного покрова: оценка толщины снежного покрова, что является важным фактором для определения потенциальной лавиноопасности;
- идентификация зон транзита лавин: идентифицирование типичных путей лавин и определение точки потенциальной их инициации;

- моделирование лавин: создание моделей схода лавин, что позволяет оценить потенциальные масштабы и последствия лавинных событий;
- планирование мер безопасности: выявление критических участков и разработка мер безопасности, таких как установка заграждений или датчиков.

Для эффективной работы с цифровыми моделями рельефа в исследовании также была использована SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission). Данная миссия была проведена в феврале 2000 г. с использованием радарной интерферометрической камеры и радиолокационных сенсоров SIR-C и X-SAR, установленных на борту космического корабля многократного использования Shuttle [Caiserman, 2022]. В 2014 г. цифровая модель рельефа SRTM была улучшена. Основная цель улучшений заключалась в заполнении пробелов в данных, характерных для территорий со сложным рельефом, водных объектов и других местностей, что плохо поддаются радарной съемке, в т. ч. снежный покров и ледники.

Надежное и точное измерение количества осадков имеет решающее значение для метеорологов и сотрудников служб Департамента по чрезвычайным ситуациям при мониторинге лавиноопасных ситуаций. Такая оценка может осуществляться при помощи методов анализа снежного покрова территории с использованием данных оптического дистанционного зондирования. Метод включает использование специальных индексов, пороговую сегментацию каналов и классификацию изображений. Одним из таких индексов является индекс NDSI.

NDSI (Normalized Difference Snow Index) — это индекс, используемый для оценки покрытия снегом или ледниками какой-либо территории. Он определяет разницу между инфракрасным и видимым каналами, что помогает выявлять наличие снега на земной поверхности [Mityok, 2018; Tong, 2020].

NDSI позволяет распознать снежный покров на основе его отражательных свойств. Группа ученых исследовала чувствительность порогов NDSI при картировании снежного покрова и продемонстрировала его высокую точность при анализе снежного покрова территории [Tong, 2020].

В исследовании по мониторингу лавин индекс NDSI может быть использован для оценки вероятности возникновения лавиноопасных ситуаций. Анализ изменения значения NDSI с течением времени поможет в идентификации снежного покрова в различных районах. Это важная информация для предсказания потенциальных лавиноопасных зон и определения их степени лавинной опасности. Таким образом, использование NDSI в мониторинге лавин позволяет значительно улучшить контроль и прогнозирование лавинной активности.

Данные CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station) и GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation) — это набор инфракрасных данных климатических опасностей, связанных с осадками. Они представляют собой набор данных об осадках, основанный на данных радара с синтезированной апертурой и данных измерений наземных станций.

Набор данных CHIRPS основан на подходах к «умным» методам интерполяции и оценкам рекордных осадков с высоким разрешением и длительным периодом на основе инфракрасных наблюдений [Funk, 2015]. В CHIRPS доступны ежемесячные данные станций объединяются с ежемесячными оценками количества осадков на основе ДЗЗ, обеспечивают высокое пространственное и временное разрешение. Объединяются данные за последние три десятилетия, что дает беспрецедентную возможность исследовать долгосрочные модели осадков для маломасштабных исследований [Liu, 2019].

Оценки осадков с помощью реанализа широко используются в областях метеорологии, поскольку они могут обеспечить физические, пространственные и временные последовательные длинные временные ряды в глобальном масштабе. Европейским центром

среднесрочного прогноза погоды (ECMWF) выпущено несколько продуктов реанализа [Vernay, 2022], за которыми последовало пятое поколение — ERA5 [Hersbachetal, 2020]. Прогноз осадков в ERA5 основан на сборе данных по осадкам за последние 10–15 лет из открытых источников: Температура: ERA5 / Модель ветра: ERA5.

Индекс NDWI (Normalized Difference Water Index) — это нормализованный разностный водный индекс, который используется для выявления водных объектов на спутниковых или аэрокосмических изображениях. Получение значений индекса основано на разнице в поглощении света в ближнем инфракрасном и видимом зеленом спектрах. Индекс используется для определения наличия орошаемых пахотных земель, наводнений или постоянных поверхностных вод [Korzeniowska, 2017]. В мониторинге лавин он может быть определяющим при характеристике подстилающей поверхности и ее водонасыщения.

Таким образом, в настоящей работе использованы современные модели картографирования для количественной и качественной оценки метеорологических параметров, значимых для исследования лавинной активности в Восточно-Казахстанской области.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение спутниковых данных для Восточно-Казахстанской области было нацелено на анализ условий, в которых формируется лавинная активность в регионе. Для характеристики территории области была создана цифровая модель рельефа (рис. 1). Для дальнейшего мониторинга лавиноопасных зон исследуемой территории, был подготовлен слой цифровой модели рельефа по данным снимков Sentinel-2 (рис. 2).

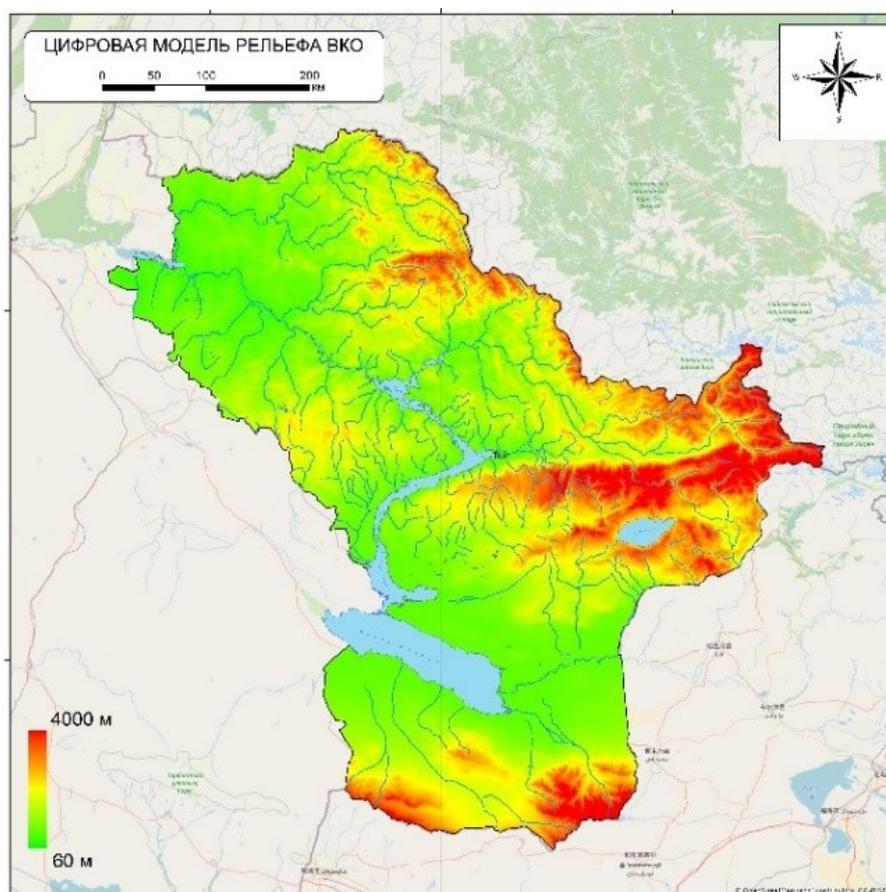


Рис. 1. Цифровая модель рельефа исследуемой территории
Fig. 1. Digital elevation model of the study area

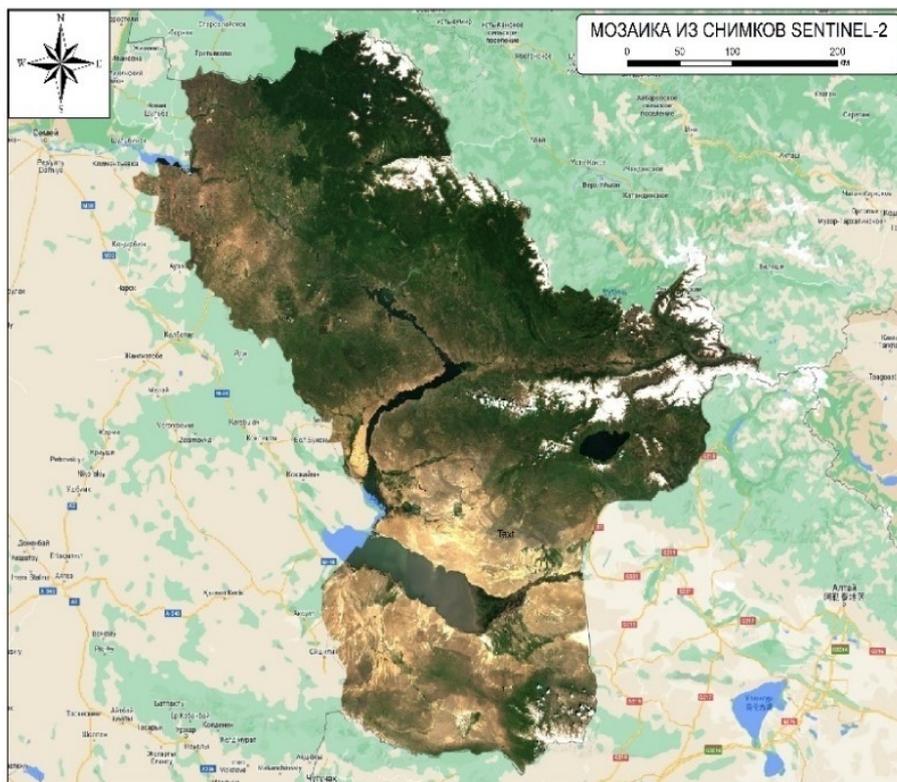


Рис. 2. Цифровая модель рельефа по данным снимков Sentinel-2
Fig. 2. Digital elevation model based on Sentinel-2 images

На рис. 3 представлен индекс снежного покрова NDSI на исследуемую территорию. Из представленного материала легко определяются области в горных районах с наибольшим количеством осадков. Дополняется эта информация сведениями об осадках по данным *Precipitation GSMaP* (рис. 4). Эти данные дают оценку количества осадков в регионе, при недостатке наземных станций, предоставляют более полную картину с более высокой точностью.

На рис. 4 оценивается количество осадков в регионе в мм/час. Такое распределение осадков характерно для диапазона степного или полупустынного климата. Северо-восточные территории в горной местности, как видно на рис. 4, получают больше осадков, чем центральные и северо-западные районы, что будет характеризовать их как более лавиноопасные районы.

Идентификация и установка причин, отражающих наличие влияния ветра на риски возникновения ЧС на территории области, оценивалась с помощью ветровой модели ERA5. Ветровая модель ERA5 показывает участок в области на стыке переменных ветровых условий, от умеренных до сильных ветров (рис. 5).

Индекс NDWI (рис. 6) указывает на участки, выделенные зеленым цветом, как на наиболее увлажненные территории области. В данной местности имеются условия с отсутствием поверхностных участков естественного дренажа. Эти районы имеют, с одной стороны, более плотную растительность, которая является снегоудерживающим фактором на склонах. С другой — они более насыщены влагой, что дополнительно определяет неустойчивость подстилающей поверхности на данных участках. Данные получены путем обработки цветных каналов снимков ближнего инфракрасного диапазона и последующих инфракрасных диапазонов волн примерно 1,24 мкм. Значение индекса варьируется от $-1,0$ до $1,0$, он получен из композитов поверхностного отражения MODIS/006/MYD09GA.

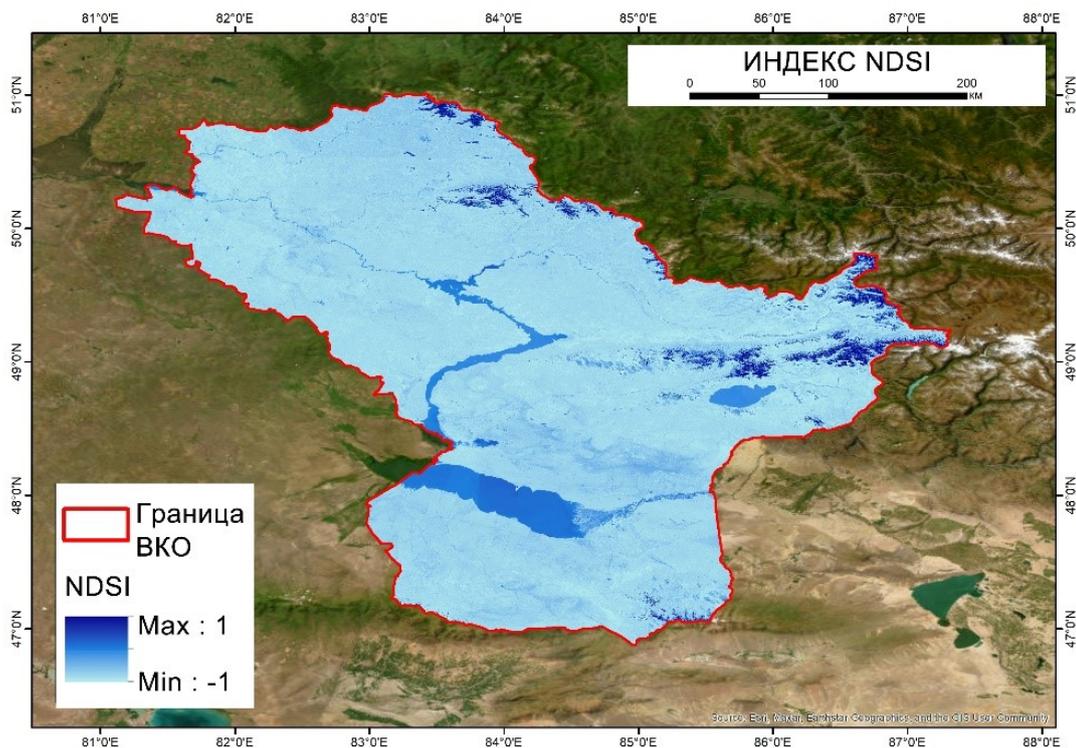


Рис. 3. Индекс NDSI, рассчитанный по мозаике из снимков Sentinel-2
Fig. 3. NDSI index, calculated from a mosaic of Sentinel-2 images

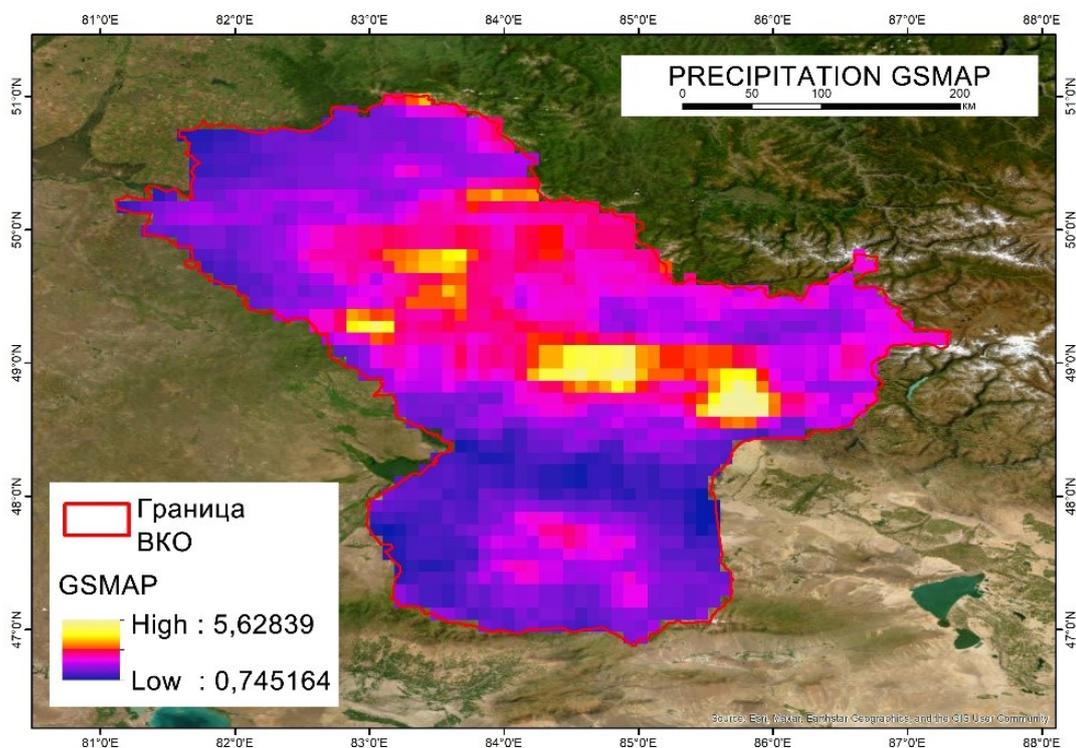


Рис. 4. Данные об осадках GSMaP по Восточно-Казахстанской области
Fig. 4. GSMaP precipitation data for the East Kazakhstan Region

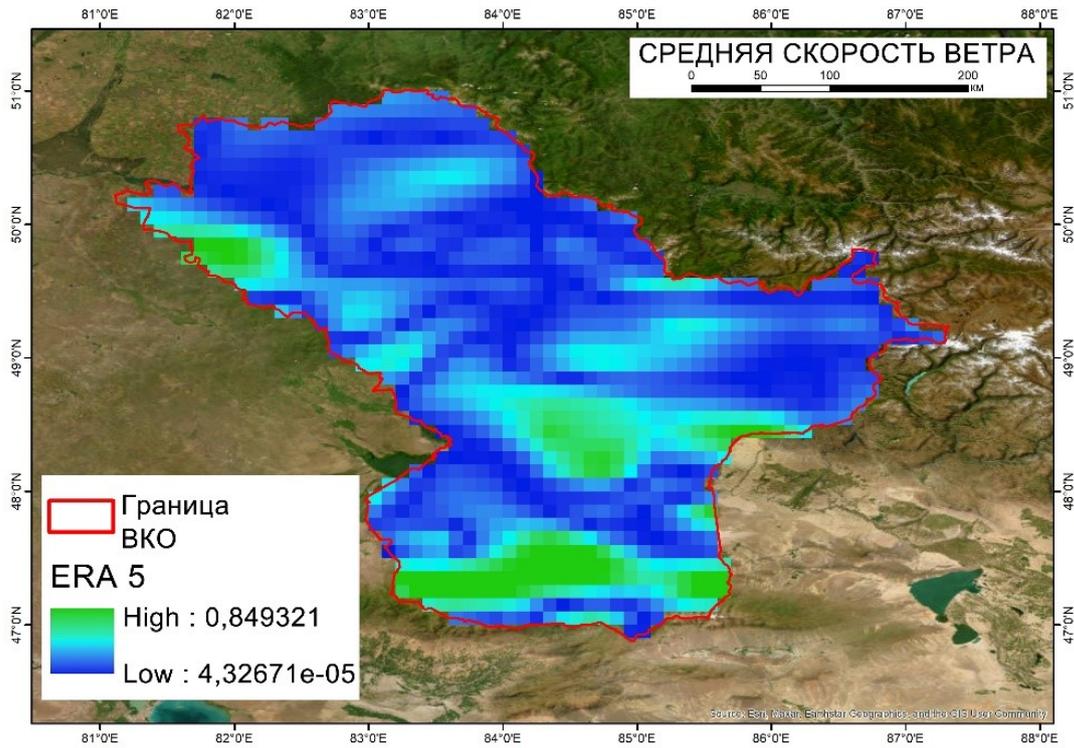


Рис. 5. Визуализация модели ERA5 по скорости ветра
Fig. 5. Visualization of the ERA 5 wind speed model

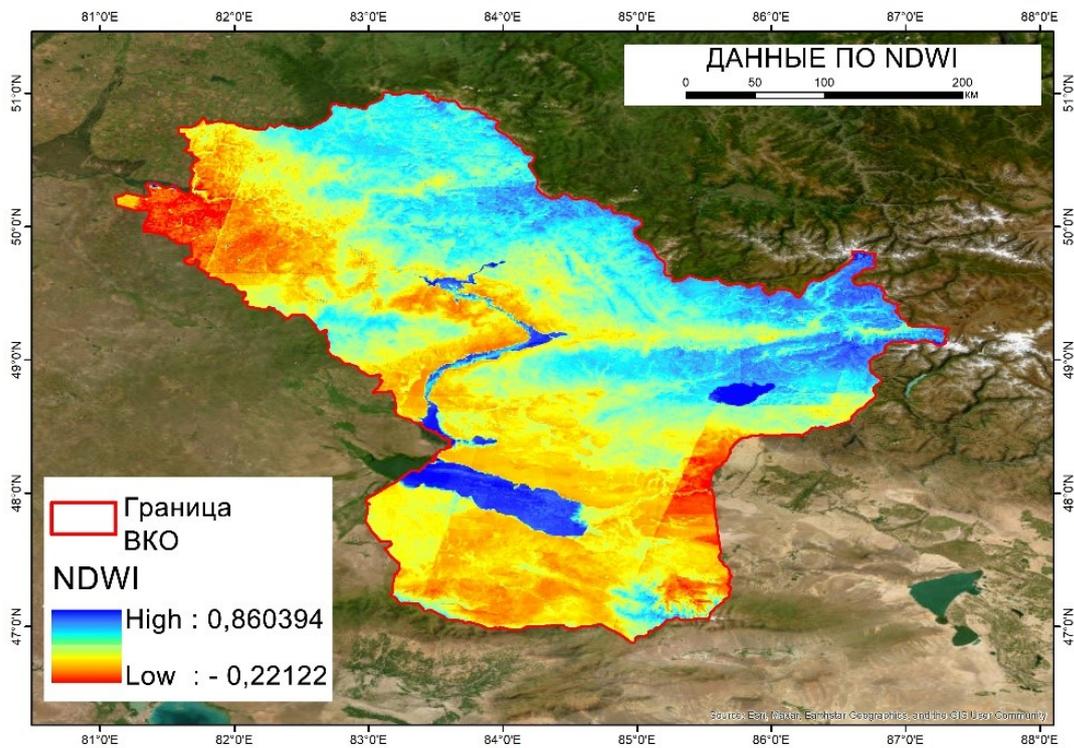


Рис. 6. Данные по NDWI для Восточно-Казахстанской области
Fig. 6. NDWI data for the East Kazakhstan Region

В ходе первичного исследования области рассматривались и другие статистические данные. По сведениям Казгидромета, средняя годовая температура воздуха по области за последние 40 лет увеличилась в среднем на 1,03 °С, при этом средние годовые значения для 2020 г. являются самыми высокими за всю историю наблюдений, а колебания могут достигать 4 °С в течение 3–4 лет. Те же тенденции отмечаются и по количеству осадков: за последние годы количество осадков на востоке Казахстана выше среднегодовой нормы в 1,3–1,8 раза. Среднегодовая скорость ветра немного уменьшается со временем. За последние 40 лет средняя скорость ветра снизилась с 10 м/с до 8,75 м/с. Экстремумы скорости ветра также уменьшаются по степени выраженности. Но ветровой фактор также остается важным для дальнейших изысканий, т. к. ветровые наносы на склонах являются одним из факторов, провоцирующих сход лавин. Сопоставление статистических данных с данными ДЗЗ дает лучшее понимание природно-климатических условий области для планирования дальнейших исследований.

ВЫВОДЫ

Построение цифровых моделей на первом этапе исследования лавинной активности Восточно-Казахстанской области помогло сформировать представление (обобщенное данными о подстилающей поверхности и, вдобавок, метеорологическими) о рельефе местности, как о земной поверхности, рассматриваемой с точки зрения ее взаимодействия со снежным покровом, а также характера растительности и увлажненности почв, характеризующих устойчивость склонов. Выявленные по статистическим данным температурные тенденции, наряду с характеристикой количества осадков и ветровым режимом в горных районах, являются одним из основных климатических факторов, влияющих на лавинную активность в горных районах области. Полученные данные помогли выполнить анализ условий, в которых формируется лавинная активность в регионе. Представленные результаты будут использованы на следующем этапе исследований для создания цифровых моделей рельефа более высокого разрешения, а также для выбора мест сбора данных наземными станциями.

БЛАГОДАРНОСТИ

В материалах статьи представлены результаты научных исследований, полученные в ходе реализации научно-технической программы BR21882022 на тему: «Исследование лавинной активности в Восточно-Казахстанской области для разработки систем мониторинга и научного обоснования их размещения» в рамках программно-целевого финансирования.

ACKNOWLEDGEMENTS

The article presents the results of scientific research obtained during the implementation of a scientific and technical program BR21882022 on the topic: “Research of avalanche activity in the East Kazakhstan Region for development of monitoring systems and scientific substantiation of their placement” within the framework of program-targeted financing.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Baghsorkhi A. R., Motamedvaziri B., Samani A. N., Ahmadi H., Moeini A. Snow avalanche risk management in Shemshak region: A modelling, mapping and evaluation of factors affecting the occurrence of snow avalanches. *Current Science*, 2022. V. 122. No. 6. P. 717–734. DOI: 10.18520/cs/v122/i6/717-734.

Caiserman A., Sidle R. C., Gurung D. R. Snow Avalanche Frequency Estimation: 32 years of remote hazard 2 monitoring in Afghanistan. *The Cryosphere*, 2022. V. 16. P. 3295–3312. DOI: 10.5194/tc-16-3295-2022.

Funk C., Peterson P., Landsfeld M. The climate hazards infrared precipitation with stations — a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2015. V. 2. 150066. DOI: 10.1038/sdata.2015.66.

Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R. J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J. N. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020. V. 146. No. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

Korzeniowska K., Bühler Y., Marty M., Korup O. Regional snow-avalanche detection using object-based image analysis of near-infrared aerial imagery. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2017. V. 17. P. 1823–1836. DOI: 10.5194/nhess-17-1823-2017.

Liu J., Shangguan D., Liu S., Ding Y., Wang S., Wang X. Evaluation and comparison of CHIRPS and MSWEP daily-precipitation products in the Qinghai-Tibet Plateau during the period of 1981–2015. *Atmospheric Research*, 2019. V. 230. 104634. DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.104634.

Mityok Z. K., Bolton D. K., Coops N. C., Berman E. E., Senger S. Snow cover mapped daily at 30 m resolution using a fusion of multi-temporal MODIS NDSI data and Landsat surface reflectance. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2018. V. 44. No. 5. P. 413–434. DOI: 10.1080/07038992.2018.1538775.

Polidori L., El Hage M. Digital Elevation Model Quality Assessment Methods: A Critical Review. *Remote Sensing*, 2020. V. 12. No. 21. 3522. DOI: 10.3390/rs12213522.

Tong R., Parajka J., Komma J., Blöschl G. Mapping snow cover from daily Collection 6 MODIS products over Austria. *Journal of Hydrology*, 2020. V. 590. 125548. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125548.

Vernay M., Lafaysse M., Monteiro D., Hagenmuller P., Nheili R., Samacoïts R., Verfaillie D., Morin S. The S2M meteorological and snow cover reanalysis over the French mountainous areas: description and evaluation (1958–2021). *Earth System Science Data Discussions*, 2022. V. 14. P. 1707–1733. DOI: 10.5194/essd-14-1707-2022.

REFERENCES

Baghsorkhi A. R., Motamedvaziri B., Samani A. N., Ahmadi H., Moeini A. Snow avalanche risk management in Shemshak region: a modelling, mapping and evaluation of factors affecting the occurrence of snow avalanches. *Current Science*, 2022. V. 122. No. 6. P. 717–734. DOI:10.18520/cs/v122/i6/717-734.

Caiserman A., Sidle R. C., Gurung D. R. Snow Avalanche Frequency Estimation: 32 years of remote hazard 2 monitoring in Afghanistan. *The Cryosphere*, 2022. V. 16. P. 3295–3312. DOI: 10.5194/tc-16-3295-2022.

Funk C., Peterson P., Landsfeld M. The climate hazards infrared precipitation with stations — a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2015. V. 2. 150066. DOI: 10.1038/sdata.2015.66.

- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R. J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J. N.* The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020. V. 146. No. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
- Korzeniowska K., Bühler Y., Marty M., Korup O.* Regional snow-avalanche detection using object-based image analysis of near-infrared aerial imagery. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2017. V. 17. P. 1823–1836. DOI: 10.5194/nhess-17-1823-2017.
- Liu J., Shangguan D., Liu S., Ding Y., Wang S., Wang X.* Evaluation and comparison of CHIRPS and MSWEP daily-precipitation products in the Qinghai-Tibet Plateau during the period of 1981–2015. *Atmospheric Research*, 2019. V. 230. 104634. DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.104634.
- Mityok Z. K., Bolton D. K., Coops N. C., Berman E. E., Senger S.* Snow cover mapped daily at 30 m resolution using a fusion of multi-temporal MODIS NDSI data and Landsat surface reflectance. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2018. V. 44. No. 5. P. 413–434. DOI: 10.1080/07038992.2018.1538775.
- Polidori L., El Hage M.* Digital Elevation Model Quality Assessment Methods: A Critical Review. *Remote Sensing*, 2020. V. 12. No. 21. 3522. DOI: 10.3390/rs12213522.
- Tong R., Parajka J., Komma J., Blöschl G.* Mapping snow cover from daily Collection 6 MODIS products over Austria. *Journal of Hydrology*, 2020. V. 590. 125548. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125548.
- Vernay M., Lafaysse M., Monteiro D., Hagenmuller P., Nheili R., Samacoïts R., Verfaillie D., Morin S.* The S2M meteorological and snow cover reanalysis over the French mountainous areas: description and evaluation (1958–2021). *Earth System Science Data Discussions*, 2022. V. 14. P. 1707–1733. DOI: 10.5194/essd-14-1707-2022.
-

Т. Н. Скрыпицына¹, А. Г. Воротилов², Д. А. Кочнева³, Ф. Д. Гаврилюк⁴,
Е. А. Смирнов⁵

ОСОБЕННОСТИ СЪЕМКИ И МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЧАСТИЧНО РАЗРУШЕННЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

АННОТАЦИЯ

Современные технологии дистанционного зондирования предлагают целый ряд решений, позволяющих создавать разного вида обмерные модели объектов архитектурного наследия. Алгоритмы обработки изображений позволяют не только воссоздавать в цифре существующие на данный момент времени строения, но и производить виртуальную реконструкцию частично разрушенных памятников архитектуры. Фотограмметрия является сравнительно недорогим и практически универсальным методом для моделирования архитектурных объектов и создания их обмерных чертежей. Появление в арсенале фотограмметристов беспилотных летательных аппаратов с цифровыми камерами на борту значительно облегчило процесс фотосъемки труднодоступных (и тем более ценных) архитектурных сооружений. Тем не менее, чтобы получить искомый результат, для каждого объекта необходимо подбирать индивидуальные методики как для съемки, так и для цифровой реконструкции. В исследовании представлены результаты работы на двух частично разрушенных памятниках архитектуры. Для цифровой реконструкции утраченных элементов и с целью создания обмерных моделей была выполнена комплексная съемка интерьера и экстерьера. Первый архитектурный объект — руины замка Аду-Сурхо XVII в., находится на территории Чеченской Республики. Его моделирование происходило по снимкам, полученным только с БВС, а реконструкция утраченных частей — по аналогии с существующими образцами исторических построек. Второй объект — Строгановский амбар XVIII в., что является самым старым каменным строением г. Тутаева (Романовская сторона). Модель современного состояния строилась по результатам наземной и аэрофотосъемки, а реконструкция утраченных элементов — по набору разновременных снимков и чертежам XVIII в. Результаты цифровой реконструкции послужат созданию проектов реставрации для восстановления первоначального вида сооружений и увеличения значимости этих объектов в культурной и туристической деятельности регионов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фотограмметрия, моделирование архитектурных объектов, съемка с беспилотных воздушных судов, БВС, реконструкция

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), кафедра фотограмметрии, Гороховский пер., д. 4, Москва, Россия, 105064,

e-mail: tatyana.skrypitsyna@yandex.ru

² Группа компаний Геоскан, Колпачный пер., д. 6 с. 3, Москва, Россия, 101000,

e-mail: alesha.vorotilov@ya.ru

³ Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), НИЧ, Гороховский пер., д. 4, Москва, Россия, 105064, *e-mail:* kochneva.d.a@yandex.ru

⁴ Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Гороховский пер., д. 4, Москва, Россия, 105064, *e-mail:* 79011834240@yandex.ru

⁵ Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), кафедра фотограмметрии, Гороховский пер., д. 4, Москва, Россия, 105064, *e-mail:* smirnov.e.a@list.ru

Tatyana N. Skrypitsyna¹, Alexey G. Vorotilov², Daria A. Kochneva³, Faina D. Gavriluk⁴,
Eugeniy A. Smirnov⁵

FEATURES OF THE SURVEY AND METHODS OF MODELLING PARTIALLY DESTROYED ARCHITECTURAL OBJECTS BASED ON PHOTOGRAMMETRIC DATA

ABSTRACT

Modern remote sensing technologies offer a range of solutions for creating various types of architectural heritage objects measurement models. Image processing algorithms allow not only to digitally recreate existing buildings, but also to make virtual reconstruction of partially destroyed architectural heritage. Photogrammetry is a relatively inexpensive and practically universal method for modelling architectural objects and creating their measurement drawings. The appearance of unmanned aerial vehicles with digital cameras on board in the photogrammetrist's arsenal has greatly facilitated the process of photographing hard-to-reach, and even more valuable architectural objects. Nevertheless, in order to obtain the desired result, individual techniques, both for imaging and digital reconstruction, must be selected for each object. The study presents the work results on two partially destroyed architectural heritage. A complex survey of the interior and exterior was carried out to digitally reconstruct the lost elements and to create dimensional models. The first architectural object, the ruins of the 17th century Adu-Surkho castle, is located in the Chechen Republic. Its modelling was based on images obtained only from the UAV, and the reconstruction of lost parts was based on analogy with existing examples of historical buildings. The second object, the 18th century Stroganovs' salt barn, is the oldest brick structure of Tutaev (Romanovskaya side). The modern state model was built based on the results of ground and aerial survey, and the reconstruction of the lost elements based on a set of multi-temporal images and drawings of the XVIII century. The results of the digital reconstruction will be used for restoration projects to restore the original appearance of the structures and increase the significance of these objects in the cultural and tourist activities of the regions.

KEYWORDS: photogrammetry, modelling of architectural objects, surveys from unmanned aerial vehicles, UAVs, reconstruction

ВВЕДЕНИЕ

На территории Российской Федерации существует большое количество уникальных архитектурных сооружений, которые расположены в малых городах или заброшенных деревнях и селах, отражающих эпоху и национальный колорит проживавших там людей. Эти сооружения представляют большой интерес для архитекторов, историков, археологов и ценителей национальной культуры. Совершенно понятно, что восстановить все памятники невозможно, но сохранить в виде реалистичных обмерных моделей наиболее значимые — это вполне реализуемая задача. В каких целях можно использовать подобные модели?

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Photogrammetry department, 4, Gorokhovskiy ln., Moscow, 105064, Russia, *e-mail*: tatyana.skrypitsyna@yandex.ru

² Geoscan group of companies, 6/3, Kolpachny ln., Moscow, 101000, Russia, *e-mail*: alesha.vorotilov@ya.ru

³ Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Research section, 4, Gorokhovskiy ln., Moscow, 105064, Russia, *e-mail*: kochneva.d.a@yandex.ru

⁴ Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), 4, Gorokhovskiy ln., Moscow, 105064, Russia, *e-mail*: 79011834240@yandex.ru

⁵ Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Photogrammetry department, 4, Gorokhovskiy ln., Moscow, 105064, Russia, *e-mail*: smirnov.e.a@list.ru

Во-первых, часть моделей может стать основой для создания НВИМ (англ. *Heritage Building Information Modeling* — информационная модель объекта архитектурного наследия) и в дальнейшем быть вписана в контекст развития среды обитания человека: стать музеем, выставочной площадкой, действующим храмом, частью туристического контента [Шестопалова и др., 2022; Dominici et al., 2017; Karachaliou et al., 2019]. Во-вторых, в случае невозможности консервации и/или восстановления такие модели могут стать экспонатами своеобразной «Красной книги» или «Черной книги» архитектурного наследия Российской Федерации и остаться в памяти потомков.

Методы дистанционного зондирования предлагают целый ряд решений, позволяющих создавать обмерные модели архитектурных объектов, находящихся в различной степени разрушенности и доступности: лазерное сканирование, аэрофотосъемка с беспилотных воздушных судов (БВС), наземная фотосъемка и комбинации всего перечисленного [Dominici et al., 2017; Karachaliou et al., 2019; Yang et al., 2020; Pepe et al., 2021]. Для каждого объекта приходится подбирать индивидуальные подходы для съемки и методов реконструкции. Критериями выбора методики является доступность объекта, степень сложности форм и экономическая целесообразность. Поскольку большинство провинциальных жемчужин архитектуры находятся в плачевном состоянии, то стоит вопрос о возможности цифровой реконструкции утраченных элементов. Не всегда можно найти чертежи этих построек. В таком случае большим подспорьем в восстановлении облика частично утраченных объектов могут стать снимки, полученные в разные годы. По этим изображениям можно восстанавливать разрушенные части строений [Kniaz et al., 2020].

В представленном исследовании приведены два примера создания трехмерных обмерных моделей частично разрушенных строений и их цифровой реконструкции. Оба объекта являются исторически и культурно значимыми, но находящимися в значительной стадии разрушения.

Первый архитектурный объект — руины замка Аду-Сурхо XVII в., находится на территории Чеченской Республики. Его моделирование происходило по снимкам, полученным только с БВС, а реконструкция утраченных частей — по аналогии с существующими образцами исторических построек.

Второй объект — Строгановский амбар XVIII в., является самым старым каменным строением г. Тутаева (Романовская сторона). Модель современного состояния строилась по результатам наземной и аэрофотосъемки, а реконструкция утраченных элементов — по набору разновременных снимков и чертежам XVIII в.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования

Замок Ади-Сурхо (также известный как Аду-Сурхо) расположен недалеко от села Макажой в Чеченской Республике и представляет комплекс каменных построек на скальном выступе южного склона Чеберлоевского каньона (42°45'17" с. ш., 46°6'30" в.д.) (рис. 1). Строительство комплекса относят к XVI–XVII вв. и связывают с именем народного героя Чечни Адина Сурхо¹. Положение замка позволяло контролировать дорогу, проходящую под ним, а практически отвесные склоны — использовать его как военное укрепление и защитное сооружение.

¹ Странная легенда одного замка на Кавказе. Электронный ресурс: <https://dzen.ru/a/XZvI8yvrSQct9dZJ> (дата обращения 24.04.24)

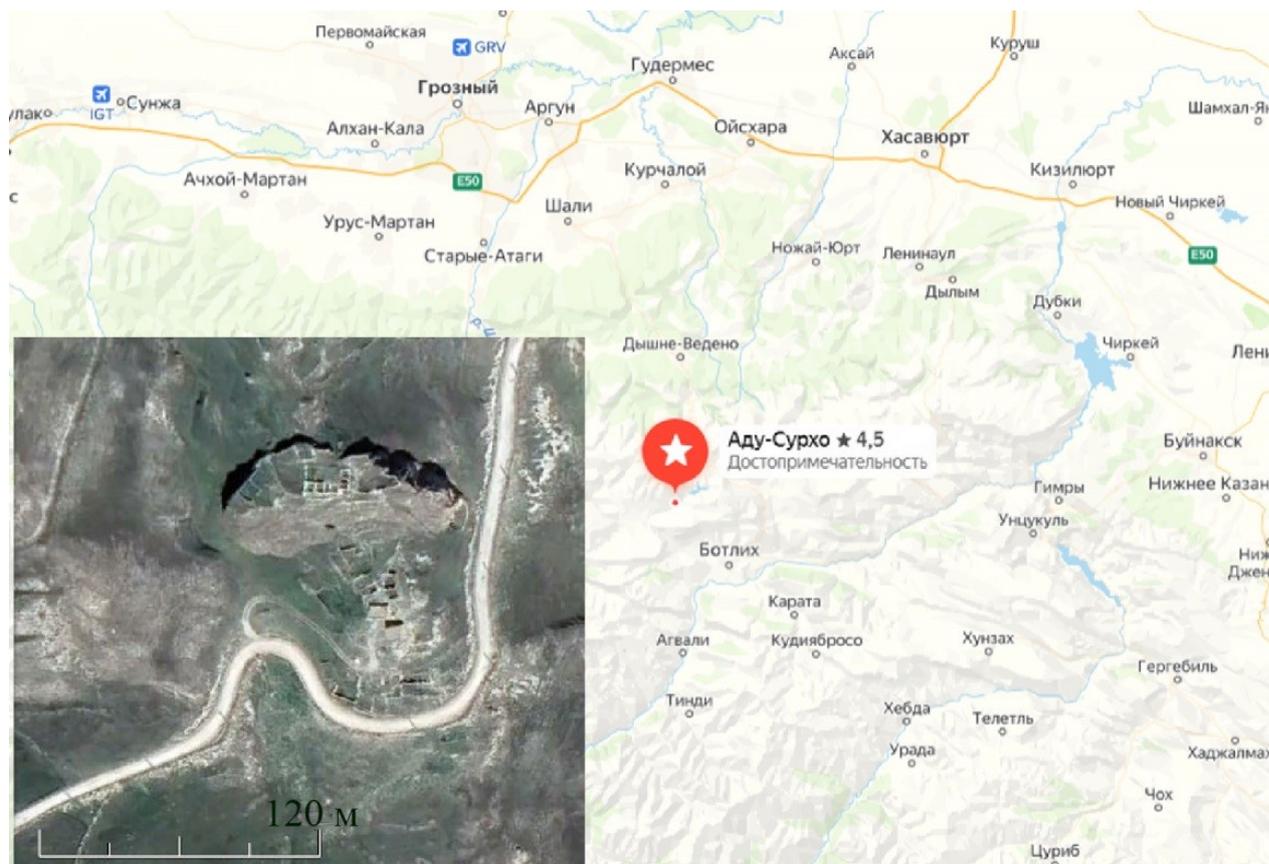


Рис. 1. Географическое положение замка Аду-Сурхо
Fig. 1. Adu-Surho castle geographical location

Главный замок был построен на вершине скалы (1 833 м н. у. м.). У подножия (1 790 м н. у. м.) расположены еще несколько строений на террасированных склонах, две постройки из которых были восстановлены (построены заново) местными энтузиастами, остальные находятся в руинированном состоянии. Под скалой оборудован грот для укрытия скота в непогоду.

В задачу исследования входило построение трехмерной модели объекта и попытка цифрового восстановления первоначального вида замка с использованием данных о типовых исторических постройках данного региона.

Вторым объектом исследования стало старейшее кирпичное здание города Тутаева Ярославской обл. (старое название — Романов-Борисоглебск). Соляной амбар графа Строганова был построен на рубеже XVII и XVIII вв. Он расположен в самом центре древнего города и является одним из его символов (57°52'59" с. ш., 39°32'32" в. д.) (рис. 2). Подобные здания этого периода больше не сохранились. Законодательно определено, что он имеет наивысший уровень культурной ценности [Стародубов, 2022]. На протяжении трех столетий амбар использовался по назначению и несколько раз перестраивался. В течение последних двадцати лет здание не использовалось и постепенно разрушалось. В настоящее время ведутся подготовительные работы по реставрации здания и интеграции его в современную городскую инфраструктуру. Задача реставраторов состоит в том, чтобы тщательно восстановить сохранившиеся части здания, в особенности те, что близки к первоначальному проекту здания. Само здание состоит из семи комнат. В 1-ом и 7-ом помещениях сохранились каменные своды и кровля, поэтому они находятся в удовлетворительном состоянии; в комнатах 2, 5 и 6 каменная кровля обвалилась, но они

находятся под железной кровлей; комнаты 3 и 4 — без каменных сводов под открытым небом (см. рис. 2с). Высота стен составляла около 5 м, а крыша — 11 м. Размеры амбара — 40 м в длину и 20 м в ширину.

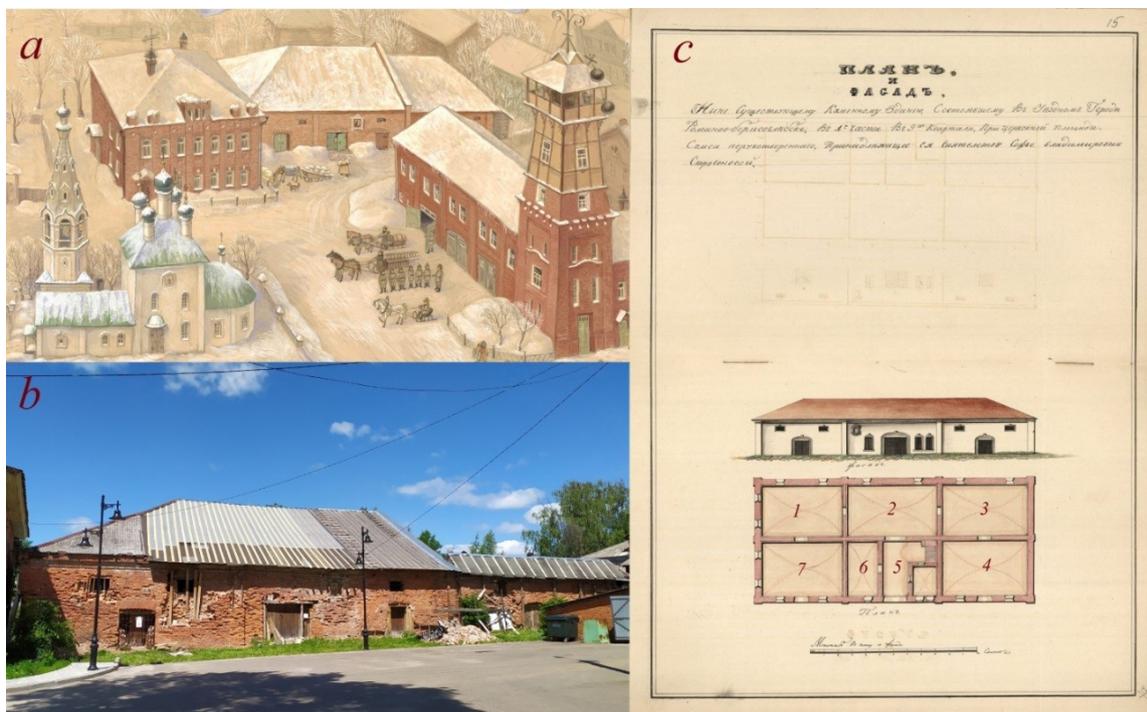


Рис. 2. Строгановский соляной амбар в Тутаеве: а) главная площадь Тутаева с амбаром, 1914 г., (рисунок А. Варнавской); б) амбар в 2023 г.; в) план амбара XIX в.
Fig. 2. Stroganovs' salt barn in Tutaev: a) Tutaev main square with a barn, 1914 (picture by A. Varnavskaya); b) a view of the barn in 2023; c) 19th century barn plan

Задачей моделирования было построить трехмерную модель амбара и реконструировать разрушенные части внутренних строений.

Получение и обработка данных

При построении цифровых моделей руин получение и обработка данных включали стандартные этапы:

- создание опорного геодезического обоснования;
- фотосъемочные процессы;
- фотограмметрическая обработка снимков; моделирование утраченных архитектурных элементов.

Поскольку исследуемые архитектурные объекты имели совершенно разное положение в пространстве и степень разрушения, то и технологически стандартная схема на каждом из этапов имела различия.

При съемке *Аду-Сурхо* точки опорного геодезического обоснования размещались по обочине дороги вокруг скалы, на которой находился комплекс строений. Всего было заложено и измерено 4 опорных точки, измерения которых производились в режиме короткой статики при действующей в области работ базовой станции. Определение координат базовой станции выполнялось путем уравнивания измерений от референсных станций. Средняя квадратическая ошибка (СКО) определения координат опорных точек составляла не более 5 см в пространстве.

В связи с труднодоступностью положения для моделирования можно было использовать снимки, полученные исключительно съемкой с БВС. Планирование и построение полетных миссий проводилось с учетом особенностей расположения объекта съемки таким образом, чтобы получить максимально возможное количество снимков с разных ракурсов с условием точного соблюдения высоты БВС над рельефом местности. Целевое превышение при полетах составило 50 м, отдельные элементы строений снимались в ручном режиме. Все съемки выполнялись БВС квадрокоптерного типа Phantom 4 PRO, оснащенного камерой FC6310, постоянное фокусное расстояние $f=8,8$ мм, размер матрицы 5 472x3 648 пикселей, физический размер пикселя 2,4 мкм.

По итогам выполнения АФС было получено 1 022 снимка в автоматическом режиме, и около 500 в ручном режиме. Пространственное разрешение на объекте составило в среднем 1,5 см/пикс.

Фотограмметрическая обработка осуществлялась в Agisoft Metashape Pro 2.1.0¹ совместно для всех изображений и включала процессы фототриангуляции с самокалибровкой, построение плотного облака точек и тайловой текстурированной модели замка [Семенов и др., 2010] (рис. 3). При уравнивании сети фототриангуляции СКО на опорных точках составила не более 1,5 см в плане и 2 см по высоте. Точность модели оценивалась по контрольным отрезкам, которые были измерены на объектах лазерной рулеткой и на модели. Всего было измерено 7 отрезков в доступных частях комплекса строений. Среднее расхождение на контрольных отрезках составило 1,8 см.



Рис. 3. Полигональная текстурированная модель замка Аду-Сурхо
Fig. 3. Polygonal textured model of Adu-Surho castle

Строгановский амбар. Сложность съемок амбара состояла в том, что часть помещений находилось под крышей, поэтому опорные точки необходимы были не только для внешнего ориентирования общей модели строения, но и для связи наружных фасадов и внутренних помещений. В связи с этим точки размещались равномерно по всем стенам помещений и внешнему фасаду. Геодезические измерения координат опорных точек

¹ Официальный сайт. Электронный ресурс: <https://www.agisoft.com/> (дата обращения 24.04.24)

производились тахеометром Trimble Zeiss 3305 Dg в безотражательном режиме линейно-угловым методом [Скрытцына и др., 2018]. Средняя квадратическая ошибка определения координат точек составила порядка 1,5 см. Всего была измерена 141 опорная точка.

Фотографирование производилось с воздуха и земли. Для наземной фотографической съемки всех частей здания использовался цифровой фотоаппарат Canon PowerShot SX510 HS с постоянным фокусным расстоянием $f=4,3$ мм, размером матрицы 4 000x3 000 пикс., физический размер пикселя 1,5 мкм. Размер пикселя на фасаде — 1,32 мм/пикс. Надирная и перспективная АФС необходима была для верхних частей здания и выполнялась с использованием Phantom 4 PRO, оснащенного камерой FC6310, постоянное фокусное расстояние $f= 8,8$ мм, размер матрицы 5 472x3 648 пикселей, физический размер пикселя 2,4 мкм. В результате фотосъемочных работ было получено 775 аэроснимков и 1 088 наземных снимков.

Особую сложность для проведения фотосъемочных работ представляли комнаты, находящиеся под крышей, но без каменной кровли (помещения 2, 5, 6 на рис. 2). Эти помещения находятся в аварийном состоянии и не имеют освещения. Для получения снимков верхних частей помещений выполнялась наземная съемка и съемка БВС в ручном режиме с использованием студийного освещения.

Фотограмметрическая обработка осуществлялась также в Agisoft Metashape Pro 2.1.0. Фототриангуляция самокалибровкой проводилась отдельно для каждого помещения (5 помещений и общий внешний контур). СКО на опорных точках по комнатам и внешним стенам не превышала 6 мм по трем координатам. Затем были построены модели помещений и внешних стен в виде плотных облаков точек. На заключительном этапе все модели были объединены в общее облако точек по опорным точкам (рис. 5). СКО на опорных точках общей модели не превышала 1 см по трем координатам, что позволяет создавать по полученной модели обмерные чертежи и профили м-бов 1:100–1:200¹. Точки, которые принадлежали железной крыше, с модели были удалены.



Рис. 4. Финальная модель амбара в виде облака точек
Fig. 4. The final barn model is in the form of a point cloud

¹ ГОСТ Р 56905 2016. Проведение обмерных и инженерно-геодезических работ на объектах культурного наследия. Общие требования. Электронный ресурс: <https://base.garant.ru/71512990/> (дата обращения 24.04.24)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование утраченных частей замка Аду-Сурхо

Реконструкция производилась по плотному облаку точек в программе Autodesk 3DS Max. Анализ точек позволил сделать вывод о расположении контуров стен древних построек, их планировочной структуре (рис. 5).



Рис. 5. Реконструированный облик замка Аду-Сурхо
Fig. 5. Reconstructed appearance of Adu Surho castle

Содержащаяся в облаке точек информация о наличии или отсутствии фундаментов у построек послужила основанием для определения функционального назначения башен. Для воссоздания облика сооружений были задействованы исторические и археологические описания памятников средневековой чеченской архитектуры и примеры сохранившихся и отреставрированных зданий и башен.

Моделирование утраченных частей Строгановского амбара

Собственник амбара Ю. В. Стародубов предоставил любительские фотоснимки всех помещений, полученные 8–10 лет назад. На этих снимках были зафиксированы те части интерьеров, которые на данный момент уже утрачены (кирпичный свод помещения 6 обвален) или скрыты за сохранными конструкциями (арочный проход между помещениями 3 и 2, оконные проемы в помещении 2, рис. 2). На кирпичный свод имелось 8 снимков, а на арочный проход между помещениями — 16 снимков. Эти изображения были получены с разных ракурсов и в разные сезоны (летом и зимой), но они имели перекрытия, что позволило по этим снимкам создать модели фрагментов утраченных частей зданий в виде плотных облаков точек. Затем по связующим точкам фрагменты были интегрированы в общую модель путем замены идентичных участков. На рис. 6 представлен пример интеграции облака точек, составленного из любительских снимков (b) в модель 2022 г. (a). В результате объединения получилась модель (c), пригодная для создания обмерного чертежа (d).

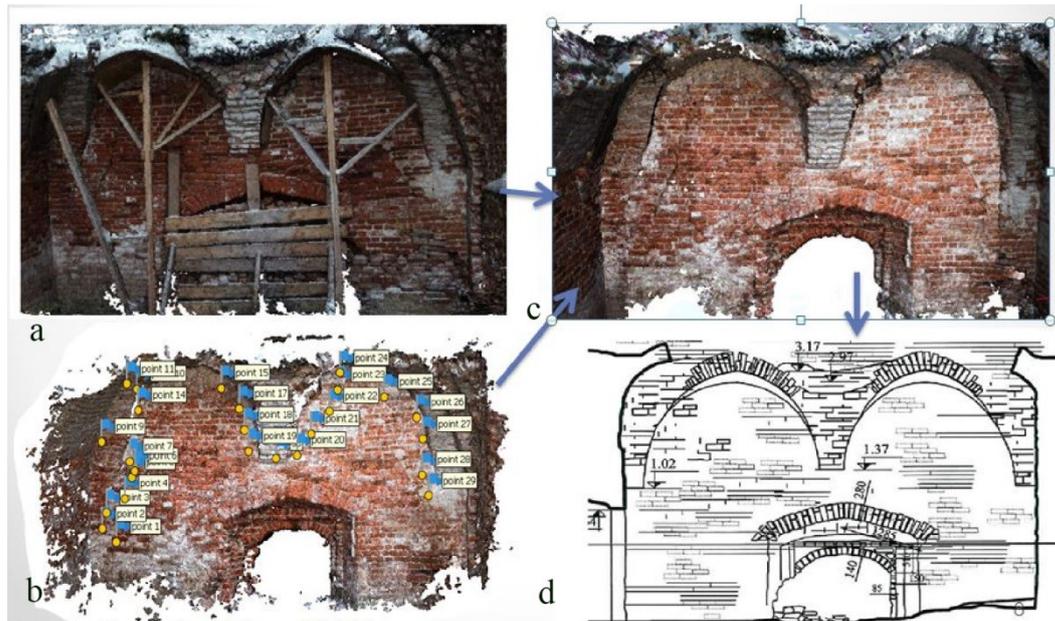


Рис. 6. Реконструкция арочного прохода между помещениями
Fig. 6. Reconstruction of the arched entrance between the rooms

Последним этапом была графическая реконструкция внутренних помещений по облаку точек с использованием чертежей XIX в. (рис. 7) в ПО Blender¹.

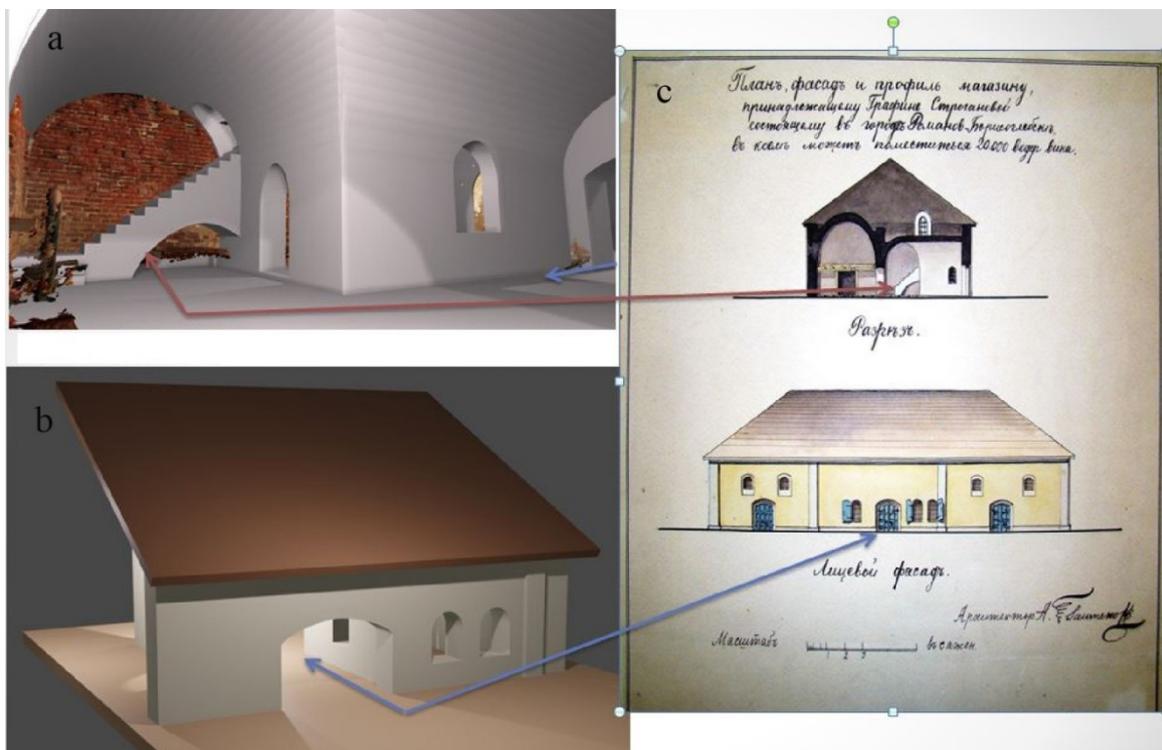


Рис. 7. Реконструкция интерьеров помещения № 5 Строгановского амбара
Fig. 7. Reconstruction of the interiors of room No. 5 of the Stroganovs' salt barn

¹ Официальный сайт. Электронный ресурс: <https://docs.blender.org/> (дата обращения 24.04.24)

Плотные облака точек повторяют текстуру стен и особенности кладки кирпича, что позволило достоверно выделить этапы перестройки здания, определить места креплений обвалившихся каменных сводов, найти и измерить замурованные ниши и проходы между помещениями. Словом, те детали, которые невозможно было отобразить на чертежах при натурных обмерах. На рис. 7: а) — восстановленные стены, своды и лестница помещения 5 (см. схему на рис. 2) амбара, б) — реконструкция входа в помещение (можно сравнить со входом в современный амбар; на рис. 2 и 4 — это третья слева дверь; д) — чертеж амбара XIX в.

ВЫВОДЫ

Методы наземной и аэрофотосъемок, а также программы фотограмметрической обработки полученных изображений позволяют получать высокоточные модели архитектурных объектов, которые служат информативным ресурсом для реставраторов. Основой достижения качественных результатов и требуемой точности фотограмметрическим способом является строгое соблюдение технологии выполнения работ, которая определяется целью моделирования, степенью сложности форм и доступностью объекта.

Современные фотограмметрические алгоритмы позволяют использовать случайный набор изображений для восстановления утраченных фрагментов строений.

В процессе работ изучены и отработаны на практике особенности выполнения работ на объектах архитектурного наследия в горной местности и в условиях ограниченного перемещения и освещения объекта.

Реализованы различные способы реконструкции утраченных частей строений. Полученные модели замка Аду-Сурхо и Строгановского амбара по точности удовлетворяют требованиям для создания обмерной документации, которая впоследствии может использоваться для создания проектов реставрации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РНФ, грант № 24-21-00314. Отдельная благодарность Юрию Стародубову — владельцу Строгановского амбара и инициатору его реставрации.

ACKNOWLEDGEMENTS

The project is supported by the Russian Science Foundation, grant No. 24-21-00314. Special thanks to Yuri Starodubov — owner of a unique historical building and initiator of its restoration.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Семенов А. Е., Крюков Е. В., Рыкованов Д. П., Семенов Д. А. Практическое применение технологий компьютерного зрения в решении задач распознавания, восстановления 3D, сшивки карт, точного целеуказания, счисления пути и навигации. Известия ЮФУ. Технические науки, 2010. Т. 104. № 3. С. 92–102.

Скрыпичкина Т. Н., Староверов С. В. Съёмка фасадов зданий с использованием беспилотных воздушных судов. Инженерные изыскания, 2018. Т. XII. № 7–8. С. 46–52. DOI: 10.25296/1997-8650-2018-12-7-8-46-52.

Стародубов Ю. В. Соляной амбар Строгановых в Романове-Борисоглебске. Опыт изучения, сохранения и музеефикации. Русский Север-2022: проблемы изучения и сохранения историко-культурного наследия: сборник работ VI Всероссийской научной конференции. Вологда: Вологодский государственный университет, 2022. С. 68–77.

Шестопалова О. Л., Шестопалов П. П. Об интеграции BIM-технологии информационного моделирования зданий с методами фотограмметрии при построении цифровых моделей объектов в архитектурно-строительной отрасли. Известия ТулГУ. Технические науки, 2022. № 8. С. 138–143. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-138-144.

Dominici D., Alicandro M., Rosciano E., Massimi V. Multiscale documentation and monitoring of l'Aquila historical centre using UAV photogrammetry. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Materials of the Geomatics and Restoration — Conservation of Cultural Heritage in the Digital Era, Florence, 2017. V. XLII-5/W1. P. 365–371. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-365-2017.

Karachaliou E., Georgiou E., Psaltis D., Stylianidis E. UAV for mapping historic buildings: from 3D modelling to BIM, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 2019. V. XLII-2/W9. P. 397–402. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-397-2019.

Kniaz V. V., Knyaz V. A., Remondino F., Bordodymov A., Moshkantsev P. Image-to-voxel model translation for 3d scene reconstruction and segmentation. Computer Vision — ECCV 2020. ECCV 2020. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2020. 12352. DOI: 10.1007/978-3-030-58571-6-7.

Pepe M., Costantino D. Techniques, tools, platforms and algorithms in close range photogrammetry in building 3D model and 2D representation of objects and complex architectures. Computer-Aided Design & Applications, 2021. V. 18. No. 1. P. 4–65. DOI: 10.14733/cadaps.2021.42-65.

Yang X., Grussenmeyer P., Koehl M., Macher H., Murtiyoso A., Landes T. Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques. Journal of Cultural Heritage, 2020. V. 46. P. 350–360. DOI: 10.1016/j.culher.2020.05.008.

REFERENCES

Dominici D., Alicandro M., Rosciano E., Massimi V. Multiscale documentation and monitoring of l'Aquila historical centre using UAV photogrammetry. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Materials of the Geomatics and Restoration — Conservation of Cultural Heritage in the Digital Era, Florence, 2017. V. XLII-5/W1. P. 365–371. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-365-2017.

Karachaliou E., Georgiou E., Psaltis D., Stylianidis E. UAV for mapping historic buildings: from 3D modelling to BIM, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 2019. V. XLII-2/W9. P. 397–402. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-397-2019.

Kniaz V. V., Knyaz V. A., Remondino F., Bordodymov A., Moshkantsev P. Image-to-voxel model translation for 3d scene reconstruction and segmentation. Computer Vision — ECCV 2020. ECCV 2020. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2020. 12352. DOI: 10.1007/978-3-030-58571-6-7.

Pepe M., Costantino D. Techniques, tools, platforms and algorithms in close range photogrammetry in building 3D model and 2D representation of objects and complex architectures. Computer-Aided Design & Applications, 2021. V. 18. No. 1. P. 42–65. DOI: 10.14733/cadaps.2021.42-65.

Semenov A. E., Kryukov E. V., Rykovanov D. P., Semenov D. A. Practical application of computer vision techniques to solve problems of recognition, 3D reconstruction, map stitching, precise targeting, dead reckoning, and navigation. Izvestia of the Southern Federal University. Engineering Sciences, 2010. V. 3. No. 104. P. 92–102 (in Russian).

Shestopalova O. L., Shestopalov R. P. On the integration of BIM technology of building information modeling with photogrammetry methods in the construction of digital models of objects in the architectural and construction industry. *Izvestia of the TulFU. Engineering Sciences*, 2022. No. 8. P. 138–143 (in Russian). DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-138-144.

Skrypitsyna T. N., Staroverov S. V. Shooting building facades using unmanned aircraft. *Engineering Survey*, 2018. V. XII. No. 7–8. P. 46–52 (in Russian).

Starodubov Y. V. Stroganovs' salt barn in Romanov-Borisoglebsk. Experience of study, preservation and museification. *Russian North-2022: problems of study and preservation of historical and cultural heritage*. Vologda: Vologda State University, 2022. P. 68–77 (in Russian).

Yang X., Grussenmeyer P., Koehl M., Macher H., Murtiyoso A., Landes T. Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques. *Journal of Cultural Heritage*, 2020. V. 46. P. 350–360. DOI: 10.1016/j.culher.2020.05.008.

А. Д. Китов¹, В. М. Плюснин²

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ДИНАМИКА ОТДЕЛЬНЫХ ЛЕДНИКОВ ШИРОТНОГО ТРАНСЕКТА (КОДАР–ГИМАЛАИ)

АННОТАЦИЯ

Дистанционные данные Landsat позволяют с периодичностью до 5 лет анализировать состояние нивально-гляциальных объектов в различных районах современного оледенения. Одним из показательных и хорошо дешифрируемых характеристик таких объектов является открытая площадь ледника. Рассматриваемый широтный трансект от северных районов оледенения Южной Сибири до Гималаев позволяет в таком ракурсе с пятилетней периодичностью представить динамику ледников на примере отдельных ледников ключевых районов. Вдоль трансекта показана динамика ледников в горах: Кодар, Баргузинский хребет, Байкальский хребет, Восточный Саян (массивы пика Топографов и Мунку-Сардык), Монгольский Алтай, Тянь-Шань, Гималаи. Дан анализ изменения открытой части ледников некоторых представителей этих гор. На протяжении трансекта ледники сокращаются, но в разной степени. Наблюдается сокращение ледников и повышение интенсивности бронирования поверхностными моренами в большей степени в северной части трансекта. По данным дистанционного зондирования Земли (Landsat) выполнено сравнение динамики выбранных ледников Азаровой (№ 20, Кодар), Урёл-Амутис (Баргузинский хребет), Черского (Байкальский хребет), Перетолчина (№ 31, Мунку-Сардык), Топографов (№ 18, Окинский хребет), Цаст-Ула (№ 8, Цамбагарав), Карлыктаг (Тянь-Шань), Алтынтаг (№ 3, Куньлунь) и Юбра (№ 30, Лангтанг). С середины 1970-х, когда началась съемка спутником Landsat, до наших дней ледники сократились по площади от 17 до 63 %. Ледники северной части трансекта сокращаются более плавно по сравнению с южной. В южной части наблюдается сокращение и замедление, а иногда и увеличение открытой части ледников примерно с периодичностью 10 лет. Наиболее неравномерная динамика у Гималайского ледника. Скорость сокращения ледников уменьшается с юга к северу трансекта. Ледник Азаровой сокращается со скоростью 0,007 км²/год, Урёл-Амутис — 0,005, Черского — 0,002, Перетолчина — 0,012, Топографов — 0,002, Цаст-Ула — 0,056, Алтынтаг — 0,013, Карлыктаг — 0,07, Юбра — 0,085.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГИС, данные Landsat, 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. Kitov¹, Viktor M. Plyusnin²

COMPARATIVE DYNAMICS OF INDIVIDUAL GLACIERS OF THE LATITUDINAL TRANSECT (KODAR–HIMALAYAS)

ABSTRACT

Landsat remote sensing data make it possible to analyze the state of nival-glacial objects in various areas of modern glaciation with a periodicity of up to 5 years. One of the indicative and well-decipherable characteristics of such objects is the open area of the glacier. The latitudinal transect from the northern glaciation regions of Southern Siberia to the Himalayas makes it possible to present the dynamics of glaciers on the example of individual glaciers of key regions from this perspective with a five-year periodicity. Along the transect, the dynamics of glaciers in the mountains is shown: Kodar, Barguzinsky Range, Baikal Range, Eastern Sayan (Topografov Peak and Munku-Sardyk massifs), Mongolian Altai, Tien Shan, Himalayas. An analysis of changes in the open part of the glaciers of some representatives of these mountains is given. Throughout the transect, glaciers shrink, but to varying degrees. There is a decrease in glaciers and an increase in the intensity of surface moraine armor to a greater extent in the northern part of the transect. Based on the data of remote sensing of the Earth (Landsat), a comparison of the dynamics of the selected glaciers Azarova (No. 20, Kodar), Urel-Amutis (Barguzinsky Ridge), Chersky (Baikal Range), Peretolchina (No. 31, Munku-Sardyk), Topografov (No. 18, Okinsky Ridge), Tsast-Ula (No. 8, Tsambagarav), Karlygtag (Tien Shan), Altyntag (No. 3, Kunlun) and Yubra (No. 30, Langtang) was carried out. From the mid-1970s, when Landsat imagery began, to the present day, glaciers have shrunk in area from 17 to 63 percent. The glaciers of the northern part of the transect are shrinking more smoothly compared to the southern part. In the southern part, there is a reduction and slowdown, and sometimes an increase in the open part of the glaciers with a periodicity of about 10 years. The Himalayan glacier has the most uneven dynamics. The rate of glacier shrinkage decreases from south to north of the transect. The Azarova glacier is shrinking at a rate of 0.007 km²/year, the Urel-Amutis glacier is shrinking at a rate of 0.005, the Chersky glacier is shrinking at a rate of 0.002, the Peretolchina glacier is shrinking at a rate of 0.012, the Topografov glacier is shrinking at a rate of 0.002, the Tsast-Ula glacier is shrinking at a rate of 0.056, the Altyntag glacier is shrinking at a rate of 0.013, the Karlyktag glacier is shrinking at a rate of 0.07, and the Yubra glacier is shrinking at a rate of 0.085.

KEYWORDS: GIS, Landsat data, glacier, remote sensing, transect

ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата находит отражение в динамике внутриконтинентальных горных ледников [IPCC, 2007, 2021]. В результате потепления происходит сокращение ледников. Однако локальные условия влияют на их динамику. Представляет интерес проследить реакцию различных ледников на значительном широтном пространстве. Нами рассматривается динамика ледников в пределах трансекта от хребта Кодар до Гималаев по данным Landsat [Kitov и др., 2019]. Анализ этих данных показал, что в отдельные периоды можно отслеживать изменения ледников ежегодно. Однако наиболее уверенно можно проследить такие изменения с периодичностью 5–10 лет. Такая регулярная инвентаризация ледников с применением программных комплексов ГИС позволит дополнить электронные

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

каталоги и базы данных (БД) ледников [Gao, Liu, 2001; Owen et al., 2009; RGI Consortium, 2017]. В архиве Геологической службы США в открытом доступе можно найти спутниковые данные Landsat с 1970-х гг. по настоящее время. На этих снимках хорошо дешифрируется открытая часть (площадь) даже небольших ледников [Руководство, 1967]. Именно эта часть ледника представляется наиболее чувствительным показателем его изменения. В данной работе рассматривается динамика ледников по названной характеристике с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с периодичностью около 5 лет. Начальным состоянием будем считать площадь ледника по топографическим картам 1960-х (если такую удавалось найти). За опорные годы были взяты соответственно 1960, 1970, 1975, 1980, 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 и 2023 гг. Если данных конкретного года не находилось, то использовались данные ближайших лет (годом раньше или позже).

В качестве сравниваемых объектов на ключевых участках (горных хребтов) выбраны ледники: Азаровой (№ 20, Кодар), Урёл-Амутис (Баргузинский хребет), Черского (Байкальский хребет), Перетолчина (№ 31, Мунку-Сардык, Восточный Саян), Топографов (№ 18, Окинский хребет, Восточный Саян), Цаст-Ула (№ 8, Цамбагарав, Монгольский Алтай), Карлыктаг (Восточный Тянь-Шань), Алтынтаг (№ 3, Куньлунь) и Юбра (№ 30 Лангтанг) (рис. 1).

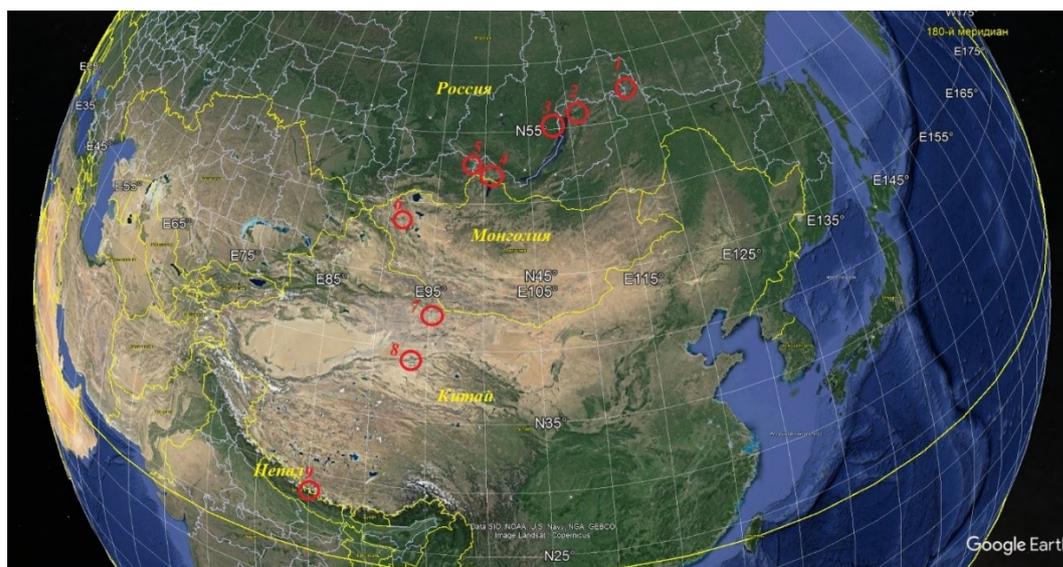


Рис. 1. Ключевые участки трансекта: 1 — Хребет Кодар; 2 — Баргузинский хребет; 3 — Байкальский хребет; 4 — хребет Мунку-Сардык; 5 — Окинский хребет; 6 — Цаст-Ула; 7 — Карлыктаг; 8 — Куньлунь; 9 — Лангтанг
Fig. 1. Key sections of the transect: 1 — Kodar Ridge; 2 — Barguzinsky Ridge; 3 — Baikal Range; 4 — Munku-Sardyk ridge; 5 — Oka Ridge; 6 — Tsast-Ula; 7 — Karlyktag; 8 — Kunlun; 9 — Langtang

В отдельные годы некоторые ледники трансекта исследовались, но не во взаимосвязи и не регулярно. Ледник Азаровой вошел в Каталог ледников СССР [1972] и исследовался в нашем столетии [Shahgedanova et al., 2011]. Ледники Баргузинского и Байкальского хребтов менее изучены [Котляков и др., 2017]. Ледники Восточного Саяна вошли в соответствующие каталоги [Каталог, 1973] и продолжают изучаться в настоящее время [Kitov et al., 2009; Осипов и др., 2017]. Ледники Монгольского Алтая исследовали по данным ДЗЗ Д. А. Ганюшкин и Д. Отгонбаяр [Отгонбаяр, 2011; Ганюшкин и др., 2016].

Ледники Гималаев исследуются активно особенно в районе Эвереста, но на территорию Лангтанг почти нет публикаций [Котляков и др., 2017; Китов и др., 2019; Wagnon et al., 2007; Bajracharya, Mool, 2009; Keiji Higuchi et al., 2015].

Целью исследования является сравнение динамики ледников вдоль названного трансекта. Представлена динамика ледников по площади их открытой части с учетом небольшой облачности, сезонной представительности ледников (на момент конца абляции) и с периодичностью около 5 лет.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Картографирование и отслеживание динамики ледников выполнялись по данным Landsat-2, -5, -7, -8, -9 с сайта Геологической службы США с 1972 по 2023 гг.¹ Использовались также топографические карты и 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 аналогичных исследований. Список данных Landsat получился очень длинным. Наиболее продуктивным оказался спутник Landsat-5. Наименее удачными были 1980-е гг. Найти оптимальные снимки на период абляции для основной части ледников (с конца июля до середины августа каждого года) было легче для центрального участка трансекта. Для самых южных ледников (Гималаи) период безоблачного и оптимального определения границ ледников из-за муссонов смещается на середину октября и ноябрь. Для северных ледников (от Кодара до Восточных Саян) окно для получения оптимальных снимков сужается и приходится на первую декаду августа. Было исследовано 379 сцен данных Landsat, из них Landsat-5 — 107, Landsat-1-4 — 36, остальные 236 пришлись на Landsat-7-9.

Для улучшения видимости при дешифрировании использовались преобразования исходного растра типа Histogram equalize, Standard deviations, Gaussian и др. Но чаще всего использовалось преобразование Minimum-Maximum с небольшим увеличением яркости снимка.

Космические снимки были приведены к единой проекции WGS-84, UTM-зона 50 (Кодар), 49 (Баргузинский и Байкальский хребты), 47 (Восточный Саян), 46 (Монгольский Алтай, Восточный Тянь-Шань и Куньлунь), 45 (Лангтанг). Дешифрирование и векторизация границ объектов проводились в ручном режиме RGB-синтезированных снимков (сцен), 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-7-9). 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. Измерения выполнялись в ГИС-программе ArcViewGIS 3.2a. При выделении границ ледника учитывались рекомендации по составлению каталогов ледников и Международного проекта GLIMS [Руководство, 1967; Rau et al., 2005; Hartman, 2006; Raup, Khalsa, 2010; Paul et al., 2017; RGI Consortium, 2017].

Погрешность определялась как произведение протяженности границы ледника (периметра) на разрешающую способность снимка. Ошибка dS в процентах определялась по формуле (1):

$$dS = Sp / S * 100 \quad (1),$$

где S — площадь ледника,

Sp — площадь границы ледника с учетом размера пикселя.

¹ Электронный ресурс: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 10.02.2024)

Учитывая пространственное разрешение снимка Landsat-7–9 — 15 м/пикс., погрешность определения площади ледника оценивается в 10–35 % от измеряемой величины и используемых данных. Для снимков Landsat-2, -4 с разрешением 80 м/пикс. точность определения площади порядка 60 % (табл. 1).

Табл. 1. Оценка точности площади ледника Азаровой по разным данным
Table 1. Estimation of the accuracy of the Azarova glacier area according to various data

Год	Площадь, км ²	Периметр, км	Точность, км	Мин. площадь, км ²	Площадь границы ледника, км ²	Ошибка, %
1950	1,299	7,000	0,05	0,0025	0,350	26,9
1960	1,030	6,300	0,05	0,0025	0,315	30,6
1970	0,800	6,000	0,05	0,0025	0,300	37,5
1975	0,678	5,177	0,08	0,0064	0,414	61,1
1980	0,650	5,000	0,08	0,0064	0,400	61,5
1985	0,639	4,537	0,03	0,0009	0,136	21,3
1990	0,630	4,495	0,03	0,0009	0,135	21,4
1995	0,628	4,616	0,03	0,0009	0,138	22,0
2000	0,578	4,253	0,015	0,000225	0,064	11,0
2005	0,534	4,125	0,015	0,000225	0,062	11,6
2010	0,532	3,870	0,015	0,000225	0,058	10,9
2015	0,485	4,074	0,015	0,000225	0,061	12,6
2020	0,448	3,868	0,015	0,000225	0,058	12,9
2023	0,424	3,919	0,015	0,000225	0,059	13,9

Год — год получения данных; 1950–1970 гг. — использованы топокарты, 1975–1980 гг. — данные Ландсат-2–4, 1985–1995 гг. — Ландсат-5, 2000–2010 гг. — Ландсат-7, 2015–2023 гг. — Ландсат-8, -9; Мин. площадь — площадь условного пикселя, пояснение в тексте.

Картографические данные использовались как приблизительные для начальной ориентировки (отсчета). С одной стороны, не удалось найти топографические карты одинакового масштаба на все горные массивы, а на некоторые они вообще отсутствовали. С другой — на топокартах не отражаются основные составляющие ледников, да и аэроснимки чаще использовались не в период максимальной абляции конкретного ледника. На ледники Кодара, Байкальского и Баргузинского хребтов удалось скачать из интернета топокарты м-ба 1: 100 000, Восточного Саяна (Мунку-Сардык и Окинский хребет) — 1: 50 000, на Цаст-Ула и Карлыктаг карт не было, на Алтынтаг и Гималаи — 1: 200 000. Точность соответственно от 25 до 100 м. Условный пиксель (минимальная различимая площадь) порядка 0,000625, 0,0025 и 0,01 км². Для ледника Азаровой по карте после оцифровки в ГИС площадь получилась 1,03 км², периметр — 6,3 км, тогда площадь границы ледника — $6,3 / 0,05 = 126$ пикселей, $126 * 0,0025 = 0,315$ км². В таком случае $dS = 0,315 / 1,03 = 31$ %. По другим данным [Каталог, 1972] площадь составляла (вероятно, по аэроснимкам 1950-х) 1,3 км².

Для российских ледников, если не было снимков на 1970 г., данные брались из каталога ледников СССР [Каталог, 1972, 1973] и соответствующих БД¹. Для ледника

¹ Электронный ресурс: <https://www.glacru.ru/> (дата обращения 10.02.2024)

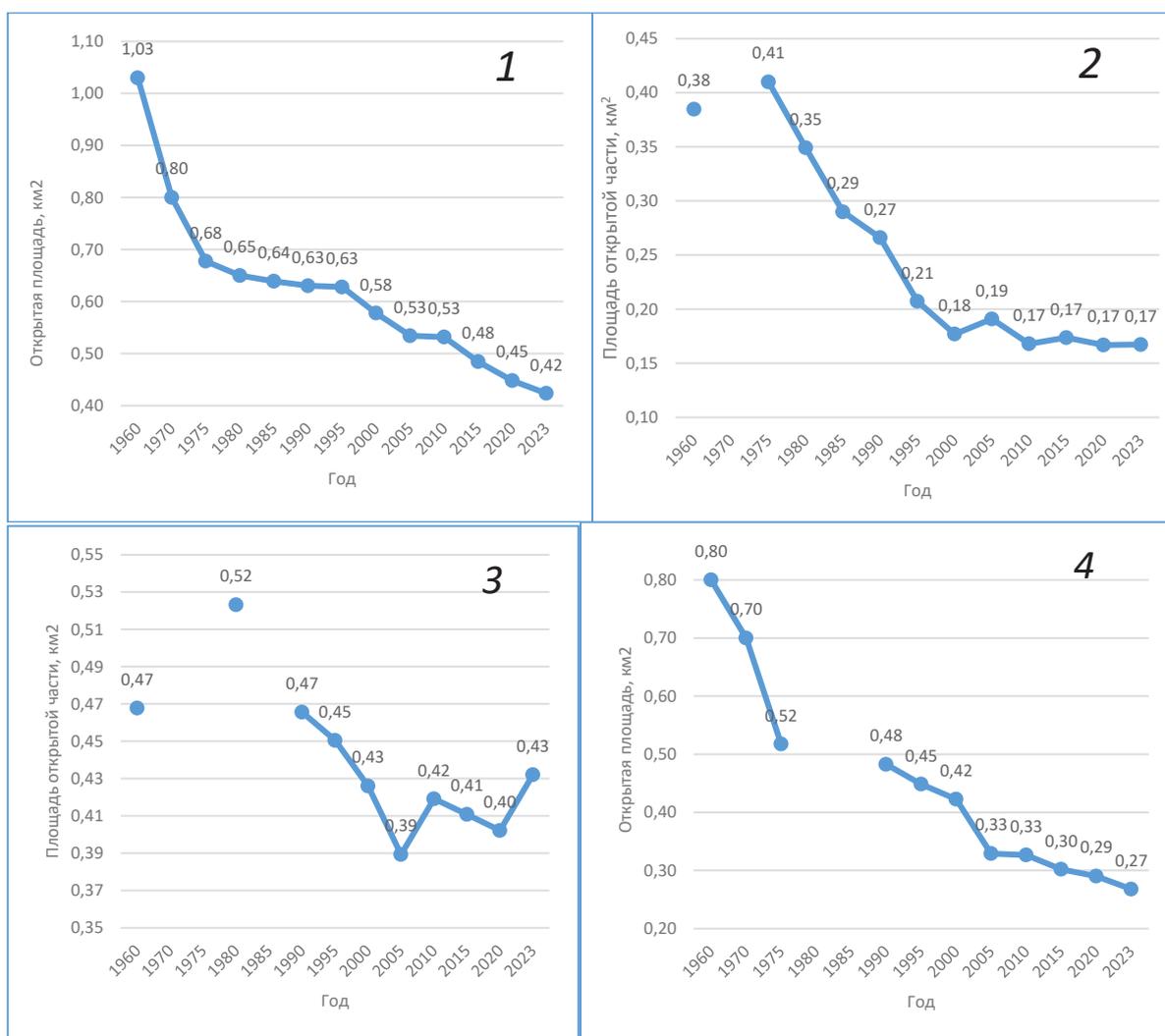
Азаровой в каталоге точность дана 0–5, для Перетолчина — 5–10, для Радде — 15–25, Топографов (№ 18) — 0–5 %.

Аналогичная точность получилась для ледников других горных районов. Поскольку для ледников Восточного Саяна использовались топокарты м-ба 1: 50 000, то ошибка определения площади получилась порядка 10–12 %, использование первых данных Landsat-1–4 дало наибольшую ошибку порядка 60 %, по данным Landsat-5 погрешность составила (для 1985–1995 гг.) 15–30 % для ледников в зависимости от соотношения площадь/периметр, а с 2000 г. при использовании данных Landsat-7-9 погрешность уменьшилась до 5–25 %. Чем меньше ледник, тем больше ошибка. Средние показатели погрешности по всем ледникам представлены на рис. 2(10).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате ГИС-анализа оценивалась площадь открытой части выбранных ледников в опорные годы с 1960 по 2023 гг. (рис. 2).

Между 1970-ми и 2000-ми гг. в Центральной Азии наблюдался отрицательный баланс массы ледников [WGMS, 2021], при этом отмечается общее отступление ледников за XX столетие с отдельными наступаниями около 1970-х гг. [Котляков и др., 2017; Su, Shi, 2002].



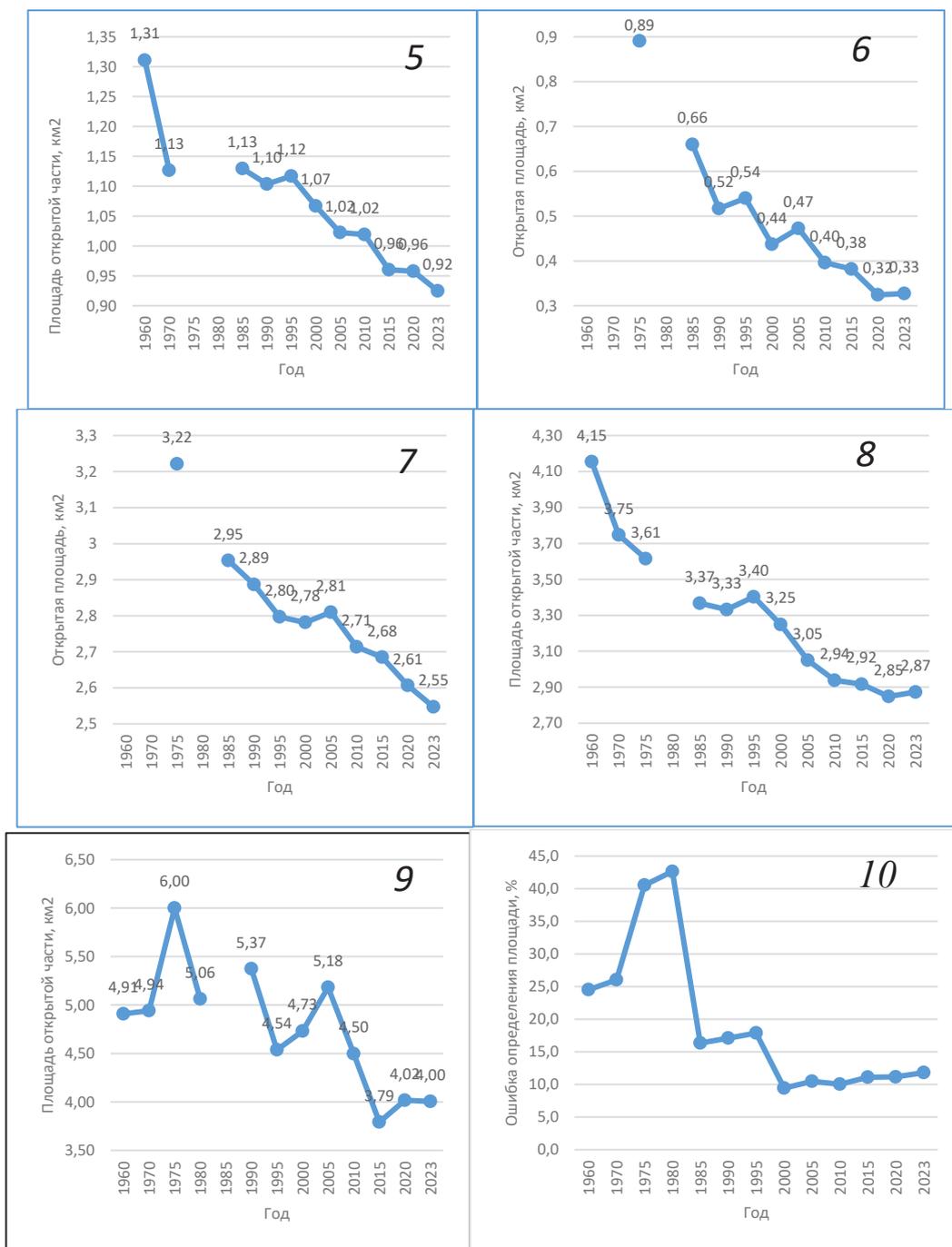


Рис. 2. Изменения открытой части ледников на ключевых участках: 1 — ледник Азаровой (Кодар); 2 — Урёл-Амутис (Баргузинский хребет); 3 — Черского (Байкальский хребет); 4 — Перетолчина (Мунку-Сардык); 5 — Топографов, № 18 (Окинский хребет); 6 — Цаст-Ула, № 8 (Цамбагарав); 7 — Карлыктаг (Тянь-Шань); 8 — Алтынтаг (Куньлунь); 9 — Юбра (Лангтанг, Гималаи); 10 — средняя ошибка определения площади ледника

Fig. 2. Changes in the open part of glaciers in key areas: 1 — Azarova glacier (Kodar); 2 — Urel-Amutis (Barguzin Range); 3 — Chersky (Baikal Range); 4 — Peretolchina (Munku-Sardyk); 5 — Topografov, No. 18 (Okinsky Ridge); 6 — Tsast-Ula, No. 8 (Tsambagarav); 7 — Karlyktag (Tien Shan); 8 — Altyntag (Kunlun); 9 — Yubra (Langtang, Himalayas); 10 — average error in determining the area of the glacier

Как видно из представленных данных, скорость сокращения площади открытой части ледников неравномерна, наблюдается периодичность (7–11 лет) замедления скорости сокращения и даже в некоторых случаях увеличение площади. Наиболее плавно и равномерно сокращался самый северный ледник Азаровой. Для этой территории удалось найти данные на все опорные годы. Хорошо просматривается замедление уменьшения ледника в 1970-е – 1990-е гг. Однако более южный Баргузинский ледник равномерно сокращался, а с 2000-х гг. — наоборот, начал замедляться в сокращении площади. К сожалению, не удалось найти данные на начальный период наблюдения. Данные топографических карт следует считать приблизительными, т. к. рисовка границ ледников на них довольно условная. Данные по Байкальскому хребту еще более фрагментарные. Как и большинство ледников, к 2005 г. ледник Черского сокращался сильнее, чем в настоящее время. Ледники Мунку-Сардык и в т. ч. ледник Перетолчина наиболее изучены. Наблюдение за этим ледником ведется с конца 1890-х гг. [Перетолчин, 1908]. В наших исследованиях он является некоторой вехой для сравнения динамики с другими ледниками трансекта. К сожалению, как и для многих районов оледенения, не удалось найти данные на 1980-е гг. В последнее время он равномерно, но незначительно сокращается. За 120 лет площадь его открытой части уменьшилась более чем в 2 раза, происходит активное бронирование нижней части языка ледника. Ледник Топографов (№ 18) в Восточном Саяне более устойчив, но также равномерно сокращается. Хорошо просматривается 10–11-летний цикл замедления сокращения. Ближе к центральной и южной части трансекта сильнее проявляются циклы не только сокращения и замедления уменьшения площади, но даже и ее увеличения. Это хорошо заметно на леднике Цаст-Ула в Монгольском Алтае. Если к 2005 г. у северных ледников площадь заметно сокращалась, то у ледников центральной части трансекта она даже возрастала, что отмечается на леднике Карлыктаг Восточного Тянь-Шаня. Ледник Алтынтаг в хребте Куньлунь равномерно сокращается с 1995 г. Самое нестабильное состояние наблюдается у ледника Юбра в горах Лангтанг центральной части Непальских Гималаев.

Скорость и степень сокращения ледников с 1970-х гг. по настоящее время представлена в табл. 2. Скорость сокращения увеличивается от северного края трансекта к южному. Наибольшее уменьшение открытой части отмечается у ледника Цаст-Ула Монгольского Алтая. Повышенную устойчивость проявили ледники Черского и Топографов северной части трансекта.

Табл. 2. Степень и скорость сокращения ледников трансекта
Table 2. Size and rate of glacier area decrease

Название ледника	Средняя скорость уменьшения, км ² /год	Сокращение, %
Азаровой	0,007	37
Урёл-Амутис	0,005	59
Черского	0,002	17
Перетолчина	0,012	48
Топографов	0,004	18
Цаст-Ула	0,056	63
Алтынтаг	0,013	21
Карлыктаг	0,073	21
Юбра	0,085	33

По данным международных БД ледник, к примеру, Перетолчина имел площадь 0,21 км² (GLIMS, 2002 г.), 0,28 (GAMDAM, 2007 г.), 0,24 (ИГ РАН, 2019 г.). Данные БД ИГ РАН [Хромова и др., 2021] близки к нашим результатам, но данные GLIMS и GAMDAM получены автоматическим методом и поэтому занижены. Подобный эффект отмечается в специальных исследованиях [Nuimura et al., 2015; Paul et al., 2017].

ВЫВОДЫ

В результате ГИС-анализа данных ДЗЗ Landsat выявлены общие тенденции изменения открытой части ледников в горных хребтах трансекта от хребта Кодар до Гималаев. Анализ данных с 5-летним интервалом позволяет выявить общие тенденции и особенности отдельных ледников. Однако анализ по ежегодным данным может выявить характерные аномалии поведения ледников [Китов и др., 2019]. Рассматриваемые ледники в хребтах трансекта сокращаются, но с различной скоростью. Несомненно, абсолютные величины изменения больших ледника превышают аналогичные величины изменения малых ледников северной части трансекта. Отмеченные периоды некоторого увеличения открытой части ледника по величине укладываются в диапазон ошибок и говорят лишь о тенденции замедления сокращения ледников.

В докладе по климату [IPCC, 2007, 2021] 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 г. по сравнению с предыдущими десятилетиями наблюдения. Эта закономерность подтвердилась на ледниках Кодара, Восточных Саян и южной части трансекта. Однако в Байкальском и Баргузинском хребтах ледники почти не уменьшались по открытой части своей площади.

С продвижением от северного края трансекта к южному скорость сокращения ледников увеличивается от 0,007 до 0,085 км²/год. В процентном сокращении ледников от первоначального размера аналогичной зависимости не прослеживается. Но все же у большинства рассматриваемых ледников скорость уменьшения открытой части замедляется.

Наименее достоверны результаты, полученные по топокартам, с одной стороны, из-за разномасштабности, с другой — из-за неточности и генерализации нанесения границ ледников. С середины 1970-х, когда началась съемка спутником Landsat, до наших дней ледники сократились по площади от 17 до 63 %. Но данные до 1980-х гг. были плохого качества и с низким разрешением, что не позволило определить площадь ледников с достаточной точностью. Можно говорить о замедлении и увеличении скорости сокращения ледников, даже если количественно показано некоторое увеличение площади, находящееся в пределах ошибки. Ледники северной части трансекта сокращаются более плавно по сравнению с южной. В южной части наблюдается сокращение и замедление, а иногда и увеличение открытой части ледников примерно с периодичностью 10 лет. Наиболее неравномерная динамика у Гималайского ледника. Скорость сокращения ледников уменьшается с юга к северу трансекта. Ледник Азаровой сокращается со скоростью 0,007 км²/год, Урёл-Амутис — 0,005, Черского — 0,002, Перетолчина — 0,012, Топографов — 0,002, Цаст-Ула — 0,056, Алтынтаг — 0,013, Карлыктаг — 0,07, Юбра — 0,085.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет средств государственного задания (№ госрегистрации темы: АААА-А21-121012190056-4 и АААА-А21-121012190017-5).

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out at the expense of the state task (subject No. AAAA-A21-121012190056-4 and AAAA-A21-121012190017-5).

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.: Гидрометеиздат, 1973. 64 с.
- Каталог ледников СССР. Т. 17. Вып. 2. Ч. 1. Хребет Кодар. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 44 с.
- Китов А. Д., Плюснин В. М., Биличенко И. Н.* Изменение ледников в Гималаях и Южной Сибири по данным Landsat. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2019. Т. 25. Ч. 2. С. 146–160. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-146-160.
- 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.
- Отгонбаяр Д.* Современное оледенение горного узла Цамбагарав (Монгольский Алтай). *Вестник Томского государственного университета*, 2011. № 348. С. 177–180.
- Перетолчин С. П.* Ледники хребта Мунку-Сардык. *Известия Томского технического института*. Томск: Типолитография Сибирского товарищества печатного дела, 1908. Т. 9. 60 с.
- Руководство по составлению Каталога ледников СССР. М.: Наука, 1967. 156 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.
- Vajracharya S. R., Mool P.* Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. *Annals of Glaciology*, 2009. V. 50. No. 53. P. 81–86.
- 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.
- Keiji H., Okitsugu W., Hiroji F., Shuhei T., Akio N.* Glaciers of Asia – Glaciers of Nepal – Glacier Distribution in the Nepal Himalaya with Comparisons to the Karakoram Range. *Satellite image atlas of glaciers of the World. Geological Survey Professional Paper 1386-F-6*, 2015. P. 293–320.

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. Iss. 3. 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., Bolch T., Briggs K., Käab 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: 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. GLIMS, 2010. 15 p. Web resource: http://www.glims.org/MapsAndDocsassets/GLIMS_Analysis_Tutorial_a4.pdf (accessed 10.03.24).

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: 10.5194/tc-13-2043-2019.

Shahgedanova M., Popovnin V., Aleinikov A., Stokes C. R. Geodetic mass balance of Asarova glacier Kodar mountains, Eastern Siberia and its links to observed climatic change. *Annals of Glaciology*, 2011. V. 52(58). P. 129–137.

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.

Wagnon P., Vincent C., Arnaud Y., Berthier E., Vuillermoz E., Gruber S., Ménégoz M., Gilbert A., Dumont M., Shea J. M., Stumm D., Pokhrel B. K. Seasonal and annual mass balances of Mera and Pokalde glaciers (Nepal Himalaya) since 2007. *The Cryosphere*, 2007. V. 7. P. 1769–1786. DOI: 10.5194/tc-7-1769-2013.

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

Bajracharya S. R., Mool P. Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. *Annals of Glaciology*, 2009. V. 50. No. 53. P. 81–86.

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. 17. Iss. 2. Part 1. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972. 44 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.

Guidelines for compiling the Catalogue of Glaciers of the USSR. Moscow: Nauka, 1967. 156 p. (in Russian).

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.

Keiji H., Okitsugu W., Hiroji F., Shuhei T., Akio N. Glaciers of Asia – Glaciers of Nepal – Glacier Distribution in the Nepal Himalaya with Comparisons to the Karakoram Range. *Satellite image atlas of glaciers of the World. Geological Survey Professional Paper 1386-F-6*, 2015. P. 293–320.

Khromova T. Y., Nosenko G. A., Glazovsky A. F., Muraviev A. Y., 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., Plyusnin V. M., Bilichenko I. N. Change of glaciers in the Himalayas and Southern Siberia according to Landsat. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference.* Moscow: Moscow University Press, 2019. V. 25. Part 2. P. 146–160 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-146-160.

Kotlyakov V. M., Chernova L. P., Muravyev 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. Iss. 3. 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.

Otgonbayar D. Modern glaciation of the Tsambagarav mountain junction (Mongolian Altai). *Tomsk State University Journal*, 2011. No. 348. P. 177–180 (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., Bolch T., Briggs K., Kääh 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: 10.1016/j.rse.2017.08.038.

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).

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. GLIMS, 2010. 15 p. Web resource: http://www.glims.org/MapsAndDocsassets/GLIMS_Analysis_Tutorial_a4.pdf (accessed 10.03.24).

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: 10.5194/tc-13-2043-2019.

Shahgedanova M., Popovnin V., Aleinikov A., Stokes C. R. Geodetic mass balance of Asarova glacier Kodar mountains, Eastern Siberia and its links to observed climatic change. *Annals of Glaciology*, 2011. V. 52(58). P. 129–137.

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.

Wagnon P., Vincent C., Arnaud Y., Berthier E., Vuillermoz E., Gruber S., Ménégoz M., Gilbert A., Dumont M., Shea J. M., Stumm D., Pokhrel B. K. Seasonal and annual mass balances of Mera and Pokalde glaciers (Nepal Himalaya) since 2007. *The Cryosphere*, 2007. V. 7. P. 1769–1786. DOI: 10.5194/tc-7-1769-2013.

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.

Vyacheslav A. Melkiy¹, Alexey A. Verkhoturov²

MAPPING OF FOREST DISTURBANCE FROM WINDS OF EXTRATROPICAL CYCLONES IN THE SOUTHERN PART OF SAKHALIN BY REMOTE SENSING DATA

ABSTRACT

Deforestation was named one of the global environmental problems by the close of the 20th century. Tropical cyclones, which operate in the Northern-West Pacific during the summer and autumn and sometimes go far north, transforming into extratropical cyclones, are the main cause of damage for forest areas in Southern Sakhalin. In central parts of tropical cyclones, during their maximum development, pressure reaches 895 mbar, stable winds arising in atmospheric vortex can have speed up to 50 m/s, and gusts have speed up to 78 m/s. Storm winds with gusts have speed over 35 m/s, which are capable of knocking down free-standing trees, as well as causing significant damage to the forests. In October 2015, in the southern-west part of Sakhalin during the passage of typhoon Choi-wan, significantly forested areas were disrupted by winds. The purpose of the work was to investigate the extent and nature of damage to the forest, caused by winds during passage of extratropical cyclones over territory of the South-West of Sakhalin Island. Images of the research area were classified by “with training” method. The training sample was made up of a set of pixels representing images of sample plots, where geobotanical research was performed. It was revealed that total area of windthrows in the territory of Kholmsky and Nevelsky districts in south-west part of Sakhalin Island was 22 735 ha. To analyze character of windblow damages in researched area, the Normalized Difference Vegetation Index was calculated and areas with varying degrees of damage were identified in terms of content of phytomass, presented in form of green trees and clumps, as well as preserved underscrub and undergrowth. At the same time, it was revealed that among the affected stands, one can distinguish completely dead (occupy 19.85 % of the territory), partially damaged (41.85 %) and slightly damaged (38.29 %). Mapping forest disturbance from winds by remote sensing data after passing over territory of tropical cyclones makes it possible to quickly assess the disaster scale, as well as adjust reforestation plans for the coming few years. If using geoinformation technologies for processing data, time of work is significantly reduced.

KEYWORDS: satellite imagery, mapping of forest, deforestation, extratropical cyclones, Normalized Difference Vegetation Index, geoinformation analysis

INTRODUCTION

Forests cover 31 % of the land on Earth. Deforestation by the close of the 20th century was called one of the global environmental problems that the earth civilization has to solve for the sake of its survival³. In order to save the life of all the biodiversity of living beings on the planet, it is

¹ Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the 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, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Geochemistry and Regional Geology, 1B, Nauki str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, *e-mail: ussr-91@mail.ru*

³ Deforestation and Forest Degradation (2022). World Wildlife Fund. Web resource: <https://www.worldwildlife.org/threats/deforestation> (accessed 25.02.2024)

necessary to move towards the implementation of a sustainable development strategy [Ursul, Romanovich, 2001; Kasimov, Mazurov, 2007; Gosteva, 2010]. In accordance with main principles of the strategy¹, the main provisions of sustainable forest management have been formed, aimed at following guidelines: conservation of forest cover with improved productivity of forest stands, ensuring the sanitary condition and viability of forests, preserving biodiversity, strengthening the role of forest vegetation in regulating the carbon balance of the territory, increasing the socio-economic significance of forest management².

Deforestation occurs as result of industrial felling without reforestation, burning-out of forest areas for farmland and natural causes, such as forest fires, windfalls during passing over territory of atmospheric vortices (hurricanes, typhoons), forest diseases, and climate change [Shvidenko, Nilsson, 2003]. In connection with the cessation of logging in industrial scale on Sakhalin, the disturbance of forests occurs mainly under the influence of forest fires and strong typhoons that come to the Island from South.

Typhoons are atmospheric eddies, a type of tropical cyclones, passing from May to November (other months are not excluded) over the North-West part of the Pacific Ocean [Prokh, 1983]. The pressure drops in the central part of some cyclones reached 895 mbar. The passage of typhoons over the coasts and islands of the eastern margin of Eurasia is accompanied by strong gusty winds and a large amount of precipitation. When cyclones move to latitudes of 30–45°, they turn from tropical to extratropical cyclones, which are characterized by a decrease in wind speed and precipitation, which is well studied on the example of North Atlantic hurricanes [Hart, Evans, 2001; Leonardo, Colle, 2020]. Extratropical cyclones with hurricane winds pass over the territory of Far Eastern outskirts of Russia and adjacent islands: Emma in September 1956, Nancy in September 1961, Irving in August 1979, Phyllis in August 1981, Judy in July 1989, Melissa in September 1994, Talas in September 2011, Bolaven in August–September 2012, Halong in July 2014, Lionrock in August–September 2016^{3,4,5} (Table 1).

Often, under the influence of strong winds, not only individual trees, but also entire forests are damaged or even die [Grace, 1988; Everham, Brokaw, 1996; Mitchell, 2013]. Large-scale windfalls in boreal forests under the influence of extratropical cyclones occur much less frequently than in tropical ones [Korzniakov et al., 2019; Vozmishcheva et al., 2019]. There is evidence of medium-scale forest disturbance on Sakhalin caused by high winds in past decades [Bratkov et al., 2020; Sabirov et al., 2021].

In the first ten days of October 2015, forests of southern-west part of Sakhalin Island (Kholmsky and Nevelsky districts) were disturbed on large area by strong winds during passage of Typhoon Choi-van. The purpose of this work was to research the degree and character of forest damages under exposure of strong winds.

¹ Rio Declaration on Environment and Development. Report of the United Nations Conference on Environment and Development (Rio de Janeiro, 3-14 June 1992) A/CONF.151/26 (V. I) United Nations. General Assembly. 12 August 1992. Web resource: <http://www.un.org/documents/ga/conf151/aconf15126-1annex1.htm> (accessed 25.02. 2024)

² National Security Strategy of the Russian Federation until 2020. Approved by Decree of the President of the Russian Federation of May 12, 2009. No. 537. Collection of Legislation of the Russian Federation 20, Art. 2444. Web resource: <http://www.scrf.gov.ru/documents/-99.html>. (accessed 25.02.2024)

³ Worldwide Tropical Cyclone Centers. National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center National Oceanic and Atmospheric Administration. Web resource: <https://www.nhc.noaa.gov/aboutsmc.shtml> (accessed 25.02.2024)

⁴ Digital Typhoon. Website National Institute of Informatics (NII). Web resource: <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/summary/wnp/s/202122.html.en> (accessed 25.02.2024)

⁵ Tropical cyclones in 2015. Website360wiki.ru Web resource: https://360wiki.ru/wiki/Tropical_cyclones_in_2015#October (accessed 25.02.2024)

Table 1. Main characteristics of strong Pacific tropical cyclones that passed over Russian Far East territory

Typhoon name	Dates	Category SSHWS*	Pressure in center, GPa (mbar)	Steady wind speed, m/s	Wind gust speed, m/s (km/h)
Kitty	27.08–02.09.1949	3	952	35–40	57 (205)
Emma	01–11.09.1956	4	930	35–40	69 (248)
Nancy (Muroto)	07–22.09.1961	5	882	55–65	95 (345)
Elsie (Narsing)	16–28.09.1969	5	895	45–50	78 (280)
Irving	07–18.08.1979	2	955	25–30	42 (150)
Phyllis	02–05.08.1981	Tropical storm	975	25–30	38 (136)
Judy	21–26.07.1989	4	910	35–43	57 (205)
Melissa	11–19.09.1994	4	910	35–43	57 (205)
Talas	23.08–07.09.2011	Tropical storm	970	22–27	40 (144)
Bolaven	19.08–01.09.2012	4	910	45–51	63 (230)
Halong	28.07–15.08.2014	5	915	45–55	72 (260)
Choi-wan	01–10.10.2015	Tropical storm	965	25–31	36 (130)
Lionrock	16–31.08.2016	4	940	35–46	60 (215)
Talim	08–22.09.2017	4	935	45–49	61 (230)

*SSHWS — Saffir–Simpson hurricane wind scale

RESEARCH MATERIALS AND METHODS

Available images from the Sentinel-2 spacecraft taken in period from 2016 to 2017 were used as materials for identifying windfall glades¹. We selected images that were taken in the summer (July–August) and with a minimum number of clouds after atmospheric corrections [Moravec et al., 2021].

Immensity of windblows was determined by synthesized images in combination of channels 11-8-4 with the use of classification procedure “with training” [Buchnev, Pyatkin, 2017]. The training sample was composed of a set of pixels representing the image of reference areas where geobotanical descriptions were performed.

To analyze the nature of windfall damage in the study area, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was calculated and areas with varying degrees of damage were identified [Cherepanov, Druzhinina, 2009; Cherepanov, 2011]:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1).$$

RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

Field work research of windblow sites in Nevelsk and Kholmsk districts revealed large disturbances mainly in dark coniferous forests, where forest stands are formed mainly by Sakhalin fir (*Abies sachalinensis* (F. Schmidt) Mast.) and Jezo spruce (*Picea jezoensis* (Siebold & Zucc.) Satyoge). Significantly less damage was observed in forests, formed by deciduous trees (*Betula ermanii*, Mongolian oak (*Quercus mongolica*), Mayra maple (*Acer mayrii*)) [Melkiy et al., 2023].

The difference between forest-covered and unforested territories has pronounced character, so their separation during satellite image interpretation does not cause any difficulties. Windblows, as well as burned and felled forest areas, are displayed on images in reddish and bluish color. At the same time, clearings are distinguished by more or less geometrically regular boundaries,

¹ Sentinel Missions. Website ESA (European Space Agency). Web resource: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (accessed 25.02.2024)

indicating their artificial origin. On the images of cuttings, clumps are clearly visible, and on high-resolution images there are also individual trees and their small groups left during cuttings. In the burnt areas, in most cases, single trees and curtains are also dispersed in disorder over the territory. Dead trees are clearly visible on the windblows in the form of strokes oriented in one direction, which stand out well on high-resolution images.

During the interpretation of space images, it was revealed that the total area of windblows is 22 735 ha (6.29 % of the study area). In analyzing data of the training sample on the scatter diagrams, the sections of windblows were quite well separated from other classes in terms of spectral characteristics. However, it should be noted that spectral characteristics of windblows show great similarity with territories, which have open soils, as well as residential areas. In this respect, they were previously identified and excluded from consideration.

An analysis of the results of interpretation of windblows showed that the transformation of forests in damaged areas can be of a different nature. The forest on the periphery of windbreak spots, in areas with local relief depressions, can be damaged less: surviving trees and curtains are clearly visible. Around the other groups of trees, as a rule, there is undergrowth, which, soon after being damaged by a cyclone, begins to actively grow and distribute seeds, contributing to the rapid overgrowth of the site. However, often in the southwestern part of Sakhalin, areas with destroyed forest vegetation were inhabited by bamboo.

The research of the spatial distribution of NDVI values within the areas with the development of windblows made it possible to identify the difference in the spectral characteristics in RED and NIR, reflecting the different nature of damage to forest stands. The results of geoinformation analysis of forest damage are summarized in the table 2 below.

Table 2. The character disturbance of timber standing in southern-west part of Sakhalin Island

Character of damage to piece of forest	NDVI value	Share of occupied area, ha	Share of occupied area, %
Completely damaged (> 70 % of trees)	< 0.5	4 513.6	19.85
Partially damaged (70–30 % of trees)	0.5–0.6	9 515.29	41.85
Slightly damaged (< 30 % of trees)	> 0.6	8 705.95	38.29

Windfall-disturbance areas in the southwestern part of Sakhalin Island are highlighted on the map (Fig. 1).

The use of Earth remote sensing data in mapping disturbance to forest tracts by winds during the passage of tropical cyclones makes it possible to quickly assess the scale of a disaster using geoinformation technologies [Verkhoturov, Melkiy, 2020].

Reforestation work on the island is planned by the Ministry of Forestry and Hunting of Sakhalin Region. The work is carried out by forest ranger stations, which are branches of the Sakhalin Forestry State Institution, established by order of Government of the Sakhalin Region No. 956-p., dated December 23, 2010. A significant contribution to reforestation activities is made by tenants of forest plots who harvest timber¹.

Information about forest areas disturbance by tropical winds should be used in planning reforestation, it is necessary to adjust the plans drawn up taking into account changes in areas exposed to strong winds.

¹ Reforestation. Official website of the Agency for Forestry and Hunting of the Sakhalin Region. Web resource: <https://hcvf.ru/ru/maps/hcvf-sakhalin> (accessed 25.02.2024)

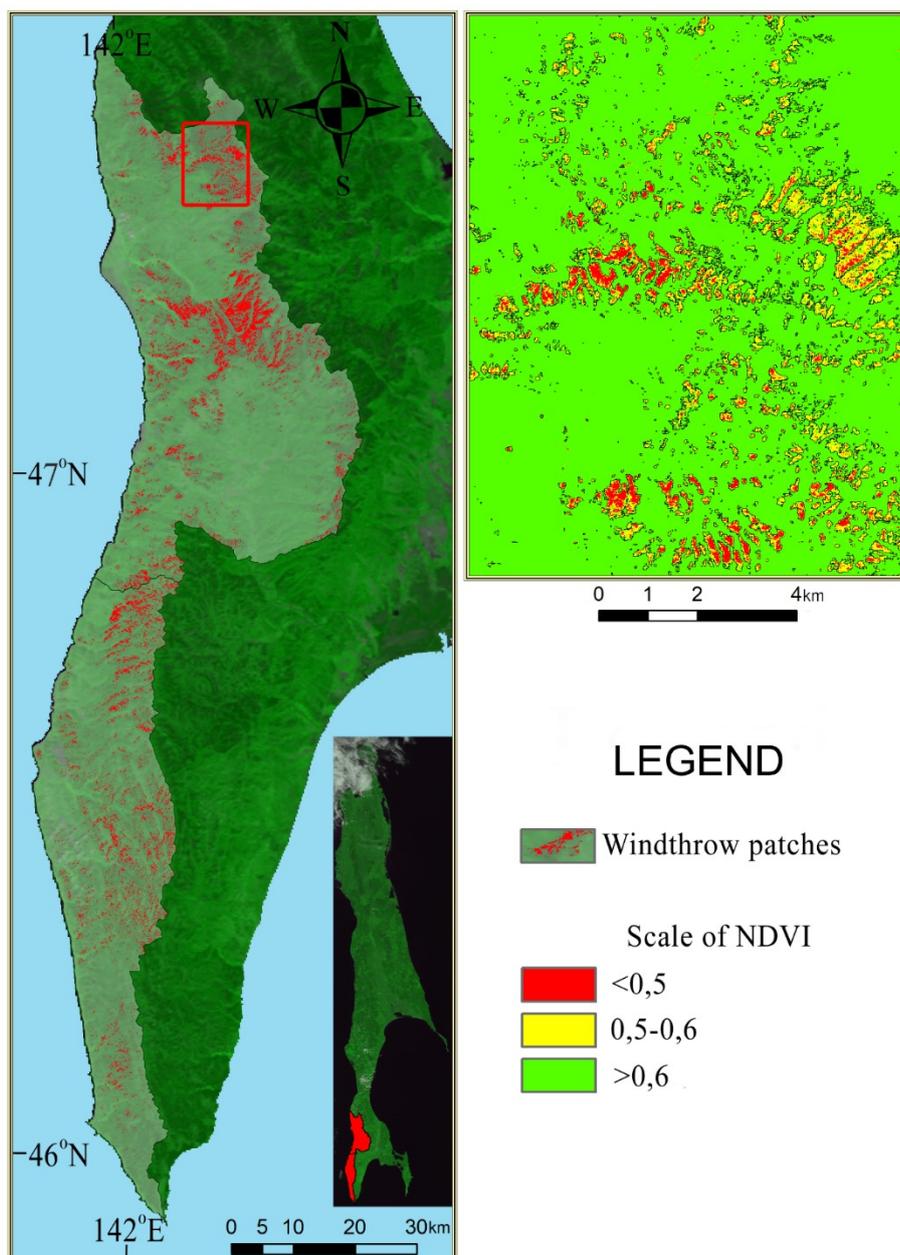


Fig. 1. Damage to a stand in southwestern Sakhalin Island (a) as identified by a “trained” classification (b) and according to NDVI values (c)

The research of windblows formed as a result of the passage such as Typhoon Choi-van in 2015, was carried out earlier by other researchers [Everham, Brokaw, 1996; Korznikov et al., 2019; Vozmishcheva et al., 2019]. Based on remote sensing data, areas of disturbance forests were identified. In an article published on the basis of the research, it was indicated that violation of forest vegetation on Sakhalin on such a large scale was described for the first time. However, we found that large windfall phenomena had been observed on the island earlier. Thus, as a result of the passage of Typhoon Nancy in 1961 on the southwestern slopes of the East Sakhalin Range, significant disturbance to forests was recorded on an area of 8 909 ha.

During 1964–1966, timber was harvested by logging station “Vetrovalny” of the Pervomaisky timber industry enterprise. In 1966, after the loss of commercial quality of wood,

caused by the development of saprophytic fungi, the harvesting was stopped. It should be noted that using windblown timber was a positive example of the rational use of forest resources, which, unfortunately, has not found application at the present time. Thousands of hectares of fallen forest not only are not used, but also serve as a source of insect pests.

As a result of the research, we found that damage to the forest cover may be of a different nature: completely disturbance, partially disturbance and slightly disturbance. The degree of damage affects the value of the vegetation index.

As a successful example of the implementation of a geographic information system that allows integrating data on the state of forest cover from various sources and using them in assessing the extent of forest disturbance and planning reforestation activities, one can name the system developed by WWF Russia in partnership with FSC Russia.

The information system given as an example contains information on forests of high conservation value, however, when searching for disturbance in the forests of southern Sakhalin, inaccuracies were found on the site, in particular, the species composition of forest stands was determined incorrectly over most of the territory, and the locations of deforested areas were incorrectly indicated.

The management of the forestry sector can be focused on forest management in accordance with the best world standards. At the same time, in order to organize appropriate management and monitoring, it is necessary to use the information obtained from the interpretation of medium and high-resolution images, and, if necessary, for research forests in detail, take surveys from unmanned aerial vehicles.

CONCLUSIONS

The study showed that forest vegetation in the Kholmsky and Nevelsky districts in the southwestern part of Sakhalin Island was severely damaged by storm winds during the passage of Typhoon Choi-van in the first decade of October 2015. The area of windblows was 22 735 ha. When studying the spectral characteristics of the surface in satellite images, areas with different content of phytomass, reflected by NDVI values, were identified by degree of damage, presented in form of green trees and clumps, as well as preserved undergrowth and undergrowth. At the same time, it was found that among the affected stands, one can single out completely dead (occupy 19.85 % of the territory), partially damaged (41.85 %) and slightly damaged (38.29 %).

REFERENCES

- Bratkov V.V., Vorobyov V.A., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A.* Mapping the dynamics of plant communities in the northern boreal forests of Sakhalin Island based on earth remote sensing data. Monitoring. Science and technologies, 2020. V. 3 (45). P. 6–13 (in Russian). DOI: 10.25714/MNT.2020.45.001.
- Buchnev A.A., Pyatkin V.P.* Classification with training of hyperspectral earth remote sensing data. Interexpo Geo-Siberia, 2017. V. 4. No. 2. P. 8–12 (in Russian).
- Cherepanov A.S.* Vegetation indexes. Geomatics, 2011. No. 2. P. 98–102 (in Russian).
- Cherepanov A.S., Druzhinina E.G.* Spectral characteristics of vegetation and vegetation indexes. Geomatics, 2009. V. 3. P. 28–32 (in Russian).
- Everham E.M., Brokaw N.V.L.* Forest damage and recovery from catastrophic wind. The Botanical Review, 1996. V. 62. P. 113–185. DOI: 10.1007/BF02857920.
- Gosteva S.R.* Steady development and national safety. Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University, 2010. V. 7–9(30). P. 290–298 (in Russian).
- Grace J.* Plant response to wind. Agriculture, Ecosystems & Environment. Proceedings of an

International Symposium on Windbreak Technology, 23–27 June 1986, Lincoln, Nebraska, 1988. V. 22–23, P. 71–88. DOI: 10.1016/0167-8809(88)90008-4.

Hart R.E., Evans J. L. A climatology of the extra-tropical transition of Atlantic tropical cyclones. *Journal of Climate*, 2001. V. 14(4). P. 546–564. DOI: 10.1175/1520-0442(2001)014<0546:ACOTET>2.0.CO;2.

Kasimov N. S., Mazurov Yu. L. The concept of sustainable development and its derivatives: Student discourse. Moscow, Smolensk, Universum, 2007. 192 p. (in Russian).

Korznikov K. A., Kislov D. E., Belyaeva N. G. The first record of catastrophic windthrow in boreal forests of South Sakhalin and the South Kurils (Russia) during October 2015 tropical cyclones. *Botanica Pacifica. A journal of plant science and conservation*, 2019. V. 8(1). P. 31–38. DOI: 10.17581/bp.2019.08115.

Leonardo N. M., Colle B. A. An investigation of large along-track errors in extratropical transitioning North Atlantic tropical cyclones in the ECMWF ensemble. *Monthly Weather Review*, 2020. V. 148(1). P. 457–476. DOI: 10.1175/MWR-D-19-0044.1.

Melkiy V. A., Bratkov V. V., Chernyavka E. S., Verkhoturov A. A., Lisitsky D. V. Vegetation mapping of the southern part of the Sakhalin Island by data of decoding images of the Landsat Satellite System. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*, 2023. V. 28. No. 4. P. 94–106 (in Russian). DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-4-94-106.

Mitchell S. J. Wind as a natural disturbance agent in forests: a synthesis. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2013. V. 86(2). P. 147–157, DOI: 10.1093/FORESTRY/CPS058.

Moravec D., Komárek J., López-Cuervo Medina S., Molina I. Effect of atmospheric corrections on NDVI: Intercomparability of Landsat-8, Sentinel-2, and UAV sensors. *Remote Sensing*, 2021. V. 13. 3550. DOI: 10.3390/rs13183550.

Prokh L. Z. Dictionary of winds. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1983. 311 p. (in Russian).

Sabirov R. N., Melkiy V. A., Verkhoturov A. A. Analysis transformation of forests of the Southern Sakhalin by remote sensing data using geoinformation technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021. V. 806. DOI: 10.1088/1755-1315/806/1/012027.

Shvidenko A. Z., Nilsson S. Ecological problems of transition to sustainable forest management in Russia. *Sustainable Forest Management*, 2003. V. 1(1). P. 6–9 (in Russian).

Ursul A. D., Romanovich A. L. Security and sustainable development. Moscow: RAGS, 2001. 128 p. (in Russian).

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. Part 4. P. 60–72 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2020-4-26-60-72.

Vozmishcheva A. S., Korznikov K. A., Bondarchuk S. N., Gromyko M. N., Kislov D. E., Pimenova E. A., Salo M. A. Strong disturbance impact of tropical cyclone Lionrock 2016 on Korean pine-broadleaved forest in the Middle Sikhote-Alin mountain range. *Russian Far Eastern Forests*, 2019. V. 10(11). P. 1017 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.3390/fl0111017>.

А. О. Полетаев¹

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ДОЛИННО-РЕЧНЫХ ЛАНДШАФТОВ

АННОТАЦИЯ

В данной статье описываются возможности использования вегетационного индекса *Chlorophyll vegetation index* (CVI) для детектирования растительности пойменных участков рек, обладающей значительным потенциалом для секвестрации и длительного связывания углерода (диоксида углерода). Растры индекса CVI рассчитаны на основе спутниковых снимков Landsat-8–9 OLI/TIRS C2 L2, полученных в течение вегетационного периода в 2020–2023 гг. (апрель–август). На основании набора растровых данных индекса CVI рассчитаны растры разности между растрами индекса CVI и выявлены ареалы увеличения и уменьшения индекса CVI на ключевой территории, расположенной в долинах рр. Северский Донец и Нежеголь (бассейн р. Дон). Совмещение ландшафтной карты и растра разности между растрами CVI позволило выявить ареалы болотнотравно-осоковых лугов, на которых с начала мая к началу июля 2022 г. снизилось содержание хлорофилла. Анализ соотношения площадей величин растров разности между растрами CVI показал (согласно данным для вегетационных периодов 2020–2023 гг.), что величина, равная 1, находится в пределах 1,6–53,6 % от площади всей ключевой территории и приходится на болотнотравно-осоковые луга, злаково-разнотравные луга, осоково-камышовые заболоченные луга и болота, пойменные леса с преобладанием ивы и черной ольхи. Величина, равная 0, находится в пределах 46,4–98,3 % от всей площади и приходится на болотнотравно-осоковые луга, злаково-разнотравные луга, сосновые насаждения, осоково-камышовые заболоченные луга и болота, пойменные леса с преобладанием ивы и черной ольхи. Величина, равная –1, находится в пределах 0–17,6 % от всей площади и приходится на болотнотравно-осоковые луга, злаково-разнотравные луга, осоково-камышовые заболоченные луга и болота. Для территорий, на которых усредненное значение индекса CVI менее или равно 1, преобладающим типом растительности являются сосновые насаждения. Для территорий, где усредненное значение индекса CVI в пределах 1,1–1,5, преобладает луговая растительность. На территориях, где усредненное значение индекса CVI составляет более 1,5, наибольшую площадь занимают пойменные леса с преобладанием ивы и черной ольхи. Совместное использование данных, полученных в ходе ландшафтных исследований, и результатов анализа изменения вегетационных индексов позволяет получить новую информацию для принятия решений по рациональной организации природопользования в пределах долинно-речных ландшафтов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вегетационный индекс, вегетационный индекс хлорофилла, речная долина, пойменные ландшафты, бассейн р. Дон

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Институт наук о Земле, ул. Победы, д. 85, Белгород, Россия, 308015, e-mail: poletaev@bsu.edu.ru

Arseniy O. Poletaev¹

FEATURES OF SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF PHOTOSYNTHETIC ACTIVITY OF VEGETATION IN VALLEY-RIVER LANDSCAPES

ABSTRACT

The article describes the possibilities of using the Chlorophyll vegetation index (CVI) to detect vegetation in floodplain areas of rivers, which have significant potential for sequestration and long-term sequestration of carbon (carbon dioxide). CVI index rasters are calculated based on Landsat-8–9 OLI/TIRS C2 L2 satellite images obtained during the vegetative season in 2020–2023 (April–August). Based on a set of raster data of the CVI index, rasters of the difference between rasters of the CVI index were calculated and areas of increase and decrease in the CVI index were identified in the key area located in the valleys of the Seversky Donets and the Nezhegol rivers (Don River basin). Combining the landscape map and the raster of the difference between the CVI rasters made it possible to identify areas of marsh-grass-sedge meadows, where the chlorophyll content decreased from the beginning of May to the beginning of July 2022. An analysis of the ratio of the areas of the difference raster values between the CVI rasters showed (according to data for the growing seasons 2020–2023) that a value equal to 1 is in the range of 1.6–53.6 % of the area of the entire key territory and falls on the marsh-grass-sedge meadows, grass-forb meadows, sedge-reed marshy meadows and swamps, floodplain forests with domination of willow and black alder. A value equal to 0 is in the range of 46.4–98.3 % of the total area and falls on marsh-grass-sedge meadows, grass-forb meadows, pine plantations, sedge-reed marshy meadows and swamps, floodplain forests with domination of willow and black alder. The value equal to –1 is in the range of 0–17.6 % of the entire area and falls on marsh-grass-sedge meadows, grass-forb meadows, sedge-reed marshy meadows and swamps. For territories where the average value of the CVI index is less than or equal to 1, the predominant type of vegetation is pine plantations. For territories where the average value of the CVI index is within 1.1–1.5, meadow vegetation predominates. In areas where the average value of the CVI index is more than 1.5, the largest area is occupied by floodplain forests with domination of willow and black alder. The joint use of data obtained during landscape research and the results of analysis of changes in vegetation indices allows us to obtain new information for making decisions on the rational organization of environmental management within valley-river landscapes.

KEYWORDS: vegetation index, chlorophyll vegetation index, river valley, floodplain landscapes, Don River basin

ВВЕДЕНИЕ

Вегетационные индексы являются количественными показателями состояния растительности. На данный момент разработано более 500 различных вегетационных индексов, полный перечень которых представлен на ресурсе *Index DataBase*² с указанием формул для их расчета. Достаточно широко они применяются в сельском хозяйстве, позволяя выявлять особенности растительного покрова как пахотных, так и залежных земель [Терехин, 2021]. Вегетационные индексы позволяют анализировать изменения растительности, вызванные климатическими условиями, а также засухой, пожарами и другими факторами [Рыгалова, Плуталова, 2021; Высоцкая, Медведков, 2022; Avetisyan et al., 2023; Zhu et al., 2024]. Таким

¹ Belgorod National Research University, Institute of Earth Sciences, 85, Pobedy str., Belgorod, 308015, Russia, e-mail: poletaev@bsu.edu.ru

² Index DataBase. Электронный ресурс: <https://www.indexdatabase.de/db/i.php?offset=1> (дата обращения 01.04.2024)

образом обеспечивается мониторинг физиологического состояния растений, детектирование ареалов с недостатком или переизбытком увлажнения.

Вегетационные индексы позволяют детектировать участки растительности, обладающие высокими запасами хлорофилла и высокой фотосинтетической активностью, либо, наоборот, с дефицитом хлорофилла и низкой фотосинтетической активностью, в поймах равнинных рек, где присутствуют леса, луга, болота — различные типы растительных сообществ, которые обладают определенными запасами хлорофилла в растительной массе. Исследование растительности речных пойм, их динамики в течение вегетационного периода [Курганович, Голятина, 2015] позволяет детально оценить динамику водного баланса территории, а с помощью спектральных индексов, чувствительных к растительности и к водной компоненте, могут быть определены границы территорий, подверженных затоплению [Chandrasekar et al., 2010], что может представлять интерес при определении границ зон затопления [Полемаев, 2023; Lisetskii et al., 2022;] и выделении экотонных систем типа «вода–суша» [Кутузов, 2011]. Кроме этого, вегетационные индексы позволяют количественно оценивать величину и продолжительность реакции пойменной растительности на наводнение [Sims, Colloff, 2012]. Важное значение имеют аэрофотоснимки, полученные с помощью БПЛА [Домнина и др., 2017; Van Iersel et al., 2018], а также информация с компактного бортового спектрографического сканера (CASI) и лидара (LiDAR) [Geerling et al., 2007], т. к. их использование позволяет проводить высокоточную классификацию типов растительности речных пойм и создавать детальные карты. Использование вегетационных индексов также имеет потенциал при изучении загрязнения тяжелыми металлами пойменных почв, т. к. выявляется взаимосвязь между отражательной способностью растительности и загрязнением почвы тяжелыми металлами, зависящая от вида растений [Kooistra et al., 2004].

Согласно программе «Развитие водного и лесного хозяйства Белгородской области», рассчитанной на 2022–2025 гг., осуществляется масштабная работа по расчистке водных объектов, включая русла рек. При этом проводится изъятие жесткой водной растительности с их корневой системой в составе донных отложений, что сопровождается неизбежными нарушениями почвенно-растительного покрова в прибрежных защитных полосах. В то же время современные подходы к эколого-ландшафтному обустройству земель, прилегающих к гидрографической сети, предполагают не только лесомелиоративное закрепление прибрежных полос и водоохраных зон [Marinina et al., 2016], но и решение новых задач, связанных с культивированием быстрорастущих древесных пород для секвестрации и длительного связывания диоксида углерода.

В настоящее время при реализации стратегии низкоуглеродного развития особый интерес представляет изучение динамики изменения вегетационных индексов наряду с полевыми геоботаническими и ландшафтными описаниями [Poletaev, Lisetskii, 2024] с целью выявления вклада в депонирование углерода отдельных ландшафтных выделов, расположенных в пойменных участках рек.

Цель данного исследования заключалась в изучении потенциала растительности пойменных участков долинно-речных ландшафтов для секвестрации и длительного связывания диоксида углерода.

Район исследования

Территория района исследований расположена в Шебекинском районе, где экспликация ландшафтов следующая (доля площади в % от площади района) [Юдина, 2013]:

- водная поверхность — 1,24;
- территория без водной поверхности — 98,76;
 - а) плакорный тип местности — 24,48;

- b) склоновый тип местности — 46,71;
- c) надпойменно-террасовый тип местности — 15,54;
- d) пойменный тип местности — 12,03.

Для плакорного типа местности типичны выпуклые поверхности с уклонами до 3°; характерными урочищами являются плакорные дубравы на серых лесных почвах, покрывающие водоразделы в бассейне р. Нежеголь. Широко распространен надпойменно-террасовый тип местности, а ширина террас Северского Донца между Нижней Таволжанкой и Белгородом составляет 5–6 км. Сосновые насаждения — наиболее распространенные урочища первой надпойменной террасы. Пойменный тип местности достаточно хорошо развит в долине Северского Донца и характеризуется наличием низинных болот, поросших осоками, озерным камышом, узколиственным рогозом. Наиболее развит приречный тип местности, где преобладающий тип урочищ — балки со склоновыми и донными оврагами, байрачными дубравами, обнаженными меловыми склонами, где иногда сохранились уникальные меловые боры.

Ключевая территория (рис. 1), общая площадь которой составляет около 233 га, большей частью расположена в долине р. Северский Донец, где в 97 км от его истока находится устье его притока р. Нежеголь (длина 75 км) (северная часть ключевой территории). Территория входит в состав Осколо-Донецкого физико-географического района подзоны типичной лесостепи (600 мм осадков в год, среднегодовая температура 7,7 °С).

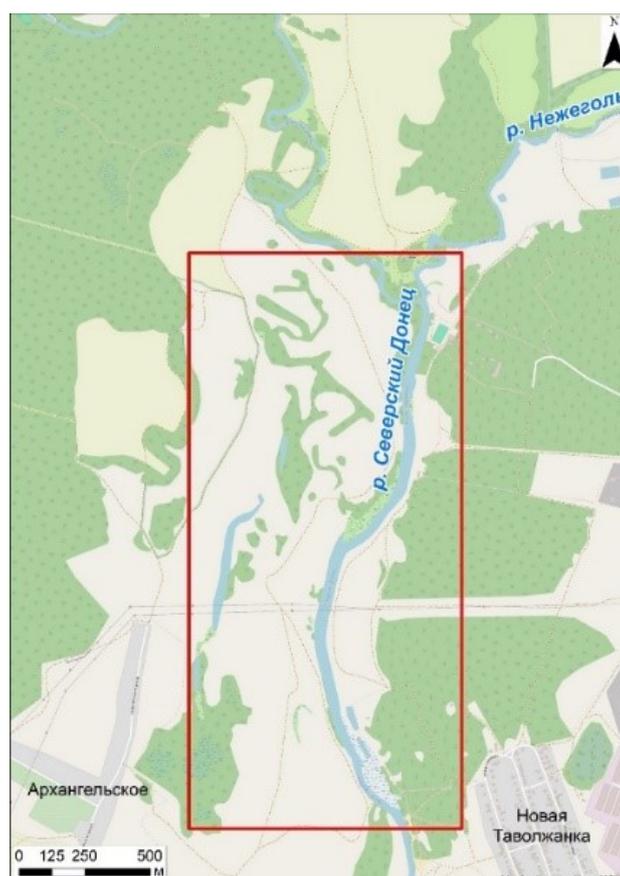


Рис. 1. Карта-схема границ ключевой территории
(координаты: 50°22'10.58" с.ш., 36°48'8.15" в.д.)
Fig. 1. Schematic map of the boundaries of the key territory
(coordinates: 50°22'10.58" N, 36°48'8.15" E)

Ландшафты ключевой территории являются природно-антропогенными, т. к. наряду с особо охраняемыми категориями земель и зонами с особыми условиями использования территорий на ключевой территории представлены зоны рекреационного назначения и сельскохозяйственные зоны. Это показано на карте градостроительного зонирования Шебекинского городского округа¹. В целом, ключевая территория расположена в зоне умеренной антропогенной нагрузки, согласно карте распределения антропогенной нагрузки на территории Белгородской области². Учитывая это, природно-антропогенные ландшафты, расположенные в пределах ключевой территории, относятся к группе вторично-производных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данном исследовании для изучения динамики фотосинтетической активности растительности в течение вегетационного периода в поймах рр. Северский Донец и Нежеголь был использован вегетационный индекс хлорофилла CVI (*chlorophyll vegetation index*), рассчитанный на основе спутниковых снимков Landsat-8–9 OLI/TIRS C2 L2. Для расчета индекса CVI на основе спутниковых снимков Landsat-8–9 используются следующие спектральные каналы: Band 3 Green (0.53–0.59 μm) 30 м, Band 4 Red (0.64–0.67 μm) 30 м, Band 5 Near-Infrared (0.85–0.88 μm) 30 м. Индекс CVI [Hunt et al., 2011; Vincini et al., 2016] используется в качестве средства оценки хлорофилла листа в масштабе кроны для всех классов наклона листа рассчитывается по формуле (1) для Landsat-8–9:

$$\text{CVI} = \text{Band5} \cdot \frac{\text{Band4}}{\text{Band3}^2} \quad (1)$$

Индекс CVI был рассчитан по спутниковым снимкам Landsat-8–9, полученным в течение вегетационного периода в 2020–2023 гг. (апрель–август). Полученный набор растровых данных индекса CVI послужил основанием для расчета растров разности, позволяющих выявлять ареалы увеличения и уменьшения индекса CVI на ключевой территории. На основании растров индекса CVI были также получены растры усредненных значений индекса CVI, которые стали основой для детального анализа с использованием ландшафтной карты м-ба 1: 10 000, составленной автором [Полемаев, 2023]. Для создания ландшафтной карты были использованы:

- государственная геологическая карта Российской Федерации м-ба 1: 200 000. Издание второе. Воронежская серия. Карта четвертичных образований М-37-ХІІІ (Белгород)³;
- почвенная карта м-ба 1: 10 000 колхоза «Заря» Шебекинского района Белгородской области, участок №4;
- ресурс Google Earth (космические снимки высокого разрешения), данные полевых наблюдений, данные литературных источников в рамках задачи по определению растительного покрова;
- топографическая карта м-ба 1: 10 000 и современный космический снимок высокого разрешения для определения и уточнения форм рельефа;
- ЦМР пространственного разрешения 30 м для определения крутизны склонов.

¹ Правила землепользования и застройки Шебекинского городского округа. Электронный ресурс: <https://fgistp.economy.gov.ru/lk/#/document-show/344152> (дата обращения 19.08.2024)

² Географический атлас Белгородской области: природа, общество, хозяйство. Распределение антропогенной нагрузки. Электронный ресурс: <https://geoportal.rgo.ru/record/5051> (дата обращения 19.08.2024)

³ М-37-ХІІІ (Белгород). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Издание второе. Серия Воронежская. Карта четвертичных образований. Электронный ресурс: <https://www.geokniga.org/maps/5764> (дата обращения 19.08.2024)

Алгоритм действий по выявлению пространственно-временных особенностей изменения фотосинтетической активности растительного покрова представлен на схеме (рис. 3), ландшафтная карта на ключевую территорию показана на рис. 2.

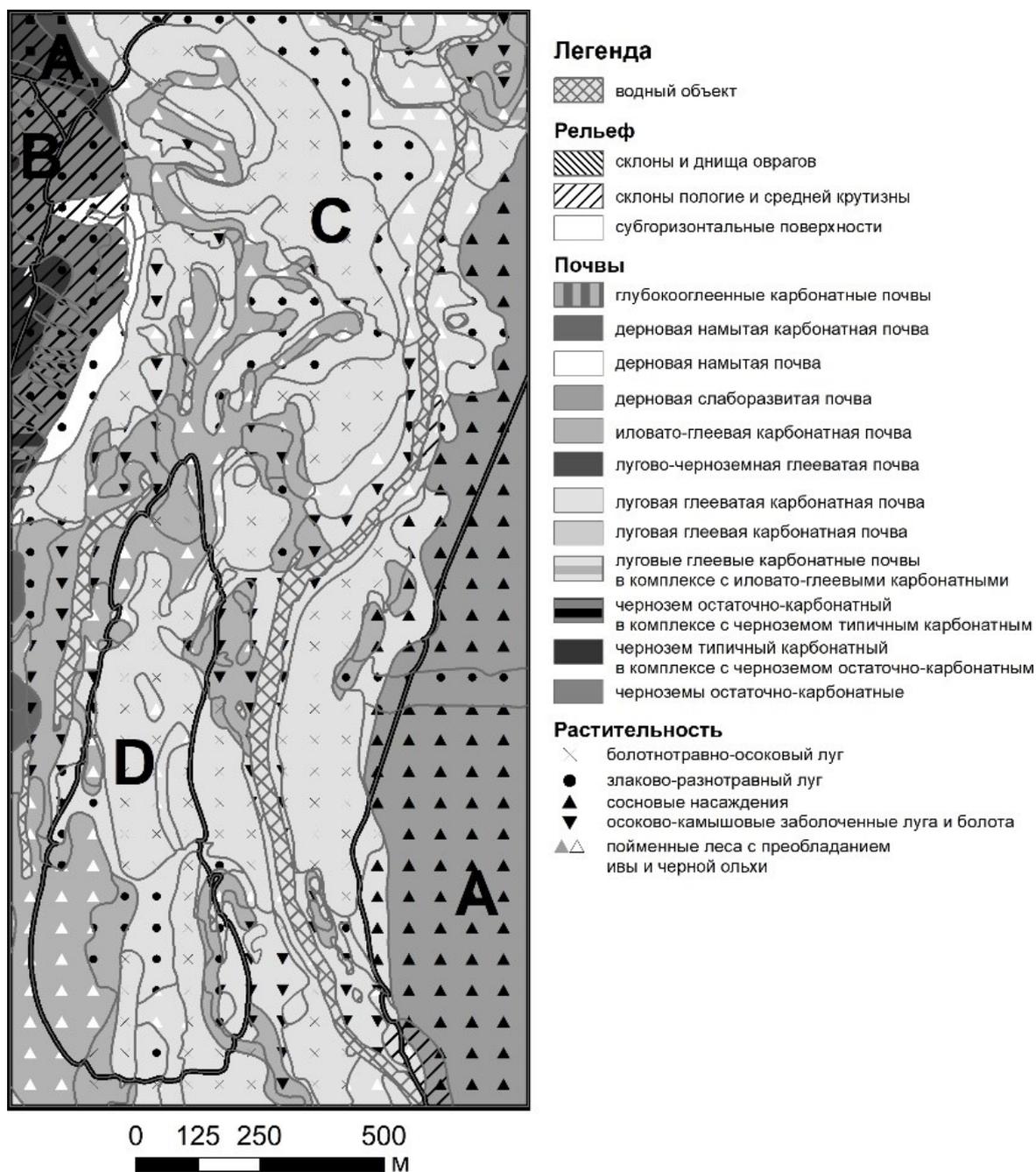


Рис. 2. Ландшафтная карта на ключевую территорию (составлена автором).
Природные комплексы: А — на аллювиальных отложениях первой надпойменной террасы,
В — на дочетвертичных отложениях, представленных мелями белыми, писчими,
С — на аллювиальных отложениях поймы, D — на болотных отложениях
Fig. 2. Landscape map of the key territory (compiled by the author). Natural complexes:
A — on alluvial deposits of the first terrace above the floodplain,
B — on pre-Quaternary deposits, represented by white chalks, writing chalks,
C — on alluvial deposits of the floodplain, D — on swamp deposits

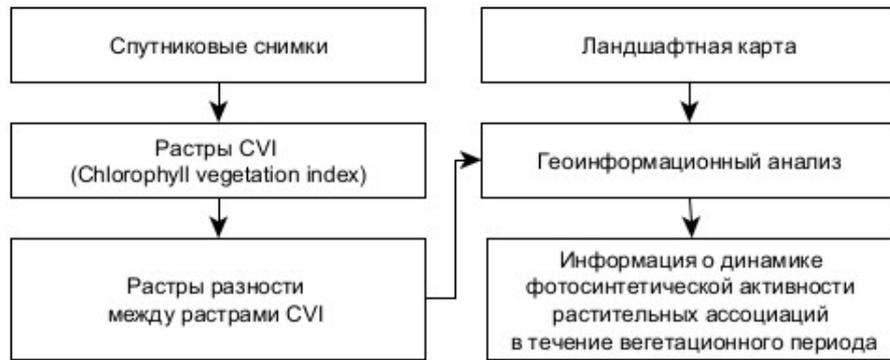


Рис. 3. Схема алгоритма действий по выявлению пространственно-временных особенностей изменения фотосинтетической активности растительного покрова
Fig. 3. Scheme of the algorithm of actions to identify spatiotemporal features of changes in the photosynthetic activity of vegetation

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные для ключевой территории растры индекса CVI и растры, показывающие величину разности между растрами CVI, представлены на рис. 4–7.

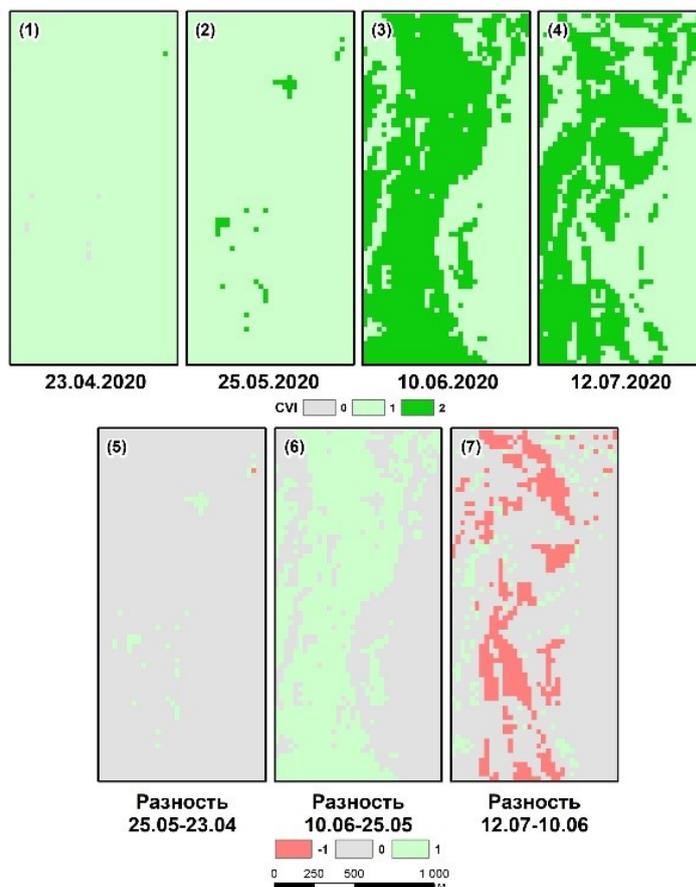
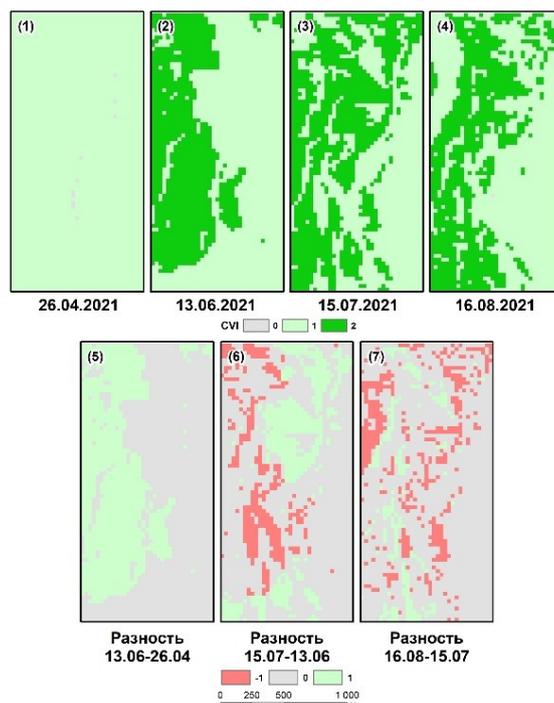
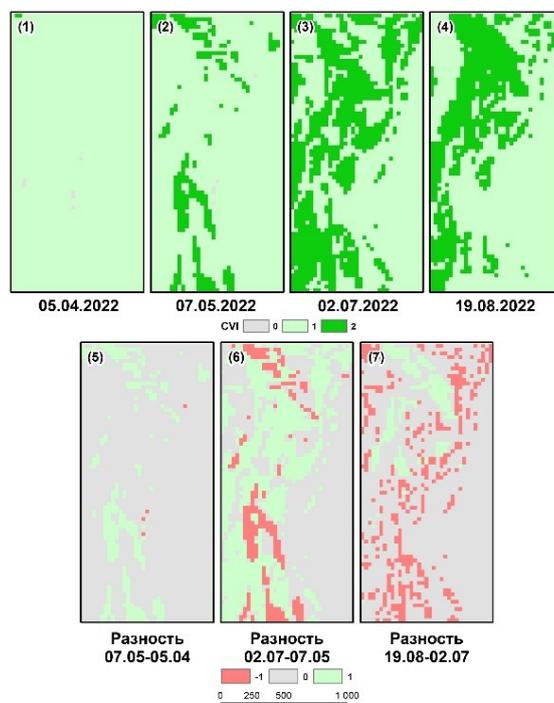


Рис. 4. Изменение индекса CVI за период с 23.04.2020 по 12.07.2020 и величина разности между растрами
Fig. 4. Change in the CVI index for the period from 23.04.2020 to 12.07.2020 and the magnitude of the difference between the rasters



*Рис. 5. Изменение индекса CVI за период с 26.04.2021 по 16.08.2021
и величина разности между растрами*
*Fig. 5. Change in the CVI index for the period from 26.04.2021 to 16.08.2021
and the magnitude of the difference between the rasters*



*Рис. 6. Изменение индекса CVI за период с 05.04.2022 по 19.08.2022
и величина разности между растрами*
*Fig. 6. Change in the CVI index for the period from 05.04.2022 to 19.08.2022
and the magnitude of the difference between the rasters*

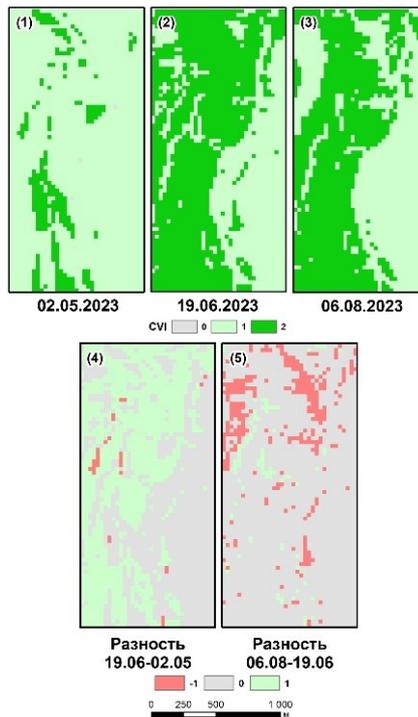


Рис. 7. Изменение индекса CVI за период с 02.05.2023 по 06.08.2023

и величина разности между растрами

*Fig. 7. Change in the CVI index for the period from 02.05.2023 to 06.08.2023
and the magnitude of the difference between the rasters*

Растры разности между растрами CVI необходимы для выявления изменения величины CVI за определенный период для каждой из ячеек растра, что возможно сделать с помощью таких растров, представленных на рис. 4–7 под растрами индекса CVI. Так, например, выявляются схожие по площади и форме ареалы, где наблюдается увеличение или уменьшение хлорофилла на рис. 4(7) (разность 12.07–10.06.2020), рис. 5(6) (разность 15.07–13.06.2021), рис. 6(6) (разность 02.07–07.05.2022) — это связано со схожими периодами вегетации (май–июль). Что касается изменения величины индекса CVI с апреля по май, то рис. 4(5) (разность 25.05–23.04.2020), рис. 6(5) (разность 07.05–05.04.2022) показывают, что для большей части ключевой территории величина индекса CVI остается неизменной.

На рис. 6(5) и рис. 6(6) идентифицируются ареалы, где активный рост содержания хлорофилла с апреля до начала мая 2022 г. сменяется в следующем периоде к началу июля 2022 г. снижением содержания хлорофилла. Растительность данных ареалов в основном представлена болотнотравно-осоковым лугом, что было определено по ландшафтной карте, составленной автором [Поletaев, 2023]. Для этого растр разности 02.07–07.05.2022 (рис. 6(6)) был сконвертирован в векторный формат, и с помощью инструмента «Intersect» ПО ArcGIS 10.5 пересечен с ландшафтной картой (рис. 8). Для выявления этих ареалов необходим растр CVI, отражающий состояние растительности в мае, т. к. для 2021 г. на рис. 5(5) (разность 13.06–26.04.2021) эти ареалы не идентифицируются.

Можно отметить актуальность совместного использования ландшафтной карты с растровыми данными, отражающими состояние растительности, т. к. таким образом, с одной стороны, возможно уточнять границы определенных ПТК на ландшафтной карте и давать их более подробное описание учитывая особенности вегетационного периода, а с другой стороны, растровые данные, отражающие состояние растительности, возможно

будет «разрезать» с учетом границ ландшафтной карты и уже отдельно анализировать динамику состояния растительности определенных ПТК, привлекая более детальные данные, например ЦМР высокого разрешения и аэрофотоснимки (в т. ч. мультиспектральные, полученные в результате аэрофотосъемки с БПЛА).

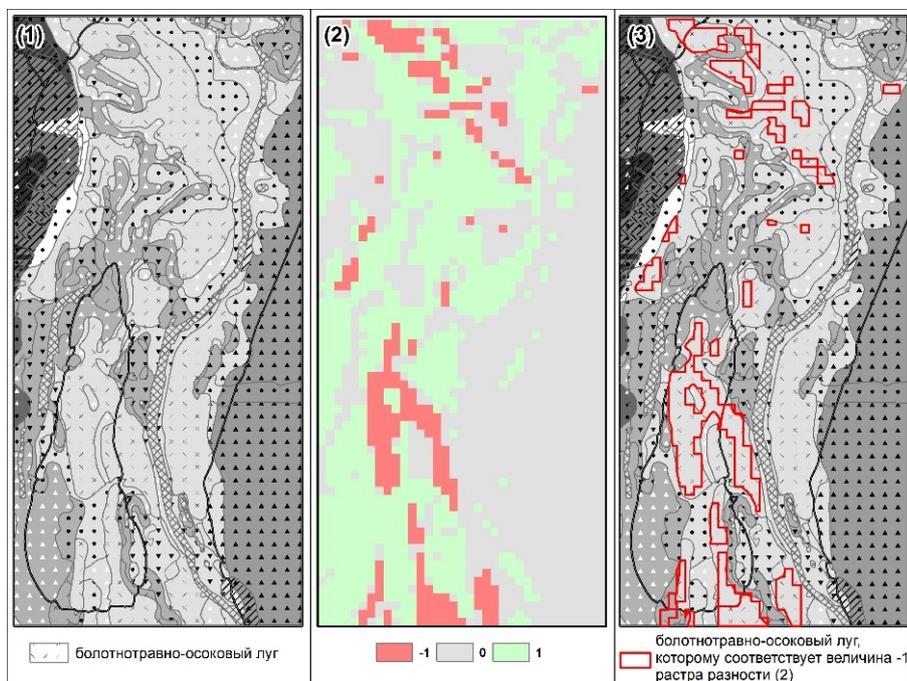


Рис. 8. Ландшафтная карта (1), растр разности 02.07–07.05.2022 (2) и результат их совмещения (3)

Fig. 8. Landscape map (1), difference raster 07.02–05.07.2022 (2) and the result of their combination (3)

Для обобщения результатов детального анализа состояния растительного покрова было выявлено соотношение площадей величин растров разности (рис. 9). Величина, равная 1, находится в пределах 1,6–53,6 % от площади всей ключевой территории и приходится на болотнотравно-осоковые луга, злаково-разнотравные луга, осоково-камышовые заболоченные луга и болота, пойменные леса с преобладанием ивы и черной ольхи. Величина, равная 0, находится в пределах 46,4–98,3 % от всей площади и приходится на болотнотравно-осоковые луга, злаково-разнотравные луга, сосновые насаждения, осоково-камышовые заболоченные луга и болота, пойменные леса с преобладанием ивы и черной ольхи. Величина, равная –1, находится в пределах 0–17,6 % от всей площади и приходится на болотнотравно-осоковые луга, злаково-разнотравные луга, осоково-камышовые заболоченные луга и болота.

Для каждого из растров индекса CVI (рис. 4–7), полученного на ключевую территорию, были рассчитаны площади значений (0, 1 и 2) индекса CVI в га (табл. 1). Значения площади, показанные в табл. 1, были усреднены (рис. 10).

Как видно из рис. 10, усредненное по площади максимальное значение индекса CVI, равное 2, занимает наибольшую площадь к июню, которая постепенно уменьшается к августу.

Для выявления того, какая именно растительность активно накапливает хлорофилл в течение вегетационного периода, был проведен детальный анализ с привлечением ландшафтной карты, составленной автором [Поletaев, 2023].

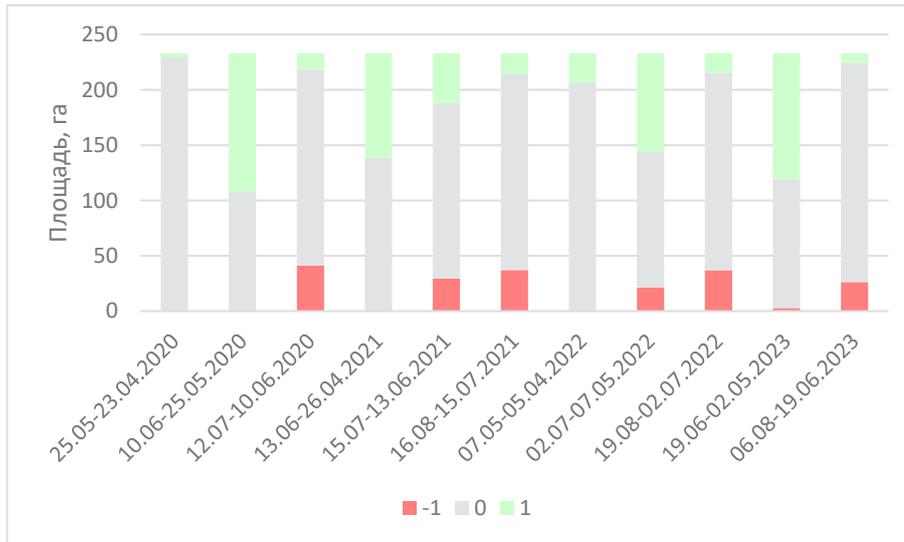


Рис. 9. Соотношение площадей величин растров разности
Fig. 9. Ratio of areas of difference raster values

Табл. 1. Соотношение площадей значений индекса CVI на ключевой территории
Table 1. Ratio of areas of CVI index values in a key area

Дата	Площадь, га		
	CVI = 0	CVI = 1	CVI = 2
23.04.2020	0,63	232,38	0,09
25.05.2020	0	229,95	3,15
10.06.2020	0	104,94	128,16
12.07.2020	0	131,22	101,88
26.04.2021	0,9	232,2	0
13.06.2021	0	139,59	93,51
15.07.2021	0	124,2	108,9
16.08.2021	0,09	142,38	90,63
05.04.2022	0,54	232,38	0,18
07.05.2022	0,45	206,46	26,19
02.07.2022	0	139,59	93,51
19.08.2022	0	158,94	74,16
02.05.2023	0,27	207,81	25,02
19.06.2023	0	97,02	136,08
06.08.2023	0	114,75	118,35

С помощью инструмента «Cell Statistics» ПО ArcGIS 10.5 было проведено усреднение значений индекса CVI для каждого из месяцев (апрель, май, июнь, июль, август) в рамках периода 2020–2023 гг. Растры усредненных таким образом значений индекса CVI были затем усреднены между собой для получения результирующего растра, который был сконвертирован в векторный формат. С помощью инструмента «Intersect» векторный слой усредненных значений индекса CVI был пересечен с векторным слоем ландшафтной карты данной территории. Затем усредненные значения индекса CVI были объединены в следующие группы: менее 1, 1,1–1,5, более 1,5 — для выявления пространственных особенностей варьирования усредненного значения индекса CVI. Для каждой группы была

подсчитана сумма площадей ареалов определенного типа растительности в соответствии с ландшафтной картой (табл. 2). В табл. 2 отсутствуют данные о растительности для площади, составляющей в сумме 14,28 га, по причине отсутствия на этой площади растительного покрова (она занята водной поверхностью, либо присутствует открытый грунт).

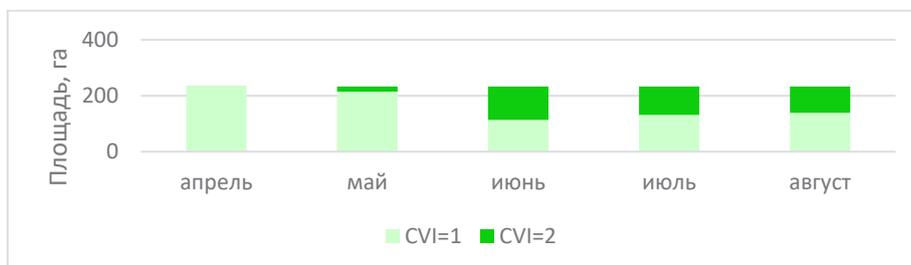


Рис. 10. Соотношение усредненных по площади значений индекса CVI с апреля по август 2020–2023 гг.

Fig. 10. The ratio of area-averaged CVI index values from April to August 2020–2023

Табл. 2. Усредненные значения индекса CVI и площади соответствующих им типов растительности
Table 2. Average values of the CVI index and the area of the corresponding vegetation types

Усредненное значение индекса CVI	Тип растительности	Площадь, га
<1 или 1	болотнотравно-осоковый луг	6,5
	злаково-разнотравный луг	7,4
	сосновые насаждения	42
	осоково-камышовые заболоченные луга и болота	4,2
	пойменные леса с преобладанием ивы и черной ольхи	4,8
1,1–1,5	болотнотравно-осоковый луг	42,4
	злаково-разнотравный луг	22,2
	сосновые насаждения	0,7
	осоково-камышовые заболоченные луга и болота	9,4
	пойменные леса с преобладанием ивы и черной ольхи	13,9
>1,5	болотнотравно-осоковый луг	12,5
	злаково-разнотравный луг	12
	осоково-камышовые заболоченные луга и болота	11,8
	пойменные леса с преобладанием ивы и черной ольхи	28,3

Из табл. 2 видно, что для территорий, на которых усредненное значение индекса CVI менее или равно 1, преобладающим типом растительности являются сосновые насаждения. Для территорий, где усредненное значение индекса CVI в пределах 1,1–1,5, преобладает луговая растительность, состоящая из болотнотравно-осоковых и злаково-разнотравных растительных ассоциаций. На территориях, где усредненное значение индекса CVI

составляет более 1,5, наибольшую площадь занимают пойменные леса с преобладанием ивы и черной ольхи.

На основании этого можно предположить, что природные комплексы, растительность которых представлена пойменными лесами, являются достаточно важным элементом пойменных ландшафтов, т. к. им соответствуют значительные по площади территории с наибольшим усредненным значением индекса CVI — 44 % от территории, где усредненное значение индекса CVI более 1,5.

ВЫВОДЫ

В ходе данной работы были выявлены пространственно-временные особенности изменения фотосинтетической активности растительного покрова в пределах долинно-речных ландшафтов, которые заключаются в увеличении более чем в 6,5 раз на ключевой территории площади наиболее активно вегетирующей растительности (CVI = 2) с мая по июнь. Использование растров вегетационного индекса CVI совместно с данными ландшафтной карты позволило выявить ареалы типов растительности, для которых характерна высокая фотосинтетическая активность в течении определенных временных интервалов вегетационного периода. К таким типам растительности можно отнести болотнотравно-осоковые луга и пойменные леса, состоящие из ивы и черной ольхи. Особенностью болотнотравно-осоковых лугов является активный рост содержания хлорофилла с апреля до начала мая, который сменяется к началу июля снижением содержания хлорофилла, как было выяснено при анализе изменения индекса CVI в 2022 г.; для них характерна также наибольшая площадь усредненного значения индекса CVI в пределах 1,1–1,5. Пойменные леса характеризуются наибольшей площадью усредненного значения индекса CVI более 1,5. Также было выявлено, что резкий рост площади максимального значения индекса CVI, равного 2, характерен для июня, согласно усредненным данным за 2020–2023 гг. Подводя итог, следует отметить эффективность совместного использования данных, полученных в ходе ландшафтных исследований, и результатов анализа изменения вегетационных индексов, т. к. это дает возможность получить новую информацию, которая поможет в принятии решений по рациональной организации природопользования в пределах долинно-речных ландшафтов. К таким решениям можно отнести проведение мероприятий, способствующих увеличению в пойменной части площади долинно-речных ландшафтов определенных растительных ассоциаций, наиболее эффективно связывающих диоксид углерода, например пойменных лесов в долине р. Северский Донец.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00169, <https://rscf.ru/project/23-17-00169/>.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was funded by the Russian Science Foundation, project No. 23-17-00169, <https://rscf.ru/en/project/23-17-00169/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Высоцкая А. А., Медведков А. А. Климатогенное «позеленение» курумных ландшафтов в долине нижнего течения реки Подкаменная Тунгуска. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 305–313. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-305-313.

Домнина Е. А., Тимонов А. С., Кантор Г. Я., Кислицына А. П., Савиных В. П. Опыт составления детальной карты растительности пойменного луга. Теоретическая и прикладная экология, 2017. № 1. С. 42–49.

Курганович К. А., Голятина М. А. Пространственно-временной отклик NDVI на изменение климатических характеристик в Забайкальском крае за период 2000–2014 гг. Вестник Забайкальского государственного университета, 2015. № 9. С. 10–20.

Кутузов А. В. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга систем «вода-суша» на равнинных водохранилищах (на примере Цимлянского водохранилища). Исследование Земли из космоса, 2011. № 6. С. 64–72.

Полетаев А. О. Прогностические возможности ГИС-технологий для определения границ зон затопления в пойменных ландшафтах (на примере рек Северский Донец и Нежеголь). Материалы XIV Международной ландшафтной конференции «Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии. VII Мильковские чтения». Воронеж, 2023. Т. 2. С. 277–280. DOI: 10.17308/978-5-9273-3693-7-2023-277-280.

Рыгалова Н. В., Плуталова Т. Г. Оценка связи NDVI степной растительности и радиального прироста сосны ленточных боров в засушливых условиях юга Западной Сибири. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции. М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 2. С. 355–367. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-355-367.

Терехин Э. А. Особенности многолетней динамики вегетационного индекса залежных земель на территории Центрального Черноземья. Региональные геосистемы, 2021. Т. 45. № 4. С. 505–515. DOI: 10.52575/2712-7443-2021-45-4-505-515.

Юдина Ю. В. Картографирование геосистем Белгородской области: региональные особенности. Современные проблемы науки и образования, 2013. № 6. С. 933.

Avetisyan D., Stankova N., Dimitrov Z. Assessment of spectral vegetation indices performance for post-fire monitoring of different forest environments. Fire, 2023. V. 6. No. 8. P. 290. DOI: 10.3390/fire6080290.

Chandrasekar K., Sesha Sai M. V. R., Roy P. S., Dwevedi R. S. Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS Vegetation Index product. International Journal of Remote Sensing, 2010. V. 31. No. 15. P. 3987–4005. DOI: 10.1080/01431160802575653.

Geerling G. W., Labrador-Garcia M., Clevers J. G. P. W., Ragas A. M. J., Smits A. J. M. Classification of floodplain vegetation by data fusion of spectral (CASI) and LiDAR data. International Journal of Remote Sensing, 2007. V. 28. No. 19. P. 4263–4284. DOI: 10.1080/01431160701241720.

Hunt E. R., Daughtry C. S. T., Eitel J. U. H., Long D. S. Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index. Agronomy Journal, 2011. V. 103. No. 4. P. 1090–1099. DOI: 10.2134/agronj2010.0395.

Kooistra L., Salas E. A. L., Clevers J. G. P. W., Wehrens R., Leuven R. S. E. W., Nienhuis P. H., Buydens L. M. C. Exploring field vegetation reflectance as an indicator of soil contamination in river floodplains. Environmental Pollution, 2004. V. 127. No. 2. P. 281–290. DOI: 10.1016/S0269-7491(03)00266-5.

Lisetskii F. N., Poletaev A. O., Buryak Z. A. Geoinformation support for studies of the boundaries of flood zones in urban areas. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2022. V. 2388. No. 1. P. 012134. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012134.

- Marinina O. A., Yermolaev O. P., Maltsev K. A., Lisetskii F. N., Pavlyuk Y. V.* Evaluation of siltation of rivers with intensive economic development of watersheds. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016. V. 11. No. 14. P. 3004–3013. DOI: 10.3923/jeasci.2016.3004.3013.
- Poletaev A., Lisetskii F.* Using vegetation indices to identify high chlorophyll tree cover in floodplains for carbon sequestration. *E3S Web of Conferences*, 2024. V. 486. 07013. DOI: 10.1051/e3sconf/202448607013.
- Sims N. C., Colloff M. J.* Remote sensing of vegetation responses to flooding of a semi-arid floodplain: Implications for monitoring ecological effects of environmental flows. *Ecological Indicators*, 2012. V. 18. P. 387–391. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.12.007.
- Van Iersel W., Straatsma M., Middelkoop H., Addink E.* Multitemporal classification of river floodplain vegetation using time series of UAV images. *Remote Sensing*, 2018. V. 10. No. 7. P. 1144. DOI: 10.3390/rs10071144.
- Vincini M., Calegari F., Casa R.* Sensitivity of leaf chlorophyll empirical estimators obtained at Sentinel-2 spectral resolution for different canopy structures. *Precision Agriculture*, 2016. V. 17. No. 3. P. 313–331. DOI: 10.1007/s11119-015-9424-7.
- Zhu X., Li Q., Guo C.* Evaluation of the monitoring capability of various vegetation indices and mainstream satellite band settings for grassland drought. *Ecological Informatics*, 2024. 102717. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2024.102717.

REFERENCES

- Avetisyan D., Stankova N., Dimitrov Z.* Assessment of spectral vegetation indices performance for post-fire monitoring of different forest environments. *Fire*, 2023. V. 6. No. 8. P. 290. DOI: 10.3390/fire6080290.
- Chandrasekar K., Sesha Sai M. V. R., Roy P. S., Dwevedi R. S.* Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS Vegetation Index product. *International Journal of Remote Sensing*, 2010. V. 31. No. 15. P. 3987–4005. DOI: 10.1080/01431160802575653.
- Domnina E. A., Timonov A. S., Kantor G. Y., Kislitsyna A. P., Savinykh V. P.* Experience of detailed mapping of floodplain meadow vegetation. *Theoretical and Applied Ecology*, 2017. No. 1. P. 42–49 (in Russian).
- Geerling G. W., Labrador-Garcia M., Clevers J. G. P. W., Ragas A. M. J., Smits A. J. M.* Classification of floodplain vegetation by data fusion of spectral (CASI) and LiDAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 2007. V. 28. No. 19. P. 4263–4284. DOI: 10.1080/01431160701241720.
- Hunt E. R., Daughtry C. S. T., Eitel J. U. H., Long D. S.* Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index. *Agronomy Journal*, 2011. V. 103. No. 4. P. 1090–1099. DOI: 10.2134/agronj2010.0395.
- Kooistra L., Salas E. A. L., Clevers J. G. P. W., Wehrens R., Leuven R. S. E. W., Nienhuis P. H., Buydens L. M. C.* Exploring field vegetation reflectance as an indicator of soil contamination in river floodplains. *Environmental Pollution*, 2004. V. 127. No. 2. P. 281–290. DOI: 10.1016/S0269-7491(03)00266-5.
- Kurganovich K. A., Golyatina M. A.* Spatiotemporal response of NDVI to changes in climatic characteristics in the Trans-Baikal Territory for the period 2000–2014. *Transbaikal State University Journal*, 2015. No. 9. P. 10–20 (in Russian).
- Kutuzov A. V.* Monitoring of the large flat water reservoirs using remote sensing data. *Issledovanie Zemli iz kosmosa (Earth Observation and Remote Sensing)*, 2011. No. 6. P. 64–72 (in Russian).

- Lisetskii F. N., Poletaev A. O., Buryak Z. A.* Geoinformation support for studies of the boundaries of flood zones in urban areas. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2022. V. 2388. No. 1. 012134. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012134.
- Marinina O. A., Yermolaev O. P., Maltsev K. A., Lisetskii F. N., Pavlyuk Y. V.* Evaluation of siltation of rivers with intensive economic development of watersheds. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016. V. 11. No. 14. P. 3004–3013. DOI: 10.3923/jeasci.2016.3004.3013.
- Poletaev A. O.* Predictive capabilities of GIS technologies for determining the boundaries of flood zones in floodplain landscapes (using the example of the Seversky Donets and Nezhegol rivers). *Proceedings of the XIV International Landscape Conference “Theoretical and Applied Problems of Landscape Geography. VII Milkov Readings”*. Voronezh, 2023. V. 2. P. 277–280 (in Russian). DOI: 10.17308/978-5-9273-3693-7-2023-277-280.
- Poletaev A., Lisetskii F.* Using vegetation indices to identify high chlorophyll tree cover in floodplains for carbon sequestration. *E3S Web of Conferences*, 2024. V. 486. 07013. DOI: 10.1051/e3sconf/202448607013.
- Rygalova N. V., Plutalova T. G.* Estimation of the relation of NDVI steppe vegetation and radial growth of pine belt forests in arid conditions of the south of Western Siberia. *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. 355–367 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-355-367.
- Sims N. C., Colloff M. J.* Remote sensing of vegetation responses to flooding of a semi-arid floodplain: Implications for monitoring ecological effects of environmental flows. *Ecological Indicators*, 2012. V. 18. P. 387–391. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.12.007.
- Terekhin E. A.* Long-term dynamics of the vegetation index for abandoned farmlands in the Central Chernozem Region of Russia. *Regional Geosystems*, 2021. V. 45. No. 4. P. 505–515 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2021-45-4-505-515.
- Van Iersel W., Straatsma M., Middelkoop H., Addink E.* Multitemporal classification of river floodplain vegetation using time series of UAV images. *Remote Sensing*, 2018. V. 10. No. 7. P. 1144. DOI: 10.3390/rs10071144.
- Vincini M., Calegari F., Casa R.* Sensitivity of leaf chlorophyll empirical estimators obtained at Sentinel-2 spectral resolution for different canopy structures. *Precision Agriculture*, 2016. V. 17. No. 3. P. 313–331. DOI: 10.1007/s11119-015-9424-7.
- Vysotskaya A. A., Medvedkov A. A.* Climate-driven “greening” of the kurum landscape in the valley of the lower reaches of the Podkamennaya Tunguska river. *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. 305–313 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-305-313.
- Yudina Yu. V.* Mapping geosystems of the Belgorod region: regional features. *Modern Problems of Science and Education*, 2013. No. 6. P. 933 (in Russian).
- Zhu X., Li Q., Guo C.* Evaluation of the monitoring capability of various vegetation indices and mainstream satellite band settings for grassland drought. *Ecological Informatics*, 2024. 102717. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2024.102717.

УДК: 551.501

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-604-616

Е. В. Захарова¹, В. В. Фомин^{2,3,4}

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ СПУТНИКОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты сравнения спутниковой температуры поверхности моря (ТПМ) уровня обработки L3S (ТПМ L3S) и L4 (ТПМ L4) с данными контактных измерений 41 станций, расположенных в прибрежной части Балтийского моря. Средняя абсолютная ошибка (САО) ТПМ L4 и L3S соответственно изменяется от 0,6 и 0,59 °С в марте до 2,0 и 2,17 °С в мае, а в среднем за весь 2018 г. равна 1,27 и 1,37 °С. Систематическая ошибка (СО) ТПМ L4 и L3S в среднем за весь год равна –0,08 и –0,09 °С, однако рассмотрение среднемесячных значений позволяет проследить значительную изменчивость в течение 2018 г. СО ТПМ L4 и L3S соответственно изменяется от –0,85 и –1,11 °С в мае до 0,84 и 1,1 °С в декабре, имеет выраженный сезонный ход и неоднородность по пространству. ТПМ занижается в период с февраля по июнь и завышается в период с июля по декабрь в прибрежной зоне Балтийского моря. Наибольшие САО во все сезоны года наблюдаются по станциям на восточном побережье Ботнического залива, на входе в Финский залив, вблизи острова Сааремаа и на акватории Рижского залива. Данные ТПМ L4 имеют более высокую точность в сравнении с данными ТПМ L3S, при этом разница в ошибках незначительна и в обоих массивах наибольшие СО и САО наблюдаются в прибрежной зоне.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: спутниковая температура поверхности моря, ТПМ, Балтийское море

¹ Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Кропоткинский пер., д. 6 с. 1, Москва, Россия, 119991,
e-mail: katezakharova33@gmail.com

² Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Кропоткинский пер., д. 6 с. 1, Москва, Россия, 119991,
e-mail: vladimirfomin@live.com

³ Гидрометцентр России, Большой Предтеченский пер., д. 13 с. 1, Москва, Россия, 123376,
e-mail: vladimirfomin@live.com

⁴ Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН, ул. Губкина, д. 8, Москва, Россия, 119333,
e-mail: vladimirfomin@live.com

Ekaterina V. Zakharova¹, Vladimir V. Fomin^{2,3,4}

ASSESSMENT OF THE ACCURACY OF THE SEA SURFACE TEMPERATURE OF THE BALTIC SEA

ABSTRACT

The paper presents the results of a comparison of satellite sea surface temperature (SST) processing level L3S (SST L3S) and L4 (SST L4) with contact measurement data from 41 stations located in the coastal part of the Baltic Sea. Mean absolute deviation (MAD) of SST L4 and L3S, respectively, varies from 0.6 and 0.59 °C in March to 2.0 and 2.17 °C in May, and the whole year average MAD is 1.27 and 1.37 °C. The SST L4 and L3S bias overall year is -0.08 and -0.09 °C, however, consideration of the monthly average values allows us to trace significant variability during 2018. The SST L4 and L3S bias, respectively, varies from -0.85 and -1.11 °C in May to 0.84 and 1.1 °C in December, bias has a pronounced seasonal variation and heterogeneity over space. SST is underestimated from February to June and overestimated from July to December near the coastline of the Baltic Sea. The largest MAD in all seasons of the year are observed at stations on the eastern coast of the Gulf of Bothnia, at the entrance of the Gulf of Finland, near the island of Saaremaa and in the Gulf of Riga. The SST L4 data has higher accuracy compared to the SST L3S data, while the SST difference is negligible and in both arrays the largest bias and MAD are observed in the coastal zone.

KEYWORDS: satellite sea surface temperature, SST, Baltic Sea

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковые данные о температуре поверхности моря (ТПМ) обладают высоким пространственным разрешением и являются весьма востребованным продуктом дистанционных измерений в различных задачах гидрометеорологии, таких как изучение процессов тепло- и влагообмена на границе океан-атмосфера, моделирование процессов в океане [Minnett et al., 2019]. Несмотря на многочисленные преимущества спутниковых данных, отмечаются и их недостатки, которые заключаются в ошибках, возникающих при обработке сырых данных, ограничениях по полосе охвата, по качеству съемки в дневное время, пропусках в данных из-за облачности [She, 2007; O'Carroll et al., 2019]. Несмотря на все это, спутниковые данные в настоящее время дают значительно больший объем данных, чем контактные измерения (стационарные и дрейфующие буи, данные судовых измерений и мареографических станций), данные с которых зачастую представляют нерегулярные по времени и пространству измерения. В связи с этим использование данных ТПМ, полученных на основе результатов обработки спутниковой информации, выглядит перспективным при решении большого спектра задач: от изучения физических процессов до использования при моделировании морской циркуляции. При всем этом, т. к. данные не являются результатом прямых измерений, а получены в результате обработки сырой спутниковой информации, то они содержат в себе ошибки, значения которых необходимо учитывать при проведении различных исследований и решении практических задач.

¹ Zubov State Oceanographic Institute, 6 build. 1, Kropotkinsky ln., Moscow, 119991, Russia,
e-mail: katezakharova33@gmail.com

² Zubov State Oceanographic Institute, 6 build. 1, Kropotkinsky ln., Moscow, 119991, Russia,
e-mail: vladimirfomin@live.com

³ Hydrometcenter of Russia, 13 build. 1, Bolshoy Predtechensky ln., Moscow, 123376, Russia,
e-mail: vladimirfomin@live.com

⁴ Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the RAS, 8, Gubkina str., Moscow, 119333, Russia,
e-mail: vladimirfomin@live.com

Для получения данных ТПМ L4 и L3S проводится многоэтапная обработка сырых данных о температуре, полученных со спутников [Merchant et al., 2019]. Качество спутниковых данных ограничено многими факторами, связанными с работой инфракрасных датчиков, включая наличие облачности, интенсивность осадков, загрязненность прибрежной зоны, величину эффективной зоны покрытия акватории порядка 31 % [She, 2007]. Алгоритмы обработки могут вносить значительный вклад в качество получаемых данных. В работе [Minnett, Kaiser-Weiss, 2012] было изучено изменение профиля температуры в приповерхностном 10-метровом слое, разработано несколько различных методов расчета ТПМ в зависимости от глубины. Показано, как в течение дня температура может увеличиваться на 2,5 °C по сравнению с ночной, но на глубине от двух и более метров разница дневной и ночной температуры не превышает 0,5 °C. Таким образом, существует множество неопределенностей, влияющих на качество данных ТПМ. В работе [O'Carroll et al., 2019] упоминается о формировании минимальных требований к качеству данных ТПМ, которые в дальнейшем усваиваются оперативными моделями океана. Указывается, что поступающие в модель данные должны обладать дискретностью по горизонтали не более 10 км, иметь шаг по времени 6 ч, и погрешность в определении ТПМ не должна превышать 0,2 °C.

С целью валидации измерений температуры проводилось сопоставление спутниковых данных L3S и L4 с данными дрейфующих буев, заякоренных буев и наблюдений с судов, полученных из интегрированной базы данных океана Центра Хэдли (HadIOD) [Hoyer, 2016]. Большой набор данных контактных измерений показан в документе CMEMS¹ и сопоставлен с ТПМ L4. В документе CMEMS показан резкий рост количества дрейфтерных измерений в целом для исследуемого региона, при этом большая их часть сосредоточена в Северном море, тогда как во внутреннем Балтийском море количество данных ограничено. Показано, что количество измерений с заякоренных буев и судов за период с января 1982 г. по май 2021 г. значительным образом меняется в регионе Северного и Балтийского моря, измерения нерегулярны по времени и пространству. Сравнение ТПМ за период 40 лет проводилось в регионе Северного и Балтийского моря, а также только для акватории Балтийского моря. В последнем случае средние СО в ТПМ L4 и L3S соответственно составляют по дрейфтерным измерениям 0,16 и 0,21°, по заякоренным буям 0,02 и 0,07°, судовым данным –0,22 и –0,19°. Полученные результаты также говорят о сопоставимой точности ТПМ L4 и L3S при анализе ошибок, наблюдаемых в открытом море, демонстрируют высокую точность на долгосрочном ряде наблюдений и климатическом масштабе. Интересно также, что СО в ТПМ L4 и L3S при сравнении с буями и судовыми данными имеют различный знак. Несмотря на низкие средние значения многолетней ошибки, к сожалению, такая оценка не может дать полное представление о пространственной структуре точности ТПМ L4 и L3S и внутригодовой изменчивости. Это особенно актуально и для прибрежной зоны, где количество данных дрейфтерных и судовых измерений значительно меньше.

Проведенное сопоставление спутниковых данных о температуре воды с данными измерений термоксы на глубине 1 м в прибрежной зоне Юго-Восточной части Балтийского моря [Мысленков, 2017] позволило установить, что средняя разность по всему ряду данных составляет 0,25 °C, а наличие отклонений более 2 °C связано с сильным дневным прогревом тонкого верхнего слоя, особенно при штиле. Также в работах [Мысленков, 2017; Myslenkov et al., 2023] показано, что сильные и продолжительные ветры

¹ Karagali I. et al., 2023. Product user manual. CMEMS. Электронный ресурс: <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-SST-PUM-010-016-040.pdf> (дата обращения 25.04.2024)

в прибрежной зоне могут вызывать экмановский апвеллинг и тем самым значительно изменять ТПО в полосе шириной порядка 5–25 км.

Балтийское море имеет большую протяженность, а его температурный режим определяется различными физико-географическими факторами (мелководность, значительная широтная протяженность, слабый водообмен с Северным морем) [Котлярова, Буканова, 2019; Omstedt, 1996]. Поэтому ТПМ может иметь значительные различия в значениях в прибрежной акватории, в мелководных заливах и на открытой акватории. Кроме того, качество спутниковых данных также зависит от широты и снижается в высоких широтах [She, 2007].

Интересом данного исследования является анализ точности полей ТПМ L4 и L3S, получение оценки их качества в прибрежной зоне по данным мареографических станций, с которыми не проводилось сравнение в отчетах CMEMS и изучение пространственных различий; последние не отражаются в средних по всему бассейну статистических показателях [Hoyer, 2016].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе в качестве материалов для исследования были использованы данные спутниковой температуры океана уровней обработки L3S (Level 3 Super-collated) и L4 (level 4), а также данные стационарных наблюдений с сайта CMEMS¹.

ТПМ L3S — это обработанные данные спутниковых измерений, представленные на сеточной области с пространственным шагом $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ в виде ежедневных карт температуры поверхности моря, полученных с использованием инфракрасных спутниковых наблюдений в рамках проектов ESA CCI и C3S. Они основаны на спутниковых измерениях уровня обработки L2 (level 2), из которых исключены сроки с 10 до 18 ч дня и данные скорректированы на глубину 20 см с целью исключения ошибки, возникающей из-за дневного прогрева поверхности моря [O'Carroll et al., 2019]. При обработке и подготовке данных ТПМ L3S используются данные, предварительно прошедшие контроль качества.

Для перехода к полям ТПМ L4, к данным уровня обработки L3S применяются алгоритмы оптимальной интерполяции². Поля ТПМ L4 также имеют пространственное разрешение $0,02^\circ \times 0,02^\circ$ и представлены в виде ежедневных карт, но дополняются данными в местах, где спутниковые измерения отсутствуют и, таким образом, имеют покрытие акватории без пропусков. ТПМ L3S и L4 рассчитываются в Датском Метеорологическом институте (Danish Meteorological Institute (DMI)), алгоритм подготовки данных подробно описан в работе [Merchant et al., 2019].

В качестве стационарных данных были использованы данные с мареографических станций (Tide gauge station) (рис. 1) из массива Baltic Sea in situ near real time observations (Наблюдения за Балтийским морем на месте, близкие к реальному времени)³. Они не используются для заполнения данных на этапах перехода от ТПМ L3S к анализу ТПМ L4 и, таким образом, могут быть использованы для проведения независимого сравнения. Точность измерений температуры изменяется от станции к станции в зависимости от используемого оборудования и варьируется в диапазоне $0,001–0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ⁴.

¹ CMEMS. Электронный ресурс: <https://data.marine.copernicus.eu/products> (дата обращения 25.04.2024)

² Hoyer J. L. Product user manual for SST_BAL_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_016 level 4 SST Электронный ресурс: <http://marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-OSI-PUM-010-016.pdf> (дата обращения 25.04.2024)

³ CMEMS. Baltic Sea — In situ near real time observations. Электронный ресурс: <https://doi.org/10.48670/moi-00032> (дата обращения 25.04.2024)

⁴ CMEMS. Quality information document. Электронный ресурс: <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-INS-QUID-013-030-036.pdf> (дата обращения 25.04.2024)

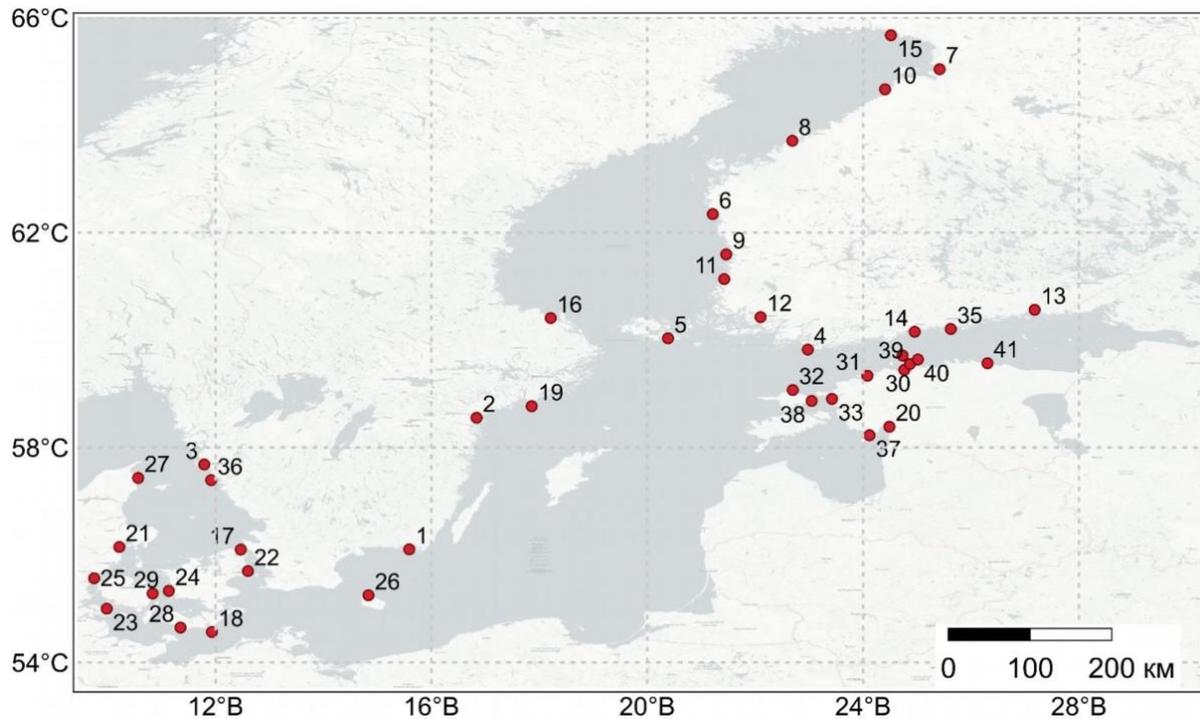


Рис. 1. Расположение 41 мареографической станции на побережье Балтийского моря, м-б 1: 2 800 000
Fig. 1. Location of 41 tidal gauge station on the coastline of Baltic Sea, scale 1: 2 800 000

Для количественной оценки точности SST L3S и L4 были использованы статистические параметры, такие как систематическая ошибка (CA/BIAS) (1), среднее абсолютное отклонение (CAO/MAD) (2) и дисперсия (Var) (3):

$$BIAS = \frac{\sum x_i - x_{in\ situ}}{n}, \quad (1)$$

$$MAD = \frac{\sum |x_i - x_{in\ situ}|}{n}, \quad (2)$$

$$Var = \frac{\sum (|x_i - \bar{x}|)^2}{n}, \quad (3)$$

где x_i — спутниковая температура,
 $x_{in\ situ}$ — станционная температура со станций мареографа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные ТПМ L3S, несмотря на их представление на регулярной сетке, имеют сильно нерегулярное покрытие по сравнению с ТПМ L4. В узлах регулярной сеточной области, где наблюдается облачность или данные низкого качества, данные исключаются. График, представленный на рис. 2, показывает неоднородность покрытия данными ТПМ L3S акватории Балтийского моря в течение 2018–2019 гг. Число узлов сетки, в которых есть значения ТПМ L4, охватывает всю акваторию Балтийского моря, не меняется с течением времени и принимается здесь за 100 %. А покрытие данными ТПМ L3S определяется как отношение числа узлов сетки, в которых есть значение ТПМ L3S за конкретные сутки, к

числу узлов сетки, в которых имеются значения ТПМ L4. Прослеживается сезонность: летом процент покрытия данными выше по сравнению с зимним периодом. Также видно резкое снижение качественных данных ТПМ L3S с 01.09.2019 г., что, вероятно, связано с внедрением обновленного алгоритма обработки данных командой специалистов СМЕМС.

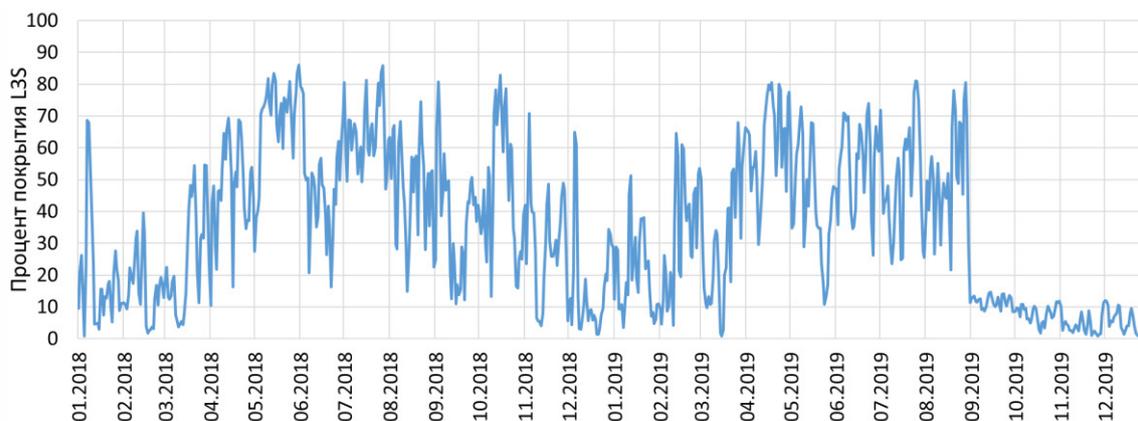


Рис. 2. Покрытие Балтийского моря данными SST L3S (%) за период 2018–2019 гг.
Fig. 2. Coverage of the Baltic Sea by SST L3S data (%) for the period 2018–2019

Из-за нерегулярного покрытия данными ТПМ L3S точное их сопоставление с данными прибрежных станций провести практически невозможно. Для получения репрезентативной выборки и получения среднемесячных значений СО и САО сопоставление между данными ТПМ L3S и станционными данными проводилось в ближайшем к станционным данным узле сеточной области, расположенном в радиусе 25 км от станции измерений. При введении такого ограничения 3 станции выбыли из выборки, статистика была обобщена по 39 станциям. При уменьшении радиуса до 5 км количество станций, в которых имеются измерения, сокращается с 39 до 16, а в зимние месяцы среднее по всем 16-ти станциям количество измерений составляет 2–4 из максимально возможных 28–31 (равных количеству дней в месяце), что не позволяет получить статистические оценки, особенно в зимний сезон. Из массива данных ТПМ L4 брался аналогичный узел на сеточной области. В случае, если для соответствующего срока по времени данные в указанном радиусе отсутствовали, то этот срок исключался из рассмотрения. Также для исключения влияния суточного хода и прогрева тонкого поверхностного слоя для сравнения были взяты значения температуры в ночное время. Результаты сравнения были осреднены по месяцам и за год в целом и представлены на рис. 3А и 3В.

Видно, что в ошибках присутствует сезонность. С марта по июнь характерно занижение температуры по сравнению с данными наблюдений, а в остальные месяцы — завышение (рис. 3А). Максимальные значения САО наблюдаются с мая по июль. По результатам получено, что СО ТПМ L4 чуть ниже по сравнению с СО ТПМ L3S. В совокупности с тем, что покрытие акватории Балтийского моря данными L3S значительно хуже, чем данными L4, то можно сделать вывод, что целесообразность использования данных L3S для каких-либо исследований в целом ниже.

Были также сопоставлены ТПМ L4 за каждые сутки 2018 г. в ближайших узлах сетки к станциям измерений (рис. 3С и 3D). Годовой ход выглядит схожим образом (что позволяет говорить о корректности используемой методики), но возрастает САО в зимний период, незначительно снижаясь в период с мая по июль. Такая изменчивость может быть связана с тем, что зимой ряд имеет большее количество сроков с данными по сравнению с рядом на рис. 3А и 3В, где за некоторые сроки данные отсутствуют из-за пробелов в L3S.

CO показывает, что ТПМ L4 занижены относительно наблюдений с января по июнь и завышены с июля по декабрь.

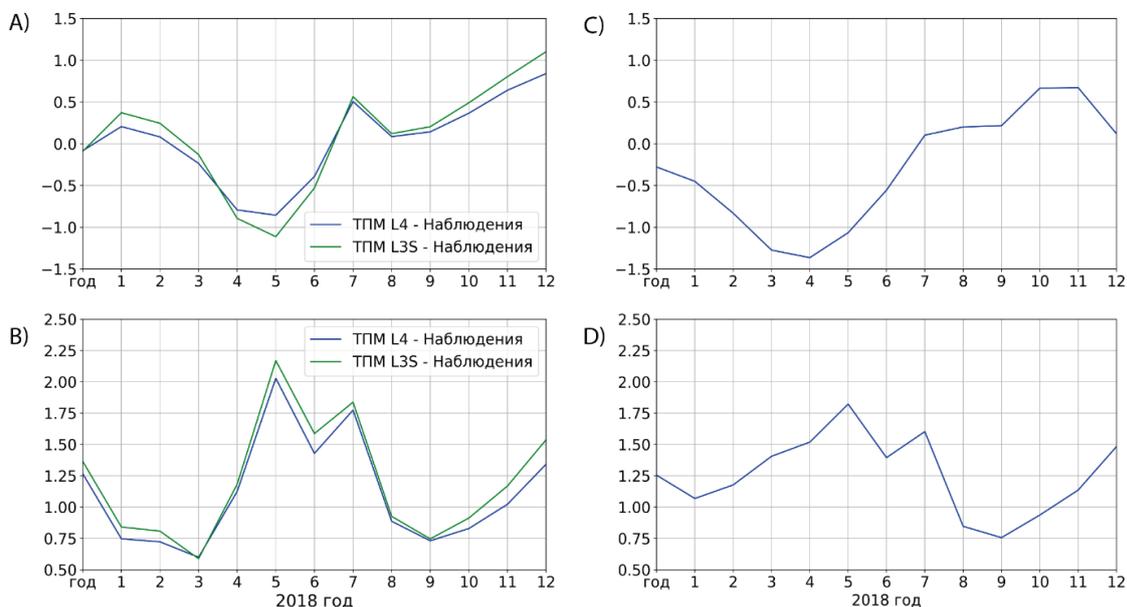


Рис. 3. Осредненные по 39 станциям ошибки спутниковой температуры по месяцам и в целом за 2018 г.: А) CO и В) CAO для L4 (синяя линия) и L3S (зеленая линия) в радиусе 25 км от станции; С) CO; D) CAO для L4 (синяя линия) в ближайшем узле сетки от станций
Fig. 3. Averaged over 39 stations, satellite sea surface temperature errors by month and overall 2018: A) BIAS and B) MAD for L4 (blue line) and L3S (green line) within a radius of 25 km from the station; C) BIAS; D) MAD for L4 (blue line) at the nearest grid point from the stations.

Рассмотрим подробнее сезонные пространственные отличия сопоставленных L4 с данным в точках за год и по сезонам года (рис. 4). Видно, что зимой температура более занижена на акватории Ботнического залива (рис. 4А), весной занижение температуры происходит по всей акватории Балтийского моря, минимальные ошибки наблюдаются на станциях, расположенных в Датских проливах (рис. 4В). В летний период занижение температуры ТПМ характерно для станций южной части Ботнического залива, вблизи острова Сааремаа, восточного побережья Датских проливов, а завышение — для станций Финского залива и западного побережья Датских проливов (рис. 4С). Осенью происходит завышение температуры по всем станциям Финского и Ботнического заливов и центральной части Балтийского моря, занижение температуры осенью характерно лишь для станций, расположенных в Датских проливах (рис. 4D). По карте фактических ошибок в целом за год видно, что лишь по двум станциям наблюдается ошибка температуры более 1 °С, а по остальным 39 станциям не превышает 1 °С. Уменьшение средней за год ошибки происходит за счет осреднения разных по знаку ошибок за летний и зимний сезоны, но остается по-прежнему высокой для ТПМ L4 в прибрежной зоне Балтийского моря, а особенно Ботнического залива, где наблюдаются наибольшие средние ошибки за зимний и осенний периоды. Из карты абсолютных ошибок (рис. 4 F–J) видно, что наибольшие их значения достигаются в весенний период. В течение всего года выделяются станции с более высокими значениями CAO, расположенные на восточном побережье Ботнического залива, на входе в Финский залив, вблизи о. Сааремаа и на акватории Рижского залива.

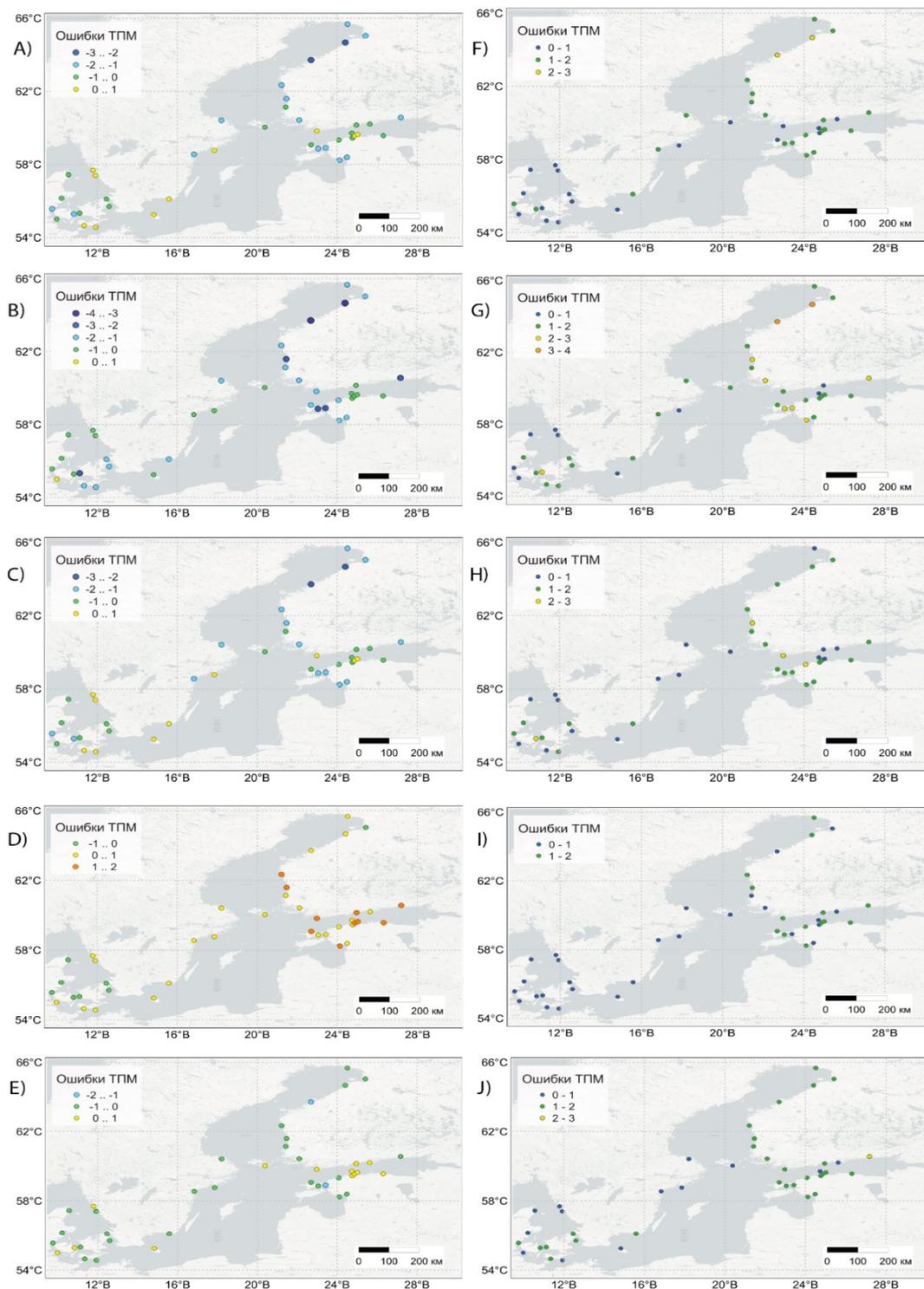


Рис. 4. Карты ошибок SST L4 за 2018 г. в узлах сетки ближайших к расположению мареографических станций, м-б 1: 2 800 000. СО по сезонам:

А) зима, В) весна, С) лето, Д) осень, Е) за 2018 г. в целом.

САО по сезонам: F) зима, G) весна, H) лето, I) осень, J) за 2018 г. в целом

Fig. 4. Maps of SST L4 errors in the nearest grid nodes to tidal gauge stations,

scale 1: 2 800 000. Bias by seasons: A) winter B) spring, C) summer,

D) autumn, E) year 2018. MAD by seasons: F) winter, G) spring,

H) summer, I) autumn, J) year 2018

На рис. 5 показана разница полей ТПМ L3S–L4 за год (рис. 5E) и по сезонам года (рис. 5A–D). Видно, что в целом за год ошибка распределена равномерно по всей акватории и ее ошибки практически на всей акватории не превышают значений ± 0.2 °C, тогда как по средним за сезоны картам видны пространственные отличия. Зимой (рис. 5A) L3S завьшается по сравнению с L4 в прибрежной зоне практически по всей акватории. Наибольшая разница температур в зимний сезон характерна для северного побережья Ботнического залива, восточного побережья южной части Ботнического залива, Рижского залива и основной части Балтийского моря. Особенностью весеннего периода (рис. 5B) является наибольшая по сравнению с другими сезонами разница ТПМ. Разница полей L3S и L4 весной значительно возрастает у берегов Ботнического залива и в мелководной части, соединяющей северную часть акватории залива с южной. У берегов Рижского и Финского заливов видно занижение L3S по сравнению с L4. Летом (рис. 5C) наблюдается небольшое завьшение L3S по сравнению с L4 у Восточного берега основной акватории Балтийского моря и вблизи о. Сааремаа; в целом на акватории практически не встречается значительных отличий, происходит занижение L3S и L4. Осенью (рис. 5D) завьшения L3S по сравнению с L4 наблюдаются в северной части Финского залива вблизи Хельсинки, на северо-западной части основной акватории Балтийского моря, севернее о. Готланд и вдоль северного побережья Балтийского моря к северу от о. Борнхольм. Осенью в поле разницы ТПМ прослеживается повышенная контрастность по сравнению с другими сезонами: положительные значения L3S–L4 вдоль побережий сменяются широкими зонами отрицательных значений при удалении от берегов. Карта кинетической энергии с направлениями течений (рис. 5F) приведена за май 2018 г., где наблюдается наибольшая ошибка ТПМ L4. Карта показывает зоны интенсификации течений: выделяется область вдоль северного побережья Финского залива, где течения направлены с востока на запад, и северной части Ботнического залива, где формируется замкнутая циркуляция из-за зоны мелководья между северной и южной частями Ботнического залива.

Карты дисперсии (рис. 6), представленные по сезонам 2018 г., также показывают, что наибольшие различия ТПМ L3S и L4 наблюдаются весной в северной части Ботнического залива — на мелководье и в прибрежных зонах. Повышение дисперсии характерно также для юго-восточной части Финского залива и для узкой прибрежной зоны вдоль юго-восточного побережья основной акватории Балтийского моря. Летом дисперсия L3S–L4 высока на мелководье между северной и южной частью Ботнического залива, в Финском заливе и у восточного побережья основной акватории Балтийского моря. Осенью дисперсия высока у западных берегов основной акватории Балтийского моря и на выходе из Финского залива. В зимний период дисперсия минимальна.

Сопоставление карт L3S и L4 в целом показывает, что ошибка в спутниковых данных больше в береговой зоне, а также в областях интенсивных течений. По сезонам ошибки неодинаковы и имеют разнонаправленные знаки, но при осреднении за год разница между ТПМ уменьшается и выглядит однородной на всей акватории Балтийского моря.

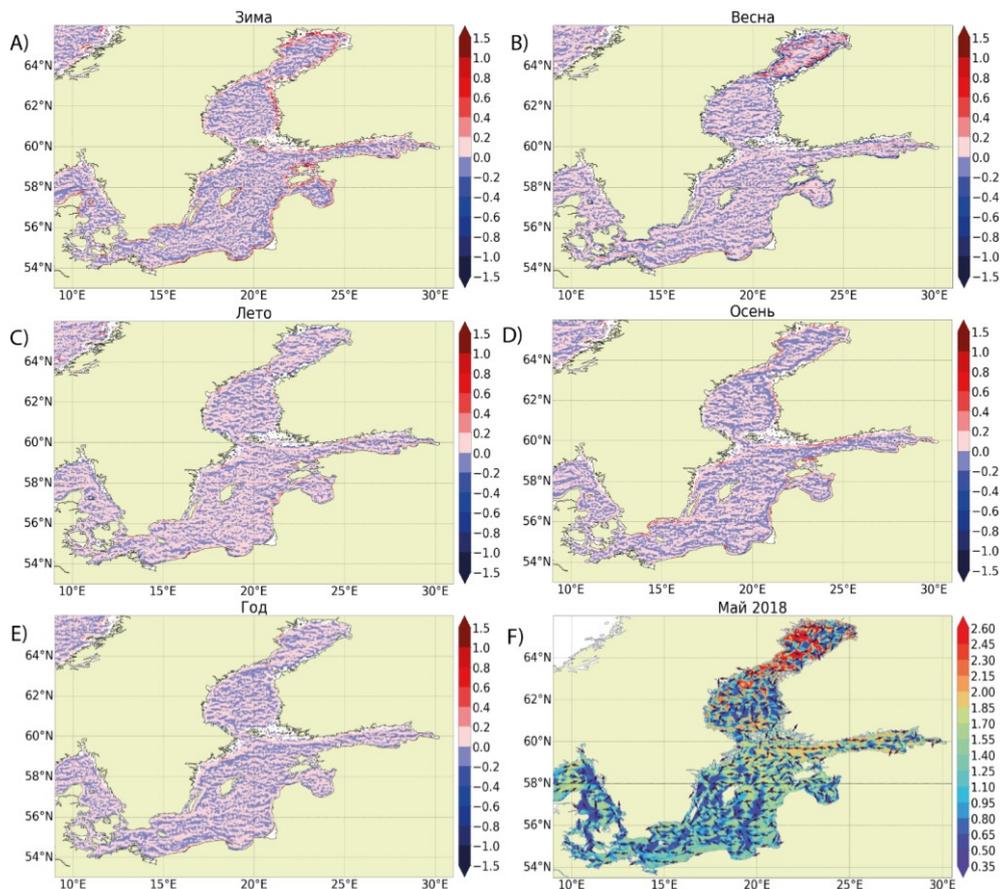


Рис. 5. Карты разницы ТПМ L3S–L4 по сезонам 2018 г.: А) зима, В) весна, С) лето, D) осень, E) за 2018 г. в целом. Карта кинетической энергии за май 2018 г.
Fig. 5. Maps of the difference SST L3S–L4 by seasons 2018: A) winter, B) spring, C) summer, D) autumn, E) year 2018. Kinetic Energy Map for May 2018

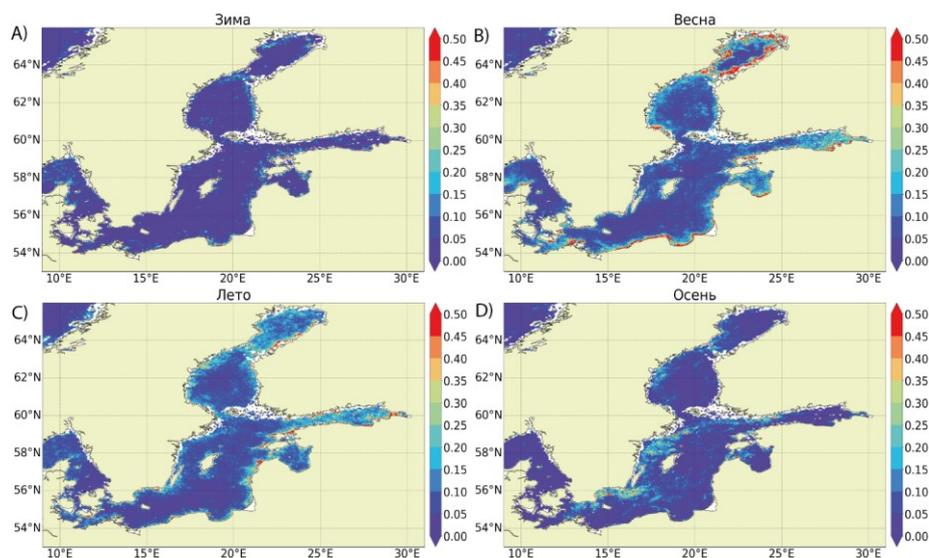


Рис. 6. Карты дисперсии разницы L3S-L4 по сезонам 2018 г.: А) зима, В) весна, С) лето, D) осень
Fig. 6. Maps of variance of the difference L3S-L4 by season, 2018: A) winter B) spring, C) summer, D) autumn

ВЫВОДЫ

Сопоставление спутниковых данных ТПМ L3S и L4 с данными стационарных измерений показывает, что как в данных ТПМ L3S, так и в данных ТПМ L4 наблюдаются ошибки по сравнению со стационарными данными. В ошибках наблюдается сезонная изменчивость, при которой температура занижается в период с февраля по июнь и завышается в период с июля по декабрь в целом по большому числу прибрежных станций бассейна Балтийского моря. Наибольшие абсолютные ошибки возникают с мая по июль. Присутствует также их пространственная изменчивость: наибольшие абсолютные ошибки наблюдаются по станциям на восточном побережье Ботнического залива, на входе в Финский залив, вблизи о. Сааремаа и в Рижском заливе. Ввиду большого расстояния между сравниваемыми парами данных спутника и мареографа до 25 км, полученные ошибки могут содержать пространственную изменчивость поля температуры, однако при уменьшении радиуса поиска не хватает данных для статистики.

Сопоставление полученных в настоящей работе результатов с материалами работ, где проводилась оценка точности по судовым и дрейферным наблюдениям [Hoyer, 2016] показывает, что в прибрежной зоне значения ошибок в данных L3S и L4 выше, чем в открытой акватории, где расположены судовые и дрейферные наблюдения. Это говорит о том, что данные ТПМ L3S и L4 могут иметь недостаточную точность в прибрежной акватории, и они не всегда могут быть использованы для решения научных и практических задач. Например, ошибка в данных ТПМ L3S и L4, наблюдаемая в зимний период, может приводить к некорректным результатам в воспроизведении ТПМ моделями морской циркуляции при усвоении данных и, соответственно, к некорректному расчету ледовых характеристик (сплоченности и толщины ледового покрова).

Сравнивая ТПМ L3S и L4, можно сделать вывод, что данные ТПМ L4 имеют несколько более высокую точность в сравнении со стационарными данными ТПМ L3S. Это позволяет сделать вывод о том, что использование данных по ТПМ L3S в целом имеет маленький практический смысл, т.к. данные имеют нерегулярное покрытие из-за облачности и в отдельные сезоны количество данных в целом может составлять не более 10–15 % от общей площади Балтийского моря. Данные ТПМ L4 имеют сопоставимую и более высокую точность, чем данные ТПМ L3S, при этом охватывают всю акваторию Балтийского моря и, таким образом, могут использоваться в большом спектре научных и практических задач.

Сопоставление данных ТПМ L3S и L4, разница их значений показывают, что наибольшие отклонения, а, следовательно, и наибольшая ошибка в данных по ТПМ наблюдается в прибрежных мелководных зонах, где точность спутниковых данных недостаточно высока, а также в областях интенсивной динамики вод, что подтверждается картами изменчивости кинетической энергии в приповерхностном слое моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Котлярова М. А., Буканова Т. В. Изменчивость температуры поверхности юго-восточной части Балтийского моря по спутниковым данным. Известия КГТУ, 2019. № 53. С. 51–60.
- Мысленков С. А., Кречик В. А., Соловьев Д. М. Анализ температуры воды в прибрежной зоне Балтийского моря по спутниковым данным и измерениям термокосы. Труды Гидрометцентра России, 2017. № 364. С. 159–169.
- Hoyer J. L., Karagali I. Sea surface temperature climate data record for the North Sea and Baltic Sea. Journal of Climate, 2016. V. 29. P. 2529–2541. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0663.
- Merchant C. J., Embury O., Bulgin C. E., Block T., Corlett G. K., Fiedler E., Good S. A., Mittaz J., Rayner N. A., Berry D., Eastwood S., Taylor M., Tsushima Y., Waterfall A., Wilson R.,

Donlon C. Satellite-based time-series of sea-surface temperature since 1981 for climate applications. *Scientific Data*, 2019. V. 6. P. 223. 18 p. DOI: 10.1038/s41597-019-0236-x.

Minnett P. J., Alvera-Azcárate A., Chin T. M., Corlett G. K., Gentemann C. L., Karagali I., Li X., Marsouin A., Marullo S., Maturi E., Santoleri R., Saux Picart S., Steele M., Vazquez-Cuervo J. Half a century of satellite remote sensing of sea-surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 2019. V. 233. P. 111366. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111366.

Minnett P. J., Kaiser-Weiss A. K. Group for high resolution sea-surface temperature discussion document: near-surface oceanic temperature gradients, 2012. 7 p.

Myslenkov S., Silvestrova K., Krechik V., Kapustina M. Verification of the Ekman upwelling criterion with in situ temperature measurements in the southeastern Baltic Sea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023. V. 11. No. 1. P. 179. DOI: 10.3390/jmse11010179.

O'Carroll A. G., Armstrong E. M., Beggs H. M., Bouali M., Casey K. S., Corlett G. K., Dash P., Donlon C. J., Gentemann C. L., Hoyer J. L., Ignatov A., Kabobah K., Kachi M., Kurihara Y., Karagali I., Maturi E., Merchant C. J., Marullo S., Minnett P. J., Pennybacker M., Ramakrishnan B., Ramsankaran R., Santoleri R., Sunder S., Saux Picart S., Vázquez-Cuervo J., Wimmer W. Observational needs of sea surface temperature. *Frontiers in Marine Science*, 2019. V. 6. P. 420. 27 p. DOI: 10.3389/fmars.2019.00420

Omstedt A., Nyberg L. Response of Baltic Sea ice to seasonal, interannual forcing and Climate change. *Tellus A*, 1996. V. 48. No. 5. P. 644–662.

She J., Hoyer J. L., Larsen J. Assessment of sea surface temperature observational networks in the Baltic Sea and North Sea. *Journal of Marine Systems*, 2007. V. 65. No. 1–4. P. 314–335.

REFERENCES

Hoyer J. L., Karagali I. Sea surface temperature climate data record for the North Sea and Baltic Sea. *Journal of Climate*, 2016. V. 29. P. 2529–2541. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0663.

Kotlyarova M. A., Bukanova T. V. Variability of surface temperature of the south-eastern part of the Baltic Sea according to satellite data. *Izvestia KSTU (KSTU News)*, 2019. No. 53. P. 51–60 (in Russian).

Merchant C. J., Embury O., Bulgin C. E., Block T., Corlett G. K., Fiedler E., Good S. A., Mittaz J., Rayner N. A., Berry D., Eastwood S., Taylor M., Tsushima Y., Waterfall A., Wilson R., Donlon C. Satellite-based time-series of sea-surface temperature since 1981 for climate applications. *Scientific Data*, 2019. V. 6. P. 223. 18 p. DOI: 10.1038/s41597-019-0236-x.

Minnett P. J., Alvera-Azcárate A., Chin T. M., Corlett G. K., Gentemann C. L., Karagali I., Li X., Marsouin A., Marullo S., Maturi E., Santoleri R., Saux Picart S., Steele M., Vazquez-Cuervo J. Half a century of satellite remote sensing of sea-surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 2019. V. 233. P. 111366. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111366.

Minnett P. J., Kaiser-Weiss A. K. Group for high resolution sea-surface temperature discussion document: near-surface oceanic temperature gradients, 2012. 7 p.

Myslenkov S. A., Krechik V. A., Soloviev D. M. Water temperature analysis in the coastal zone of the Baltic Sea based on thermistor chain observations and satellite data. *Trudy Gidrometcentra Rossii (Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia)*, 2017. No. 364. P. 159–169 (in Russian).

Myslenkov S., Silvestrova K., Krechik V., Kapustina M. Verification of the Ekman upwelling criterion with in situ temperature measurements in the southeastern Baltic Sea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023. V. 11. No. 1. P. 179. DOI: 10.3390/jmse11010179.

O'Carroll A. G., Armstrong E. M., Beggs H. M., Bouali M., Casey K. S., Corlett G. K., Dash P., Donlon C. J., Gentemann C. L., Høyer J. L., Ignatov A., Kabobah K., Kachi M., Kurihara Y., Karagali I., Maturi E., Merchant C. J., Marullo S., Minnett P. J., Pennybacker M., Ramakrishnan B., Ramsankaran R., Santoleri R., Sunder S., Saux Picart S., Vázquez-Cuervo J., Wimmer W. Observational needs of sea surface temperature. *Frontiers in Marine Science*, 2019. V. 6. Iss. 420. 27 p. DOI: 10.3389/fmars.2019.00420

Omstedt A., Nyberg L. Response of Baltic Sea ice to seasonal, interannual forcing and Climate change. *Tellus A*, 1996. V. 48. No. 5. P. 644–662.

She J., Høyer J. L., Larsen J. Assessment of sea surface temperature observational networks in the Baltic Sea and North Sea. *Journal of Marine Systems*, 2007. V. 65. No. 1–4. P. 314–335.

УДК: 912.4

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-617-631

И. А. Рыльский¹, Д. А. Парамонов², М. В. Грибок³, Р. В. Груздев⁴

МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАЛЕТА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИЯХ С ГОРНЫМ РЕЛЬЕФОМ

АННОТАЦИЯ

Выполнение лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки нуждается в тщательном планировании для обеспечения выполнения требований проекта, недопущения пропусков в данных и минимизации летного времени. Любая ошибка такого рода выливается в дополнительные затраты, измеряемые десятками процентов от возможной себестоимости проекта. Тем не менее, современные программные средства планирования залета показывают недостаточный уровень качества планирования по причине невозможности адекватно оценить расстояние от сенсоров на маршрутах до фактической поверхности рельефа. Максимально данный эффект проявляется в горных районах с сильно расчлененным рельефом. При использовании современных лазерных сканеров, работающих в режиме одновременного нахождения нескольких лазерных импульсов в воздухе, подобная недоработка может приводить и приводит к появлению пропусков в съемке, не покрытых данными. Вручную данная задача не может быть решена эффективно, что требует создания методик автоматизированного вычисления качества покрытия данными для всех возможных вариантов конфигураций лазерного сканирующего оборудования (зависит от фактической дальности прибора при выбранной частоте съемки). В данной работе описывается методика решения данной проблемы с использованием нового программного решения на базе ArcView, осуществляющего проверку подготовленного полетного плана на соответствие техническим условиям выполнения работ и полноту покрытия. Приведен пример фактически выполненного проекта на территории с высокогорным рельефом, даны примеры неприемлемых вариантов выполнения работ, обнаруженных описываемым методом. Приведенная методика может быть использована с любым видом существующих лазерных сканирующих систем и/или авиационных камер при условии предварительного ввода их возможных режимов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аэрофотосъемка, 3Д-точки, лазерное сканирование, горный рельеф, цифровая модель рельефа

-
- 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*: gribok.marina@gmail.com
- ⁴ Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения РАН, ул. Недорезова, д. 16а, Чита, Россия, 672002, *e-mail*: rogruzdev@mail.ru

Ilya A. Rylskiy¹, Dmitriy A. Paramonov², Marina V. Gribok³, Roman V. Gruzdev⁴

METHODOLOGY FOR PLANNING A FLIGHT WHEN CARRYING OUT AIR LASER SCANNING IN TERRITORIES WITH MOUNTAINOUS RELIEF

ABSTRACT

Laser scanning and digital aerial photography require careful planning to ensure project requirements are met, data gaps are avoided and flight time is minimized. Any error of this kind results in additional costs, measured in tens of percent of the possible cost of the project. However, modern flight planning software shows an insufficient level of planning quality due to the inability to adequately estimate the distance from the sensors on the routes to the actual terrain surface. This effect is most pronounced in mountainous areas with highly dissected terrain. When using modern laser scanners operating in the mode of simultaneous presence of several laser pulses in the air, such a defect can and does lead to the appearance of gaps in the survey that are not covered by data. This task cannot be solved effectively manually, which requires the creation of methods for automated calculation of the quality of data coverage for all possible configurations of laser scanning equipment (depending on the actual range of the device at the selected shooting frequency). This paper describes a method for solving this problem using a new software solution based on ArcView, which checks the prepared flight plan for compliance with the technical conditions of the work and completeness of coverage. An example of an actually completed project in a territory with high mountainous terrain is given, as well as the examples of unacceptable options for performing work discovered by the described method. The presented technique can be used with any type of existing laser scanning systems and/or aircraft cameras, provided that their possible modes are first entered.

KEYWORDS: aerial photography, 3D points, laser scanning, mountainous terrain, digital elevation model

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы планирования залетов на территориях с сильно расчлененным рельефом

Воздушное лазерное сканирование — наиболее точный и совершенный метод дистанционного зондирования, применяемый на сегодняшний день для широкого круга задач. Появившись в конце 1990-х гг., метод прочно занял нишу наиболее детальных съемок под м-б 1: 2 000–1: 500 и является практически незаменимым при работах на территориях, полностью или частично покрытых растительностью. Метод основан на определении координат точки отражения лазерного луча по дальности (определяется по времени прохождения сигнала от лазерного излучателя до объекта и обратно, умноженному на скорость света в воздухе) и элементам внешнего ориентирования, которые определяются аппаратным способом с использованием приемников ГНСС и беспилотных инерциальных систем высокой точности (точность определения угловых элементов — до 0,003° и лучше).

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:* gribok.marina@gmail.com

⁴ Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 16a, Nedorezova str., Chita, 672002, Russia, *e-mail:* rogruzdev@mail.ru

Вышеописанные аппаратные средства лазерного сканирования и современные программные решения для ортотрансформирования фотоснимков и позиционирования точек лазерных отражений позволяют работать в сколь угодно сложных условиях рельефа даже без применения гиостабилизированных платформ. В настоящее время подавляющая часть аэросъемочных работ ведется методом воздушного лазерного сканирования, при этом одновременно со сканированием выполняется цифровая аэрофотосъемка в видимом и/или ближнем инфракрасном диапазонах. Требования технических заданий обычно строятся по критериям «число точек лазерных отражений на 1 м²» и «размер пиксела на поверхности рельефа».

Лазерные сканеры за прошедшие 25 лет увеличили скорость работы в 800 раз — от 5 тыс. точек в секунду в 2000 г. до 4 млн точек в секунду в 2024 г., разрешение матриц цифровых камер возросло с 6 до почти 420 мегапикселей. Это позволяет получать превосходные результаты с высокой подробностью, производительностью и точностью. Однако средства планирования аэросъемочного залета, которые применялись в конце 1990-х гг., практически не претерпели изменений. Повышение качества результатов съемки и надежности планирования залета требует изменения методики построения полетных съемочных планов.

Существующие подходы и их недостатки

Существующее программное обеспечение для планирования аэросъемочных залетов пилотируемой авиации (когда работа ведется с высот от 300 до 5 000 м) позволяет оценить фактическую полосу охвата съемки с использованием подгружаемых цифровых моделей рельефа. В качестве таковых обычно используются ЦМР открытого пользования — SRTM, AsterDEM, AW3D30 (иногда называемый ALOS DEM). Данные модели хорошо подходят для выполнения залетов с большой высоты, но не слишком пригодны для планирования полетов беспилотных летательных аппаратов (БВС). Общей чертой недостатков планирования полетов является то, что все известные программы для планирования при расчете элементов изображения оперируют высотой оси съемки над рельефом, описанным данной ЦМР, из которой строится оценка высоты полета для фотокамеры (в момент открытия затвора) и оценка полосы охвата (по ширине) как фотоснимков, так и лазерного сканирования. Важнейшим недостатком подобного подхода является отсутствие сведений об удаленности участков местности до сенсоров в момент съемки.

При полете по равнинной местности различия в дистанции до поверхности присутствуют, но не являются существенными. Так, при работе с сенсорами (неважно, фотографическими или лазерными) с углом охвата в 60° (типичное значение для крупноформатных универсальных устройств) и поперечном перекрытии в 30 % [Руководство..., 1986, 1989] различия в удаленности точек на краю полосы съемки и непосредственно невелики, и обычно не превышают 7–12 %. Напротив, при полете в горах высота по нормали от сенсора до поверхности может очень сильно отличаться от минимальных и максимальных значений удаления точек поверхности от сенсора. Рассмотрим на примере, приведенном на рис. 1.

В условиях равнинного рельефа (рис. 1А) при высоте полета над рельефом в 1 000 м производится съемка с двух параллельных треков (треки 1 и 2, мы видим их как бы «с торца»). В работе используется камера с углом охвата 60° и фокусным расстоянием 1 000 пикселей, что дает нам размер одного пиксела в 10 см при съемке в надири. Нетрудно видеть, что максимальная дистанция между сенсором и рельефом в пределах одного трека колеблется от 1 000 м (в надири) до 1 150 м (на краю полосы съемки). Это означает, что и детальность съемки на краю будет уже не 10, а 11,5 см, что на 15 % хуже ожидаемого результата. С учетом 30 % перекрытия между соседними проходами, реальная макси-

мальная дальность будет меньше — 1 077 м, т. е. 10,8 см, или 7,7 %. В целом, хотя отличия и есть, они не носят характер кардинальных.

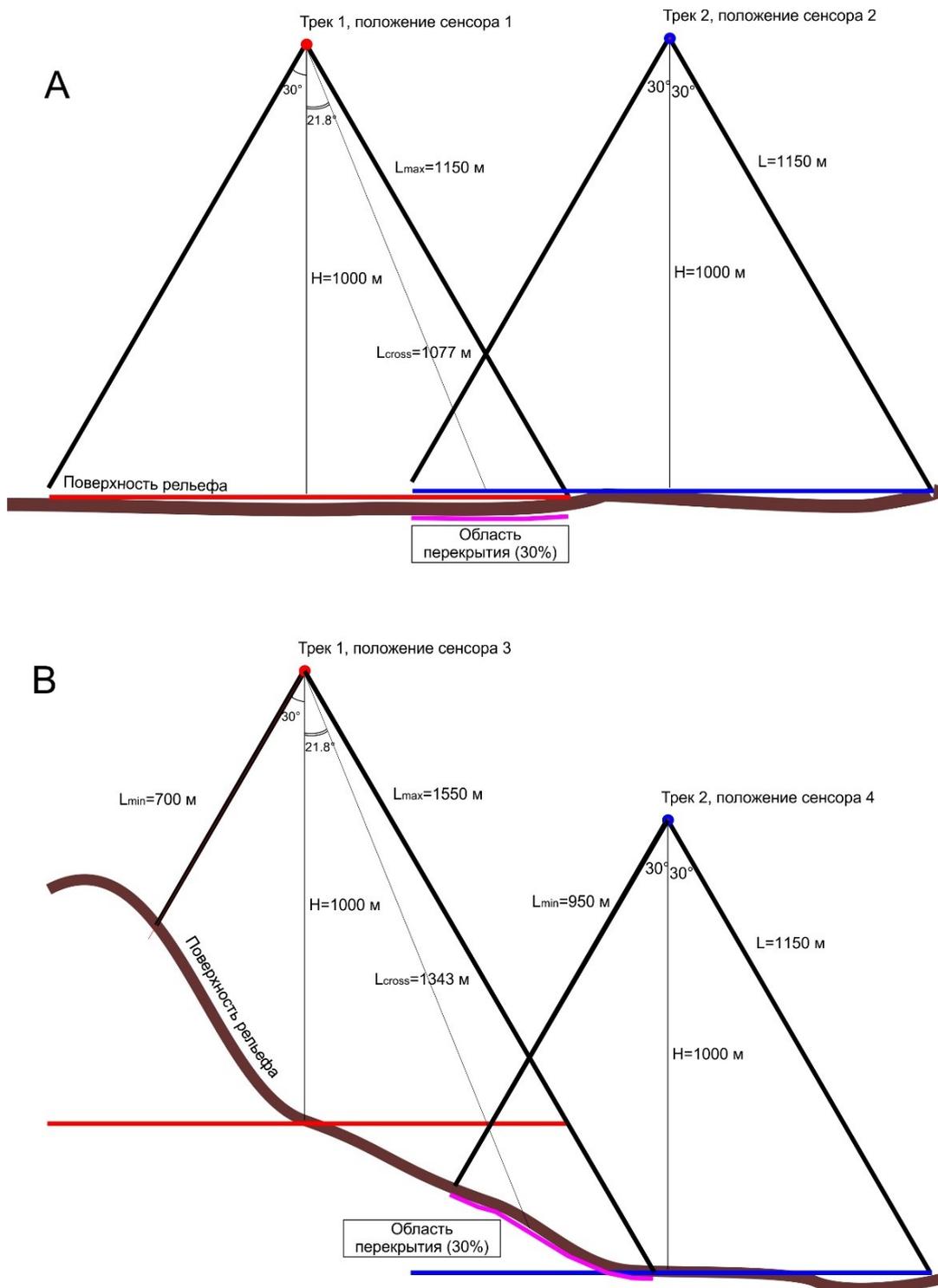


Рис. 1. Изменения минимальной и максимальной дистанции от сенсоров до поверхности в условиях равнинной (A) и горной (B) местности
Fig. 1. Changes in the minimum and maximum distance from sensors to the surface in flat (A) and mountainous (B) terrain

Все меняется в условиях горной местности, особенно в тех случаях, когда перепад высот на съемочном маршруте начинает составлять более чем 20 % от номинальной высоты над рельефом [Lague et al., 2013]. Сохраняя (номинально) ту же высоту над рельефом в надирной точке и обеспечивая то же поперечное перекрытие на местности (30 %), мы видим, что в условиях пологих склонов (около 20°, рис. 1В, положение сенсора 4) диапазон дальностей меняется от 950 до 1 150 м, т. е. на 20 %. В условиях съемки на уклонах 30° и более (рис. 1В, положение сенсора 3) диапазон значений колеблется от 700 до 1 550 м, т. е. на 850 м. Нетрудно видеть, что и размер пиксела в этом случае колеблется от 7 до 15,5 см, что, скорее всего, будет неприемлемо. Разброс значений в диапазоне, равном 85 % от номинала, не только ухудшает общее качество работ, но и крайне затрудняет оценку полетного плана на этапе его разработки.

Интерфейс современных планировщиков полетов (например, IGI PLAN) позволяет увидеть эффекты изменения ширины полосы охвата, полосы зоны перекрытия и пр., однако не позволяет оценить масштаб вышеописанных «скачков» качества снимаемых материалов.

Идентичные эффекты наблюдаются и в части лазерного сканирования с той разницей, что меняется не размер пиксела, а плотность сканирования, измеряемая числом отражений на 1 м² [Рыльский, Груздев, 2022]. В приведенном примере отличия этой плотности (в процентах) будут обратно пропорциональны дистанции, и составят от 64 до 141 %, что также неприемлемо.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район работ и планирование стандартным способом

Для решения вышеописанной проблемы неоднозначности результатов планирования аэрофотосъемочных залетов в части качества и подробности материалов было принято решение разработать систему проверки создаваемых летных планов на соответствие исходным предъявляемым требованиям. Создание системы проверки происходило с использованием ГИС на базе ArcView. В качестве исходного программного продукта использовался планировщик полетов IGI PLAN, поставляемый в составе программно-аппаратных комплексов воздушного лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки RIEGL серий 560, 680, 780.

В качестве одного из проектов съемки был выбран участок, расположенный на территории горно-туристического кластера Архыз (рис. 2). Выполнение работ производилось в начале июня 2023 г. Полеты выполнялись с использованием воздушного судна типа Ан-2. Съемка велась с использованием воздушного лазерного сканера RIEGL LMS Q680i, оснащенного среднеформатной авиационной камерой IGI DIGICAM H60 (60 мегапикселей), с фокусным расстоянием 50 мм (размер матрицы 52,4 x 41,2 мм). Угловой охват лазерной сканирующей системы — 60°, камеры с данным объективом — 57,8°. Гиростабилизирующая платформа не применялась.

Район работ имеет площадь в 4 100 га, перепад высот от 1 640 до 3 134 м. Территория работ расположена на территории Республики Карачаево-Черкесии, характеризуется крайне расчлененным рельефом альпийского типа, а также наличием разнонаправленных склонов и отрогов, что исключает возможность планомерного набора высоты при съемке. Основная целевая высота съемки была определена как 800 м над поверхностью рельефа. Посмотрев на гипсометрическую карту (рис. 3) района, нетрудно видеть, что проложение осевых линий полетных маршрутов невозможно без наличия крайне больших перепадов высот как вдоль оси каждого из треков, так и поперек [Тикунов, Рыльский, 2020]. Результат стандартного моделирования представлен на рис. 4, где хорошо видно, что полоса охвата падает при уменьшении относительной высоты над рельефом, однако численно оценить эти значения не представляется возможным.



Рис. 2. Район работ для отработки методики проверки летного плана
Fig. 2. Work area for testing the flight plan verification methodology

Проблема МТА-зон

Частота испускания лазерных импульсов лазерных сканером имеет определенные ограничения, причем не только технические. Если лазерный сканер работает в режиме «1 импульс в воздухе» (пока не принят предыдущий импульс, следующий не будет выпущен), то частота импульсов ограничена скоростью света. Допустим, съемка ведется с высоты в 1 000 м. Пробег импульса туда и обратно — это уже 2 000 м. Скорость света в воздухе при этом округленно может быть приравнена к 300 000 км/с (в действительности несколько меньше). Таким образом, более 150 000 подобных пробега лазера туда и обратно в упомянутом выше режиме «1 импульс в воздухе» сделать не получится. Это количество — 150 000 точек в секунду — будет пределом. Таким образом, получается, что на частоте 150 000 точек в секунду (или 150 кГц) можно работать в диапазоне высот от 0 до 1 000 м. С ростом высоты этот предел падает: при высоте полета 1 500 м максимальная теоретически возможная высота сканирования упадет до 100 000 точек в секунду. Диапазон высот при этом составит от 0 до 1 500 м.

Тем не менее, современные лазерные сканирующие системы имеют существенно большую высоту и частоту работы [Janowski et al., 2015]. Каким путем это достигается? Система переводится в режим «несколько импульсов в воздухе» (когда последующий импульс испускается не дожидаясь прихода предыдущего). Например, при двух импульсах, находящихся одновременно в воздухе, частота сканирования на высоте 1 000 м может быть повышена в 2 раза, достигнув 300 000 точек в секунду. При этом работа в таком режиме (2 импульса в воздухе) возможна в диапазоне от 500 до 1 000 м. Ниже 500 м необходимо вернуться к режиму «1 импульс в воздухе». В диапазоне высот 1 000–1 500 м на такой частоте нужно использовать уже режим «3 импульса в воздухе», и т. д.

Означенный выше диапазон высот для каждого из режимов съемки в англоязычной литературе называется «МТА-zone», или «Multiple turn-around zone» [Rieger, 2014]. В приведенном примере для частоты 300 кГц толщина каждой МТА-зоны равна 500 м.

По мере роста частоты сканирования «толщина» МТА-зоны уменьшается. Так, для 400 кГц ее толщина падает до 375 м. Как видим, на приведенном полетном плане практически невозможно выдержать относительную высоту в пределах одной МТА-зоны даже в пределах оси полета.

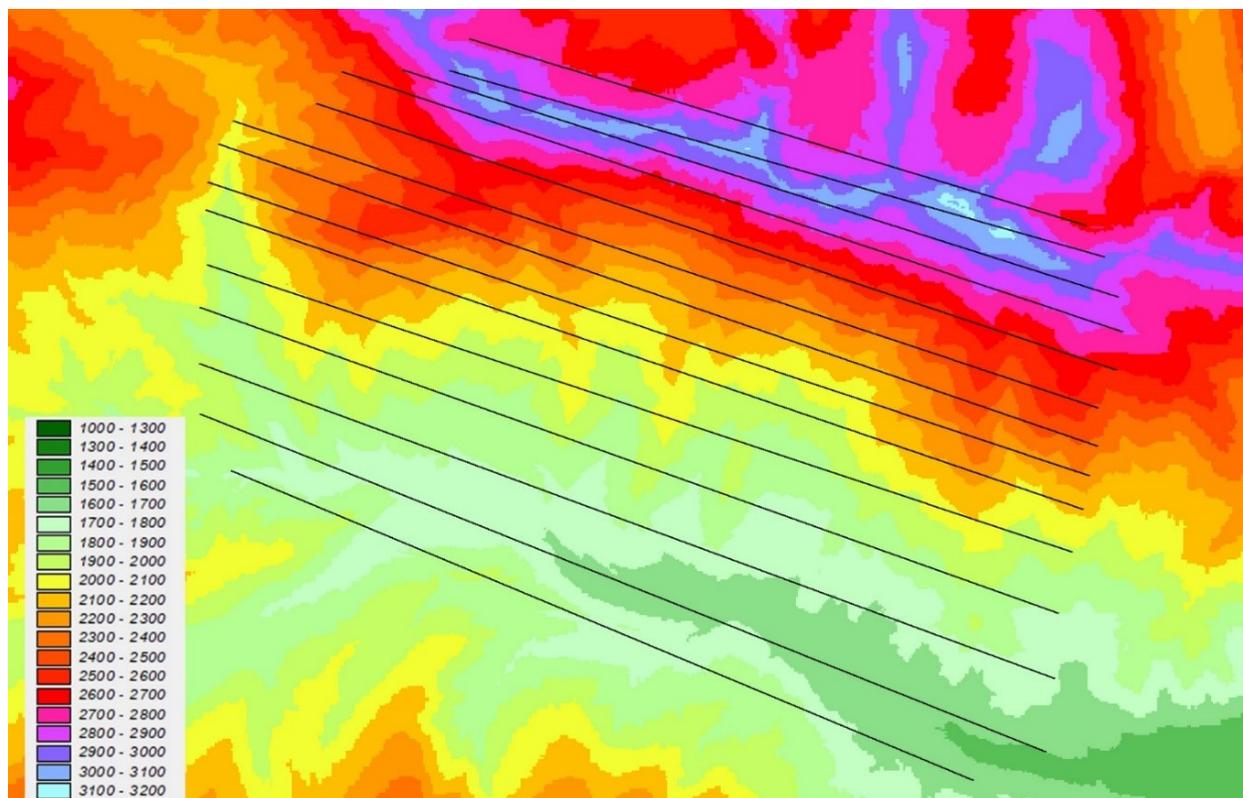


Рис. 3. Гипсометрическая карта района работ и оси планируемых съемочных маршрутов
Fig. 3. Hypsometric map of the work area and the axis of the planned survey routes

Первые лазерные системы, имеющие возможность работы в режиме нескольких МТА-зон, имели жесткое ограничение в виде работы только в одной МТА-зоне в пределах одного маршрута. Современные системы, используя неравномерность временных интервалов между лазерными импульсами и ряд специализированных алгоритмов [Rieger, Ullrich, 2011], позволяют корректно определить для любого лазерного импульса его правильную МТА-зону, распределив точки в пространстве. Однако особенности этих методов состоят в том, что стык между двумя соседними МТА-зонами является «мертвой зоной», в которой не регистрируются никакие отражения. Для приведенного выше примера с частотой 300 кГц это будет выглядеть так:

- 1-я МТА-зона — от 0 до 470 (а не 500) м;
- 2-я МТА-зона — от 530 (не от 500) до 970 (а не 1000) м.

Диапазон дальностей от 470 до 530 м не будет при этом регистрироваться никак.

Обратим внимание, что все вышесказанной относится к высоте в надире, т. е. к дальности. Как следует из рис. 1, дальность на краях будет иной, и вполне возможна ситуация, когда участки под сенсором оказываются в одной МТА-зоне, а края — уже в другой, при этом где-то между ними располагается «мертвая зона», в которой данных лазерного сканирования просто нет.

Отметим, что ни один из пакетов для планирования летных работ с использованием лазерных сканеров не только не предупреждает о возможности возникновения подобных

ситуаций в подготовленном летном плане, но и не дает сведений о реальных дистанциях от сенсоров до поверхности (рис. 4).

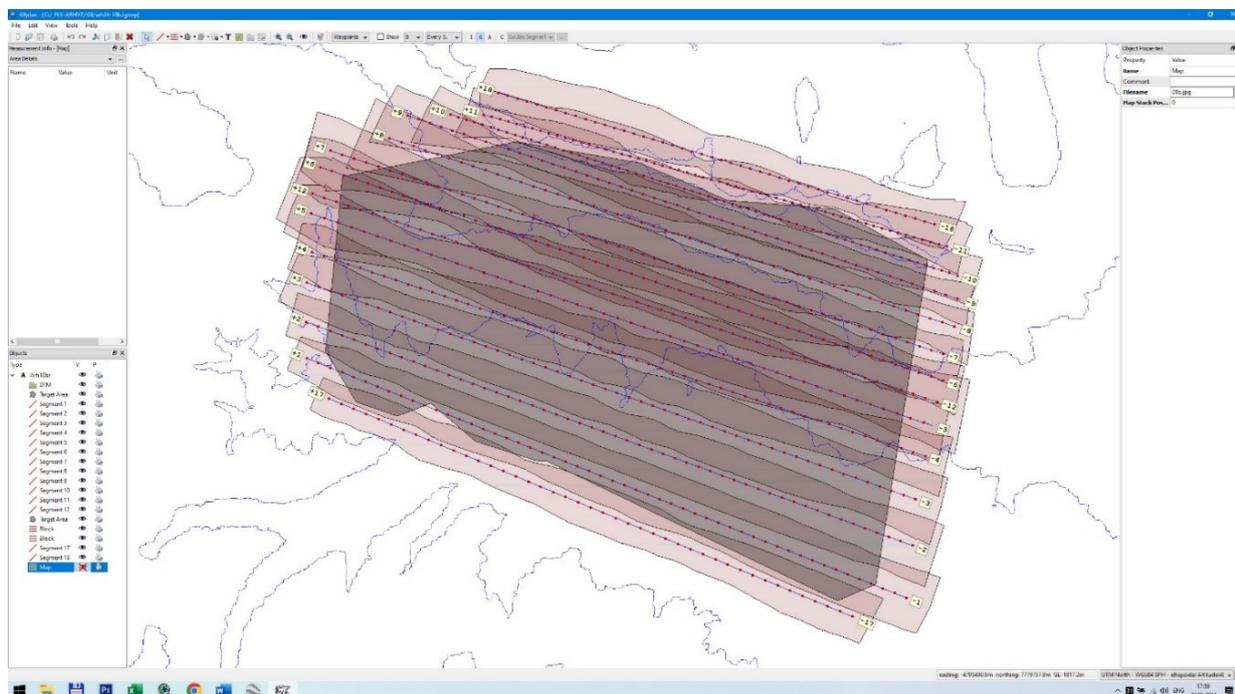


Рис. 4. Результат моделирования в IGI PLAN полос охвата съемкой с использованием ЦМР и положения осей полета. Сведения о реальной дистанции до поверхности отсутствуют
Fig. 4. The result of modeling in IGI PLAN survey coverage bands using DEM and the position of the flight axes. There is no information about the actual distance to the surface

Подобная особенность присуща значительной доле сканеров, находящихся в данный момент в эксплуатации на территории РФ. В условиях горного рельефа данная особенность приводит либо к появлению огромного количества довольно крупных «дыр» в покрытии данными (размер «дыр» при этом составляет десятки или даже сотни метров), либо к очень большому дополнительному налету для их перекрытия. И то, и другое крайне неэффективно, ведет к росту себестоимости и затягиванию сроков работ.

Возможный путь решения проблемы

Принимая во внимание вышеописанные сложности, а также тот факт, что отсутствие решения упомянутых проблем приведет к немедленным и ощутимым убыткам при реализации проектов, было принято решение о создании собственного программного обеспечения, реализующего следующие функции:

- на входе программное обеспечение должно использовать готовый полетный план в формате IGI PLAN (оси маршрутов съемки с сохранением их атрибутов и высот полета);
- должна использоваться та же цифровая модель рельефа, что и при создании полетного плана, при этом размер одной ячейки модели желательно должен быть не более 30 м (этому требованию удовлетворяют все открытые модели ЦМР, кроме SRTM (в варианте детальности 3 угловых секунды));

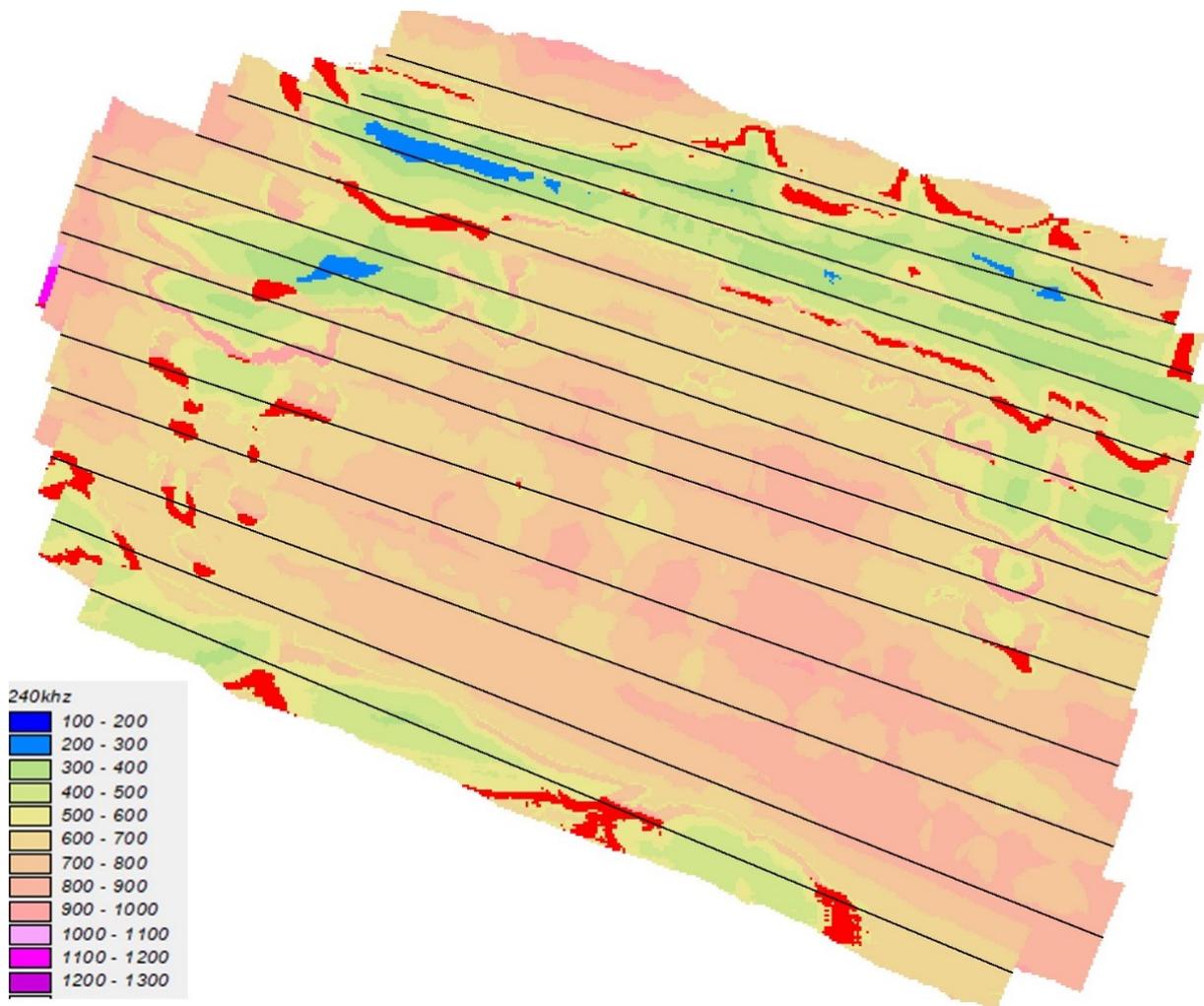
- пользователь выбирает необходимый сценарий съемки (частота и угол лазерного сканирования) и параметры фотокамеры (фокусное расстояние в пикселах);
- на выходе программная среда должна предлагать в наглядной форме результат расчетов, включающий итоговое распределение дистанций от сенсоров до поверхности, плотности сканирования (в точках на 1 м²) и размера пиксела на поверхности рельефа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Описанная выше задача является достаточно характерной по своему типу для задач геоинформатики, т. к. использует работу с большим количеством пространственных данных [Капралов и др., 2004]. Разработка программного средства для оценки дистанции от сенсоров до поверхности и получения прочих производных вариантов производилась на базе ГИС пакета ArcView, с использованием встроенного языка программирования Avenue. Выходные данные из IGI PLAN могут быть представлены в виде линейного файла формата ArcView Shape (*.shp). Алгоритмически программа строится следующим образом:

1. В качестве констант введены границы МТА-зон и предельная дальность измерений для каждого из режимов сканирования в диапазоне от 80 до 400 кГц с шагом в 10 кГц, всего 33 варианта. Источник информации — официальный производитель оборудования.
2. В качестве константы можно ввести угол сканирования (по умолчанию — 60° (по 30° отклонения от надира)), а также фокусное расстояние камеры в пикселах (предполагается, что охват лазерного сканера и фотокамеры идентичен, но вообще говоря, это необязательно).
3. В качестве вводной информации вводятся линии маршрутов из IGI PLAN и использованная при планировании ЦМР.
4. В процессе расчетов для каждого режима сканирования определяется максимальная дальность действия сканера (см. п. 1), определяется максимальная ширина полосы сканирования при максимальном угле охвата; в пределах этой полосы строится грид дистанций до осевой линии (горизонтальное проложение), из которого для каждой точки грида вычисляется угол отклонения луча и фактическая дистанция от текущего пиксела ЦМР до сенсора (на линии маршрута). Таким образом, для каждого маршрута строится грид дистанций от поверхности до сенсора.
5. Для каждого из маршрутов процедура повторяется. В конце массив гридов дистанций сливается в единую мозаику гридов. Если при этом на один и тот же участок попадает два и более гридов дистанции, то выбор делается в пользу грида с минимальной дистанцией (т. е. варианта съемки, дающего максимально плотное и качественное облако точек, либо максимально детальные снимки).
6. Итоговый грид дистанций используется для перевычисления размера пиксела на поверхности рельефа (GSD) и для расчета плотности точек лазерного сканирования. Результатом расчетов являются 3 грида — грид дистанций, грид плотности точек лазерных отражений и грид размеров пиксела.
7. Описанные процедуры производятся для каждого из выбранных режимов сканирования.

В качестве примера приведем результаты применения данного программного решения на территории Архыза. Был произведен расчет результатов покрытия данными для двух режимов работы — 240 кГц (рис. 5) и 140 кГц (рис. 6).



*Рис. 5. Результат расчета дистанций для режима сканирования 240 кГц.
Красным цветом отмечены «мертвые зоны» между МТА-зонами
в выбранном режиме. На данных участках данные сняты не будут.
Режим работы для разработанного полетного плана непригоден
Fig. 5. The result of calculating distances for the 240 kHz scanning mode.
“Dead zones” between MTA zones in the selected mode are marked in red.
No data will be collected in these areas. The operating mode
is unsuitable for the developed flight plan*

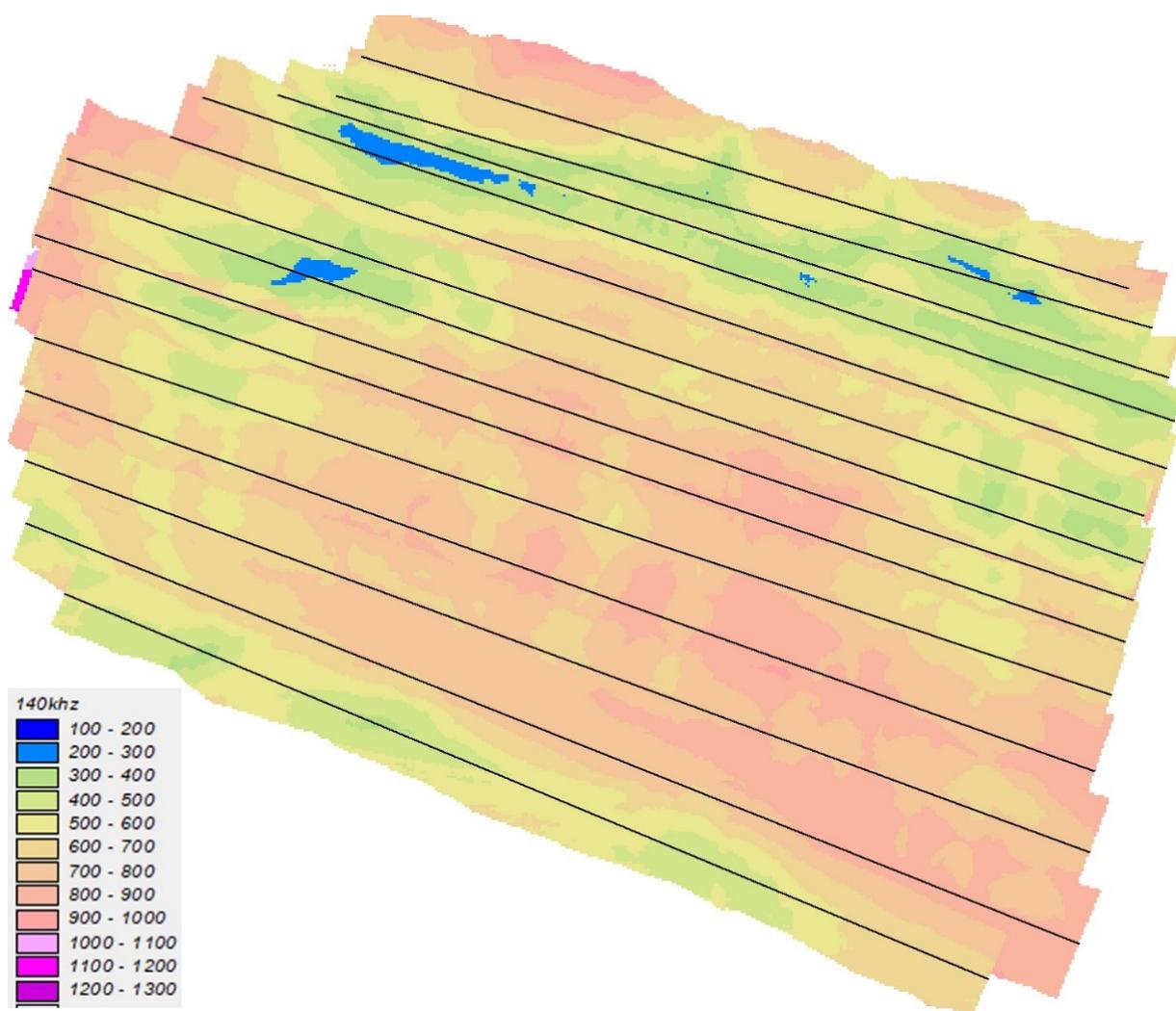


Рис. 6. Результат расчета дистанций для режима сканирования 140 кГц. Красным цветом отмечены «мертвые зоны» между МТА-зонами в выбранном режиме, таковых участков нет. Режим работы для разработанного полетного плана полностью пригоден

Fig. 6. The result of calculating distances for the 140 kHz scanning mode. "Dead zones" between MTA zones in the selected mode are marked in red; there are no such areas. The operating mode for the developed flight plan is completely suitable

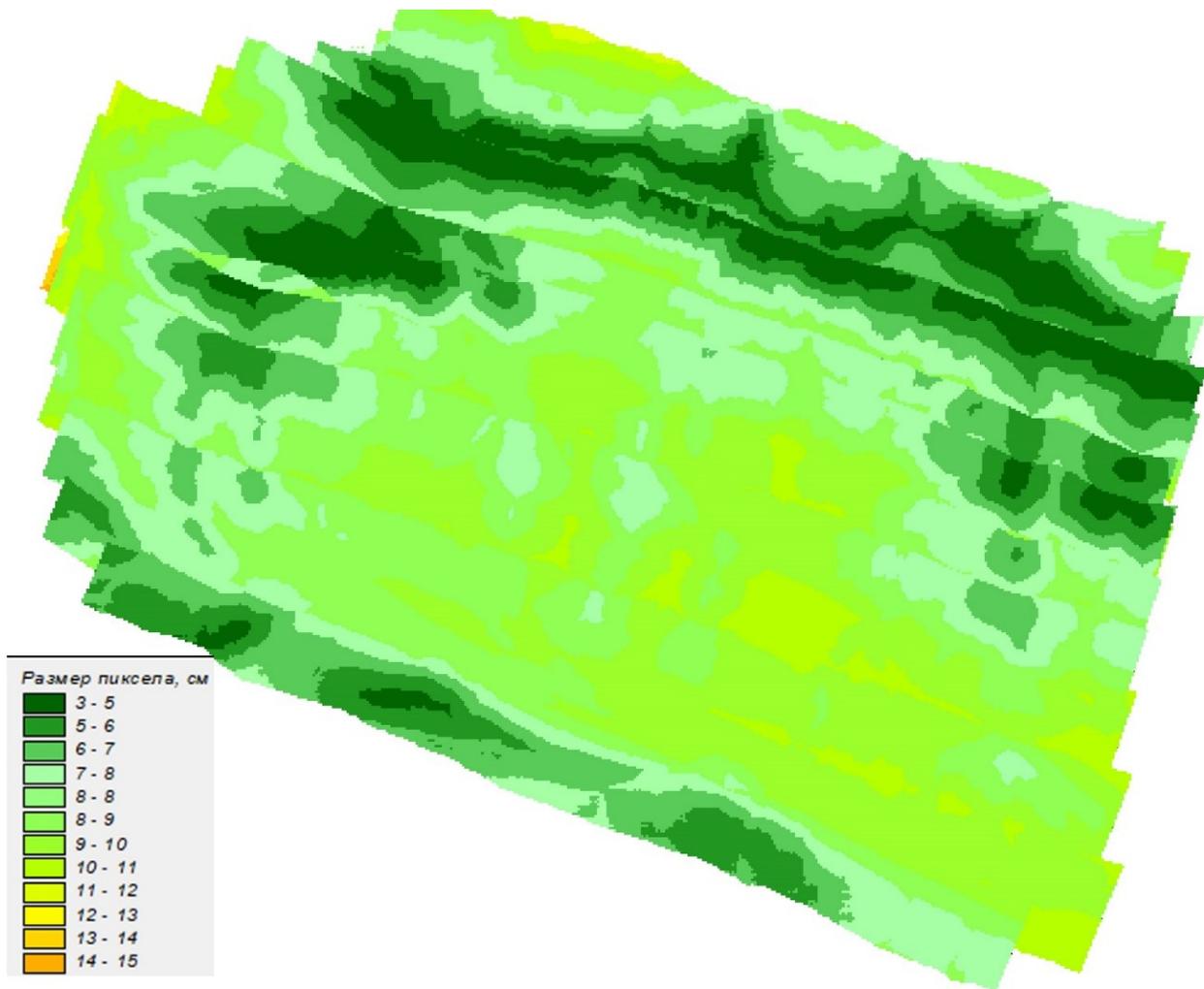


Рис. 7. Результат расчета GSD (размер пиксела на поверхности земли) для разработанного полетного плана. Все участки территории покрыты снимками с разрешением не хуже 14 см. План работы пригоден
Fig. 7. The result of the GSD (ground pixel size) calculation for the developed flight plan. All areas of the territory are covered with images with a resolution of at least 14 cm. The work plan is suitable

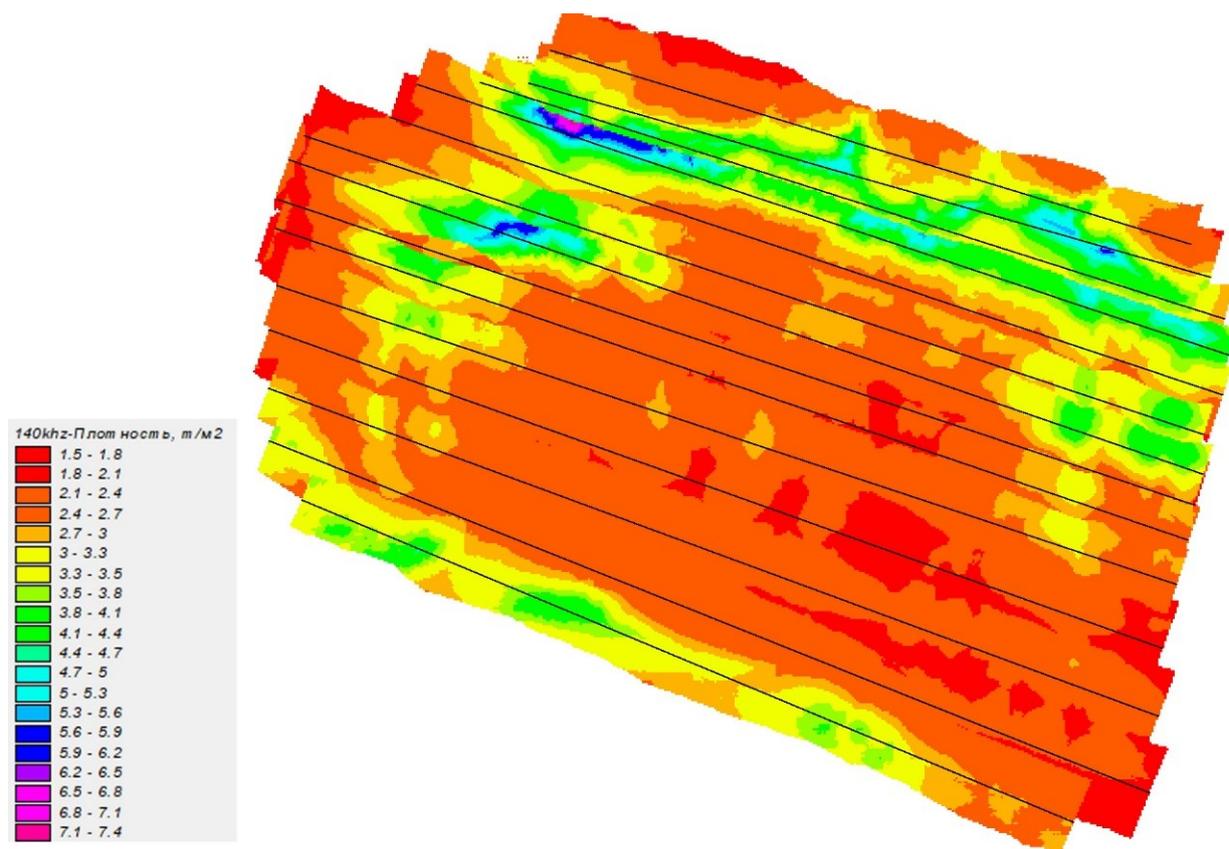


Рис. 8. Результат расчета плотности точек отражений для режима сканирования 140 кГц. Минимальная плотность облака составляет 1.5 точек на 1 м², что полностью удовлетворяет условиям технического задания. Режим работы для разработанного полетного плана полностью пригоден

Fig. 8. The result of calculating the density of reflection points for the 140 kHz scanning mode. The minimum cloud density is 1.5 points per 1 m², which fully satisfies the terms of the technical specifications. The operating mode for the developed flight plan is completely suitable

Как наглядно следует из приведенных рисунков, режим 240 кГц не подходит для работы по созданному летному плану из-за обилия пропущенных участков, попадающих в «мертвые зоны». Решений тут может быть два — либо сделать другой полетный план, либо попробовать использовать другой частотный режим сканирования. Если техническое задание позволяет изменить частоту, то оказывается, что наиболее приемлемым результатом является работа на частоте 140 кГц. Действительно, в этом режиме положение «мертвых зон» оказывается вне поверхности рельефа, и результаты полностью пригодны для работы. Проверим данный полетный план на соответствие требованиям такие параметры, как размер пиксела на поверхности рельефа (рис. 7) и плотность точек отражений (рис. 8). Как мы видим, оба этих параметра также имеют удовлетворительные значения по всей территории работ.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что выбранный частотный режим в сочетании с разработанным полетным планом является полностью пригодным для решения всех задач, стоящих перед организаторами съемок.

В случае несоответствия каких-либо из параметров требуемым возможны следующие решения:

- изменение исходного полетного плана (изменение высоты съемочных маршрутов, измерение положения съемочных маршрутов в плане, дополнительные проходы, двойное прохождение по одним и тем же маршрутам);
- попытка подобрать иную частоту сканирования.

Ожидаемая точность приведенных на рисунках результатов моделирования, конечно же, зависит от детальности и высотной точности ЦМР. Как уже было упомянуто, рекомендованный размер ячейки ЦМР составляет 30 м или лучше, при этом высотная точность различных моделей может колебаться от 3–4 до 10–12 м (2 сигма). Уменьшение размера ячейки ЦМР улучшает детальность результатов, однако не имеет существенного практического смысла по определенной причине. Приобретение коммерческих моделей ЦМР, созданных по спутниковым данным и имеющих универсальное назначение, не представляется целесообразным [Dare, 2005].

Как бы точно ни был запроектирован план полета, он не может быть точно соблюден на практике. Точность пилотирования самолета (как в плане, так и по высоте) составляет 20–30 м, что сопоставимо с размером ячейки ЦМР. Таким образом, нет смысла утяжелять модель расчетов излишне детальными моделями рельефа, зная, что результаты подобного планирования все равно будут нереализуемы.

ВЫВОДЫ

Результатом данной работы явилось создание и практическая апробация методики проверки аэросъемочного залета при проведении воздушного лазерного сканирования на территориях с горным рельефом с использованием. Методика включает в себя проверку подготовленного полетного плана на соответствие критериям:

- полнота покрытия территории данными лазерного сканирования при использовании выбранного режима работы сканера (с учетом рельефа, МГА-зон и максимальной регистрируемой дальности лазерных измерений в выбранном режиме);
- плотность точек лазерных отражений (точек на 1 м²);
- размер пиксела фотокамеры (см. на пиксел).

Получен результат в виде автоматизированного программного комплекса, выполняющего пакетную обработку расчетов сразу для группы в несколько десятков вариантов режимов.

Приведенная методика в течение 2023–2024 гг. использована на 5 проектах воздушного лазерного сканирования в таких регионах, как Карачаево-Черкесия, Якутия, Амурская область, Забайкальский край, Краснодарский край. Все полеты, где данная методика была использована, прошли без пропусков в данных и позволили сэкономить до 30 % летного времени. Подход рекомендуется при работе с использованием как лазерных сканеров, так и фотокамер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Капралов Е. Г., Кошкарев А. В., Тикунов В. С. Основы геоинформатики. Учебное пособие для студентов вузов в 2-х книгах. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 480 с.

Руководство по аэрофотосъемке в картографических целях. Военно-топографическое управление Генерального Штаба. М.: Редакционно-издательский отдел, 1989. 105 с.

Руководство по аэрофотосъемочным работам. Министерство гражданской авиации. М., 1986. 176 с.

Рыльский И. А., Груздев Р. В. Применение воздушных лидаров в высокоточной гравиметрии (на примере Восточного Забайкалья). Вестник Забайкальского государственного университета, 2022. Т. 28. № 2. С. 6–18.

Тикунов В. С., Рыльский И. А. Подходы к определению толщины снежного покрова с использованием лазерного сканирования. Геодезия и картография, 2020. № 8. С. 28–41.

Dare M. Shadow analysis in high-resolution satellite imagery of urban areas. Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 2005. P. 169–177 (in Russian). DOI: 10.14358/PERS.71.2.169.

Janowski A., Szulwic J., Tysiac P. Airborne and mobile laser scanning in measurements of sea cliffs on the southern Baltic. 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 2015. P. 114–124.

Lague D., Brodu N., Leroux J. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ). ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013. No. 82. P. 10–26.

Rieger P. Range ambiguity resolution technique applying pulse-position modulation in time-of-flight scanning lidar applications. Optical Engineering, 2014. No. 53(6). 061614.

Rieger P., Ullrich A. Resolving range ambiguities in high-repetition rate airborne lidar applications. Proceedings of SPIE 8186. Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies and Applications, 2011. P. 562–574.

REFERENCES

Aerial photography guide. Moscow: Ministry of Civil Aviation, 1986. 176 p. (in Russian).

Dare M. Shadow analysis in high-resolution satellite imagery of urban areas. Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 2005. P. 169–177 (in Russian). DOI: 10.14358/PERS.71.2.169.

Guidance aerial photography for cartographic purposes. Military topographic administration of High Command. Moscow: Publishing Department, 1989. 105 p. (in Russian).

Janowski A., Szulwic J., Tysiac P. Airborne and mobile laser scanning in measurements of sea cliffs on the southern Baltic. 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 2015. P. 114–124.

Kapralov E. G., Koshkarev A. V., Tikunov V. S. Fundamentals of geoinformatics. Moscow: Publishing House “Academy”, 2004. 480 p. (in Russian).

Lague D., Brodu N., Leroux J. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ). ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013. No. 82. P. 10–26.

Rieger P. Range ambiguity resolution technique applying pulse-position modulation in time-of-flight scanning lidar applications. Optical Engineering, 2014. No. 53(6). 061614.

Rieger P., Ullrich A. Resolving range ambiguities in high-repetition rate airborne lidar applications. Proceedings of SPIE 8186. Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies and Applications, 2011. P. 562–574.

Rylskiy I. A., Gruzdev R. V. Application of aerial lidar in high-precision gravity prospecting (based on the example of Zabaikalie Region). Transbaikalian State University Journal, 2022. V. 28. No. 2. P. 6–18 (in Russian).

Tikunov V. S., Rylskiy I. A. Approaches to determination of snow coverage thickness using LIDAR. Geodesy and Cartography, 2020. No. 8. P. 36–45 (in Russian).

А. К. Коваленко¹, С. А. Тесленок², Л. Г. Калашникова³, О. Ф. Богдашкина⁴,
П. С. Дмитриев⁵, А. А. Скурихин⁶, И. А. Фомин⁷

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ ДЛЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АЭРОФОТОСЪЕМОЧНЫХ РАБОТ ПРИ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЯХ

АННОТАЦИЯ

В представленной работе приводится опыт совместного применения методов позиционирования высокой точности и стандартных программ постобработки для обеспечения геодезического сопровождения аэрофотогеодезических работ в процессе осуществления инженерных изысканий в нефтегазовом секторе для определения координат и высот контрольных точек на примере протяженного линейного сооружения, расположенного в сложных физико-географических условиях в районе Байкало-Амурской магистрали. Для решения задачи уточнения стандартной модели геоида на основе значений нормальных высот исходных пунктов с использованием геоинформационных технологий в ГИС с открытым объектным кодом QGIS была создана локальная пространственная геоинформационная модель поправок — модель поверхности разности нормальных и эллипсоидальных высот исходных пунктов, полученная в системах координат объекта работ для всего участка. Анализ результатов работ показал, что современные ГИС с их математическим аппаратом и развитые геоинформационные технологии позволяют создавать локальные модели геоидов, полностью отвечающие особенностям территории производства работ. Они необходимы, поскольку в используемых программах постобработки заложена стандартная модель геоида, не учитывающая локальные факторы изменения геоида для конкретных территорий. Применение предлагаемого в статье метода позволяет значительно упростить процессы логистики при выполнении геодезических работ, одновременно не снижая их точности. На всех этапах произведенных работ были задействованы возможности и применен инструментарий современных

¹ ГУП «Леноблинвентаризация», Невский пр-т, д. 113/4, Санкт-Петербург, Россия, 191024,
e-mail: alex_kov@mail.ru

² Югорский государственный университет, Высшая экологическая школа, ул. Чехова, д. 16, Ханты-Мансийск, Россия, 628012, *e-mail: teslserg@mail.ru*

³ Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, Институт геоинформационных технологий и географии, ул. Большевикская, д. 68, Саранск, Россия, 430005,
e-mail: lar_ka73@mail.ru

⁴ Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, Институт геоинформационных технологий и географии, ул. Большевикская, д. 68, Саранск, Россия, 430005,
e-mail: olga.fara@mail.ru

⁵ Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева, факультет математики и естественных наук, ул. Пушкина, д. 86, Петропавловск, Казахстан, 150000,
e-mail: dmitriev_pavel@mail.ru

⁶ Югорский государственный университет, Высшая экологическая школа, лаборатория изучения пространственно-временной изменчивости углеродного баланса лесных и болотных экосистем средней тайги Западной Сибири, ул. Чехова, д. 16, Ханты-Мансийск, Россия, 628012, *e-mail: a.skurikhin98@mail.ru*

⁷ Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева, факультет математики и естественных наук, ул. Пушкина, д. 86, Петропавловск, Казахстан, 150000, *e-mail: iafomin@mail.ru*

геоинформационных систем и технологий, позволяющие эффективно сопоставлять данные инженерных изысканий и оценивать точность выполнения топографо-геодезических работ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: позиционирование высокой точности, аэрофотосъемочные работы, беспилотные летательные аппараты, инженерные изыскания, QGIS

Aleksandr K. Kovalenko¹, Sergey A. Teslenok², Larisa G. Kalashnikova³, Olga F. Bogdashkina⁴, Pavel S. Dmitriev⁵, Aleksandr A. Skurikhin⁶, Ivan A. Fomin⁷

APPLICATION OF THE PRECISE POINT POSITIONING METHOD FOR GEODETIC SUPPORT OF AERIAL PHOTOGRAPHY DURING ENGINEERING SURVEYS

ABSTRACT

This work presents experience in the combined use of high-precision positioning methods and standard post-processing programs. This is necessary to provide geodetic support for aerial photo-geodetic work during engineering surveys in the oil and gas sector — to determine the coordinates and heights of control points using the example of an extended linear structure located in difficult physical and geographical conditions in the area of the Baikal-Amur Mainline. To solve the problem of refining the standard geoid model, based on the values of the normal heights of the starting points, using geoinformation technologies in GIS with open object code QGIS, a local spatial geoinformation correction model was created. This is a model of the surface of the difference between the normal and ellipsoidal heights of the starting points, obtained in the coordinate systems of the work object for the entire site. Analysis of the results of the work showed that modern GIS with their mathematical apparatus and geographic information technologies make it possible to create local geoid models that fully correspond to the characteristics of the work area. They are necessary because the post-processing programs used contain a standard geoid model that does not take into account local factors of geoid change for specific territories. The use of the proposed method can significantly simplify logistics processes when performing geodetic work, without reducing their accuracy at the same time. At all stages of the work, the capabilities and tools of modern geographic information systems and technologies were used, allowing for the effective comparison of engineering survey data and assessment of the accuracy of topographic and geodetic work.

KEYWORDS: precise point positioning, aerial photography, unmanned aerial vehicles, engineering surveys, QGIS

¹ SUE “Lenoblinventarization”, 113/4, Nevsky ave., St. Petersburg, 191024, Russia,
e-mail: alex_kov@mail.ru

² Yugra State University, Higher School of Ecology, 16, Chekhova str., Khanty-Mansiysk, 628012, Russia,
e-mail: teslserg@mail.ru

³ National Research Mordovian State University, Institute of Geoinformation Technologies and Geography, 68, Bolshevistskaya str., Saransk, Republic of Mordovia, 430005, Russia, *e-mail: lar_ka73@mail.ru*

⁴ National Research Mordovian State University, Institute of Geoinformation Technologies and Geography, 68, Bolshevistskaya str., Saransk, Republic of Mordovia, 430005, Russia, *e-mail: olga.fara@mail.ru*

⁵ Kozybayev University, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, 86, Pushkina str., Petropavlovsk, 150000, Kazakhstan, *e-mail: dmitriev_pavel@mail.ru*

⁶ Yugra State University, Higher School of Ecology, Laboratory for studying the spatial and temporal variability of the carbon balance of forest and swamp ecosystems of the middle taiga of Western Siberia, 16, Chekhova str., Khanty-Mansiysk, 628012, Russia, *e-mail: a.skurikhin98@mail.ru*

⁷ Kozybayev University, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, 86, Pushkina str., Petropavlovsk, 150000, Kazakhstan, *e-mail: dmitriev_pavel@mail.ru*

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в геодезической отрасли происходят существенные качественные изменения, в первую очередь связанные с использованием роботизированных систем. Прежде всего, это дистанционное зондирование [Шовенгердт, 2013], глобальные навигационные спутниковые системы¹ (ГНСС) [Яндров, 2004; Антонович, 2006; Дударев, 2010; Манухов и др., 2011; Соловьев, 2014; Варфоломеев и др., 2015; Варфоломеев, Чудайкина, 2015] и беспилотные летательные аппараты (БПЛА, беспилотники) или дроны [Веремеенко и др., 2009; Алексеенко и др., 2014, 2015; Стешин, 2016, 2017; Овчинникова, Медведков, 2019; Пашков и др., 2021; Кустов и др., 2022], а также соответствующие техника, приборный парк, программное обеспечение и технологии [Дементьев, 2008; Тесленок, Романов, 2014; Ямбаев, 2012, 2020]. Беспилотные аппараты в настоящее время получают все более широкое распространение в геодезии, топографии, картографии, географии [Курошев, 1999; Дементьев, 2008; Алексеенко и др., 2014, 2015; Стешин, 2016; Пашков и др., 2021], являясь активно используемыми для создания и обновления планово-картографических материалов, а также применяемыми для получения цифровых моделей рельефа (ЦМР) и местности (ЦММ) [Стешин, 2017; Овчинникова, Медведков, 2019; Пашков и др., 2021; Кустов и др., 2022].

Технология съемки земной поверхности с применением БПЛА является на сегодняшний день наиболее распространенной и имеет ряд преимуществ перед наземными методами съемки. В ряде случаев она способна их заменить, главным образом при создании и обновлении крупномасштабных картографических материалов, особенно для территорий больших размеров, находящихся в труднодоступных районах со сложными ландшафтными условиями (прежде всего — со сложным рельефом и условиями проходимости местности). Использование дронов с установленной на них цифровой фотографической аппаратурой высокого и сверхвысокого пространственного разрешения дает возможность осуществлять аэрофотографическую съемку территории в необходимом месте, в определенное время и на точной высоте. Аэрофотоснимки, получаемые как результат выполнения подобной съемки, отличаются высоким качеством и наличием необходимого перекрытия. Центры фотографирования, имеющие привязку, полученную с использованием геодезического оборудования ГНСС, позволяют произвести обработку материалов с использованием специализированного программного обеспечения за минимально возможное время и с максимально доступной точностью.

Главными результатами обработки полученных в результате съемки с БПЛА аэрофотоснимков являются следующие материалы: ортофотоплан и ЦМР [Пашков и др., 2021; Кустов и др., 2022]. Их точность напрямую определяется высотой, с которой осуществляется фотографирование, особенностями погодных условий и показателями разрешения используемой съемочной аппаратуры. В современных условиях точность получаемых ортофотопланов и ЦМР удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ним нормативными документами в области геодезии, топографии и кадастра, однако требует процедур оценки их точности и достоверности. Подобные процедуры выполняются с использованием названных выше опорных и контрольных точек планово-высотной подготовки аэрофотоснимков. При этом руководствуются как соображениями оптимального расположения этих точек на участке работ (например, на разных по высоте элементах рельефа), так и выбором наиболее оптимального метода определения координат и высот этих точек. Немаловажен также и расчет параметров перехода из стандартной системы геодезических параметров Земли WGS 84 в систему геоцентрических координат в систему координат и высот локального объекта работ.

¹ ГОСТ Р 51794-2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. М.: Стандартинформ, 2009. 16 с.

В основном пространственные координаты и высоты контрольных точек определяют спутниковыми методами с использованием ГНСС-оборудования в режиме реального времени (*direct geo-referencing* — прямое геопозиционирование, в т. ч. на базе интегрированной инерциальной и спутниковой систем GPS/IMU) [Манухов и др., 2011; Ries et al., 2002], съемкой в режиме кинематики реального времени, кинематическим позиционированием в режиме реального времени (Real Time Kinematic, RTK-съемка) [Варфоломеев и др., 2014, 2015; Тесленок, Романов, 2014; Варфоломеев, Чудайкина, 2015] или в режиме статики [Манухов и др., 2011; Соловьев, 2014; Тесленок, Романов, 2014] с последующей обработкой и уравниванием в программах постобработки [Манухов и др., 2011; Варфоломеев и др., 2014, 2015; Соловьев, 2014]. Режим RTK требует наличия на участках работ GSM-связи и соответствующей логистики, необходимых для обеспечения согласованности измерений на исходных пунктах и на контрольных точках, что в районах со сложными физико-географическими условиями не всегда возможно и достижимо.

В случае использования относительного метода спутниковых определений поправки вносятся в параметры орбит и бортовых часов спутников ГНСС, а не в результаты измерений фаз несущих радиосигналов. Таким образом, применение относительных методов коррекции нуждается в дополнительном привлечении работающих в непосредственной близости базовых станций.

Выходом в указанных условиях может стать использование метода позиционирования высокой точности, или PPP (Precise Point Positioning) и стандартных программ постобработки [Манухов и др., 2011; Варфоломеев и др., 2014, 2015; Соловьев, 2014]. При применении метода PPP, в отличие от метода кинематики реального времени [Варфоломеев и др., 2014, 2015; Варфоломеев, Чудайкина, 2015], не нужен доступ к данным наблюдений базовых станций, располагающихся в непосредственной близости от пользователя. Необходимые данные поправок, без использования которых невозможно применение метода высокоточного позиционирования, реализуются службой точного позиционирования [Веремеенко и др., 2009; Ямбаев, 2012; Федотов, 2023].

В целом, комплекс аэрофотосъемочных работ с использованием современных технологий и оборудования беспилотных систем включает три основных этапа:

- подготовка наземного обоснования (с закреплением на местности и координированием опорных точек — опознавательных знаков и контрольных точек);
- подготовка и производство летно-съемочных работ с использованием дронов;
- фотограмметрическая обработка полученных по результатам съемки аэрофотоснимков с использованием соответствующего специализированного программного обеспечения.

Общее число используемых опознаков и контрольных точек на снимаемой территории определяется размером области работы, ее физико-географическими особенностями и требуемой точностью.

При планировании, организации и реализации комплекса инженерно-геодезических изысканий [Бойко, 2003; Дементьев, 2008; Соловьев, 2014; Кочетова, 2017; Авакян, 2021; Федотов, 2023] традиционно особое внимание уделяется точности получаемых материалов. Ортофотопланы, которые могут быть получены по результатам аэрофотосъемки с БПЛА [Алексеев и др., 2014; Стешин, 2017; Пашков и др., 2021; Кустов и др., 2022], зачастую имеют точность, сопоставимую с наземной съемкой, и далее могут быть использованы для создания крупномасштабных топографических планов до м-ба 1: 500^{1,2}

¹ ГКИНП 02-118. Основные положения по созданию топографических планов масштабов 1: 5 000, 1: 2 000, 1: 1 000, 1: 500. М.: ГУГК, 1970. 15 с.

² ГКИНП 02-033-82. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1: 5 000, 1: 2 000, 1: 1 000 и 1: 500. М.: Недра, 1982. 152 с.

включительно [Чинаев и др., 2020]. При этом на конечную точность получаемых картографических материалов способен влиять комплекс факторов, прежде всего таких, как:

- разрешающая способность съемочной системы дистанционного зондирования: пространственное, спектральное, радиометрическое, временное разрешение;
- качество выполнения аэрофотосъемочных работ;
- число опорных точек, в нашем случае представленных планово-высотными опознавательными знаками (опознаками);
- специфика территории, на которой осуществляется съемка (ее физико-географические условия и, в первую очередь, такие ландшафтные компоненты, как рельеф и растительность, а точнее — степень закрытости местности растительностью и показатели пересеченности и сложности рельефа);
- качество фотограмметрической обработки результатов съемки.

Точность отображения плановых контуров и высот на топографических планах определяется и лимитируется достаточно высокими требованиями разнообразных нормативных документов, прежде всего таких, как соответствующие стандарты¹ и инструкции² [Кочетова, 2017; Мусихин, Зубкова, 2018; Авакян, 2021; Федотов, 2023]. Соответственно, в современных условиях значительный практический интерес представляют создание разнообразных картографических изображений и оценка точности высот ЦМР и ЦММ, создаваемых на основе и по материалам аэрофотосъемки, осуществляемой с применением БПЛА (дронкартография [Штешин, 2016; Tudor, 2015]) и с использованием современных компьютерных методов фотограмметрической обработки полученных снимков.

В связи с вышесказанным целью исследования явился анализ результатов практического опыта определения координат и высот контрольных точек в процессе аэрофотогеодезических работ при осуществлении инженерных изысканий на основе использования метода позиционирования высокой точности, интегрированного со стандартными программами постобработки, в районах со сложными физико-географическими условиями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как уже отмечалось ранее, пространственные координаты и высоты контрольных точек в основном определяют спутниковыми методами с использованием ГНСС-оборудования в режиме реального времени, требующем наличия на участках работ GSM-связи и соответствующей логистики для обеспечения согласованности измерений на исходных пунктах и на контрольных точках. Выполнение этого требования в условиях районов со сложной физико-географической ситуацией не всегда возможно и достижимо.

В связи с этим, в данном исследовании представлены результаты практического опыта определения координат и высот контрольных точек на основе использования метода позиционирования высокой точности, интегрированного со стандартными программами постобработки. Он был получен в процессе осуществления инженерных изысканий в нефтегазовом секторе на примере протяженного линейного сооружения, расположенного в сложных физико-географических условиях в районе Байкало-Амурской магистрали. Был использован метод высокоточного (с сантиметровой точностью) определения координат и высот точек местности с использованием технологий и соответствующего оборудования ГНСС посредством получения поправок к эфемеридам орбит и бортовым часам всех видимых спутников от сетевого источника поправок [Антонович, 2006; Манухов и др.,

¹ ГОСТ Р 59562-2021. Съемка аэрофототопографическая. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2021. 90 с.

² СП 11-104-97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. М., 1998. 92 с.

2011]. Суть данного метода заключается в высокоточном местоопределении в абсолютном режиме, что отличает его от относительного метода спутниковых определений [Антонович, 2006; Манухов и др., 2011; Ямбаев, 2012; Соловьев, 2014].

В соответствии с первым этапом аэрофотосъемочных работ на основе современных технологий и оборудования беспилотных систем была выполнена подготовка наземного обоснования. Оповестительные знаки и контрольные точки были закреплены на местности и координированы (рис. 1) с использованием оборудования ГНСС методом спутниковых наблюдений [Антонович, 2006; Манухов, 2011; Соловьев, 2014; Авакян, 2021].



Рис. 1. Процесс координирования оповестительного знака

Fig. 1. The process of coordinating the identification mark

В процессе использования метода PPP в условиях труднодоступной местности и при отсутствии соответствующей логистики конкретного района Байкало-Амурской магистрали были определены его важнейшие преимущества, заключающиеся в следующих аспектах, обеспечивающих:

- возможности использования только одного ГНСС-приемника;
- более значительную согласованность позиционирования;
- существенное уменьшение финансовых и временных затрат;
- упрощение оперативной логистики при организации и выполнении полевых работ.

Вместе с тем нельзя не отметить и некоторые выявленные недостатки позиционирования высокой точности (по сравнению с традиционными методами ГНСС), главными из которых является необходимость:

- несколько большей вычислительной мощности компьютерной техники, используемой для обработки получаемых данных;
- обеспечения постоянства внешнего потока коррекции эфемерид;
- некоторой временной задержки для достижения достаточной точности измерений.

Еще одним существенным обнаруженным на практике недостатком метода PPP является тот факт, что высокоточные координаты и высоты контрольных точек представ-

лены во всемирной геодезической системе координат WGS 84, что в дальнейшем, как было указано ранее, требует нахождения точных локальных параметров преобразования и перехода от системы координат и высот WGS 84 к местным системам координат и преобразования эллипсоидальных высот WGS 84 в систему нормальных высот, в которых должны быть представлены результаты геодезических работ. Подобные вопросы преобразования координат рассмотрены в ряде работ¹ [Базлов и др., 1996; Залуцкий, 2000; Бойко, 2003; Яндров, 2004; Дударев, 2010; Курошев, Харунжий, 2012; Мусихин, Зубкова, 2018; Онрицова, 2018; Vermeille, 2002; Polo-Blanco, González-Vega, 2009; Reit, 2009], в частности — представлен алгоритм и технологическая схема преобразования координат с использованием фирменных программ постобработки GPS-измерений [Залуцкий, 2000].

Для оценки возможности использования метода PPP в процессе привязки опознаков в районах со сложными физико-географическими условиями в нашем исследовании использованы результаты ГНСС-наблюдений на непрерывно действующей геодезической сети в составе десяти пунктов (рис. 2). При обработке файлов этой сети методом позиционирования высокой (сантиметрового уровня) точности с использованием возможностей службы коррекции сервиса Trimble GNSS Correction Services^{2,3} на такие же даты были получены значения приращений координат векторных базовых линий и их средних квадратических отклонений. Помимо этого, значения приращений координат базовых линий были рассчитаны по двойным фазовым разностям в процессе обработки с использованием программного обеспечения Topcon Tools^{4,5}. И в том, и в другом случае были использованы те же самые файлы восьмичасовых наблюдений.

С целью проведения сравнения с методом относительных наблюдений, на основе рассчитанных координат пунктов (X , Y , Z) и их средних квадратических отклонений (mX , mY , mZ), полученных методом PPP в международной общеземной системе отсчета International Terrestrial Reference Frame ITRF2014 (WGS 84), были определены приращения координат базовых линий (dX , dY , dZ) и их средних квадратических отклонений (mdX , mdY , mdZ).

Определение было выполнено сравнением разности координат для каждой базовой линии, согласно схеме, полученной при обработке этих же наблюдений в программном обеспечении Topcon Tools для случая относительных наблюдений. Разделение горизонтальных и вертикальных компонент в топоцентрической системе координат (E , N , U) также было выполнено с использованием программного обеспечения Topcon Tools. При анализе разностей приращений координат, выполненном в Microsoft Excel, для непрерывно действующей ГНСС-сети, схема которой была приведена ранее на рис. 2 (в составе десяти пунктов и 45 векторов — базовых линий ГНСС-сети), для каждой из линий были сравнены показатели, полученные методами позиционирования высокой точности и статистическим (рис. 3). Полный объем выборки составил 135 разностей приращений координат.

¹ Geodetic datum conversions. Toitū Te Whenua. Land Information New Zealand. Электронный ресурс: <https://www.linz.govt.nz/data/geodetic-system/coordinate-conversion/geodetic-datum-conversions/equations-used-datum> (дата обращения 04.01.2024)

² GNSS corrections. Trimble Catalyst Help Portal. Электронный ресурс: <https://help.trimblegeospatial.com/Catalyst/Corrections.htm> (дата обращения 04.01.2024)

³ Trimble Positioning Services. Электронный ресурс: <https://positioningservices.trimble.com/en> (дата обращения 04.01.2024)

⁴ Topcon Tools 8.2. Электронный ресурс: <https://topcon-tools.software.informer.com/> (дата обращения 04.01.2024)

⁵ Topcon Tools User Manual. Электронный ресурс: <https://manualmachine.com/topcon/tools/8626126-user-manual/> (дата обращения 04.01.2024)

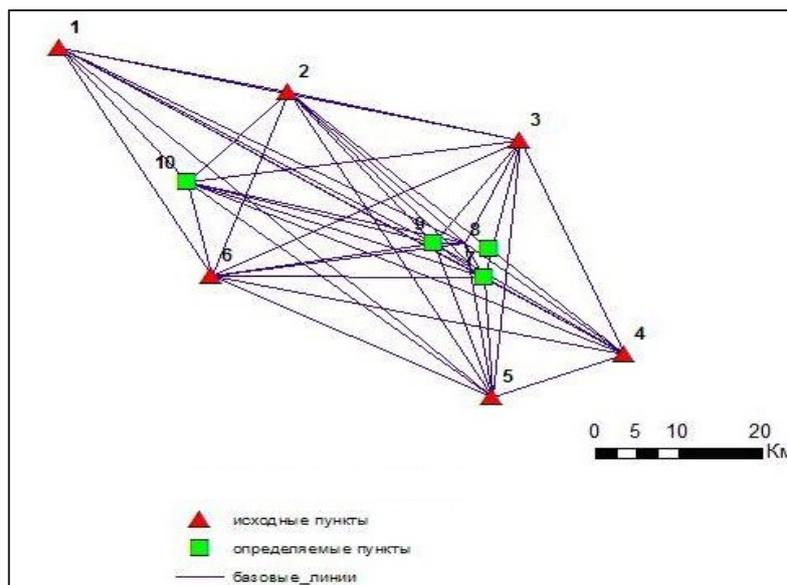


Рис. 2. Схема использованной ГНСС-сети
Fig. 2. Diagram of the GNSS network used

С целью обеспечения большей наглядности на рис. 4 и 5 в виде диаграмм визуализированы результаты выполненных работ по оценке показателей величин разностей приращений векторов, полученных методом PPP и методом статических измерений ГНСС-сети, в т. ч. и по абсолютным значениям. Средние полученные значения разности приращений координат составили менее 20 мм, что говорит о значительной близости и равнозначности полученных результатов.

Следующим этапом оценки точности метода стало вычисление координат четырех определяемых контрольных пунктов (см. рис. 2, табл. 1), анализ полученных данных и сравнение их с каталожными значениями (табл. 2).

приращения координат метод PPP			приращения координат статический метод			DX(м)	DY(м)	DH(м)
9823.414	-29418.619	-15.812	9823.401	-29418.598	-15.833	0.013	-0.021	0.021
-4970.396	5887.381	-7.4	-4970.39	5887.379	-7.404	-0.006	0.002	0.004
-3192.102	-27051.795	9.987	-3192.101	-27051.766	9.994	-0.001	-0.029	-0.007
13721.297	11033.309	16.79	13721.282	11033.298	16.76	0.015	0.011	0.03
29150.007	-43934.803	-12.2	29149.976	-43934.781	-12.226	0.031	-0.022	0.026
-21573.709	6022.608	30.602	-21573.691	6022.609	30.606	-0.018	-0.001	-0.004
-206.01	3769.347	1.166	-206.014	3769.347	1.164	0.004	0	0.002
21801.67	-16612.598	14.486	21801.648	-16612.588	14.481	0.022	-0.01	0.005
-16360.765	22252.886	-8.226	-16360.75	22252.87	-8.224	-0.015	0.016	-0.002
-14793.81	35306	8.411	-14793.793	35305.981	8.431	-0.017	0.019	-0.02
-13015.516	2366.824	25.799	-13015.503	2366.828	25.825	-0.013	-0.004	-0.026
3897.883	40451.928	32.602	3897.882	40451.893	32.587	0.001	0.035	0.015
19326.593	-14516.184	3.611	19326.57	-14516.171	3.605	0.023	-0.013	0.006
-31397.123	35441.227	46.414	-31397.093	35441.212	46.435	-0.03	0.015	-0.021
-10029.424	33187.966	16.978	-10029.416	33187.947	16.999	-0.008	0.019	-0.021
11978.256	12806.021	30.297	11978.246	12806.01	30.315	0.01	0.011	-0.018
-26184.179	51671.504	7.586	-26184.157	51671.482	7.607	-0.022	0.022	-0.021
1778.294	-32939.176	17.388	1778.289	-32939.145	17.396	0.005	-0.031	-0.008
18691.693	5145.928	24.19	18691.673	5145.92	24.165	0.02	0.008	0.025
34120.403	-49822.184	-4.8	34120.369	-49822.162	-4.825	0.034	-0.022	0.025
-16603.313	135.227	38.003	-16603.3	135.229	38.009	-0.013	-0.002	-0.006
4764.386	-2118.034	8.566	4764.376	-2118.031	8.569	0.01	-0.003	-0.003

Рис. 3. Фрагмент таблицы анализа разностей приращений координат
Fig. 3. A fragment of the coordinate increment difference analysis table

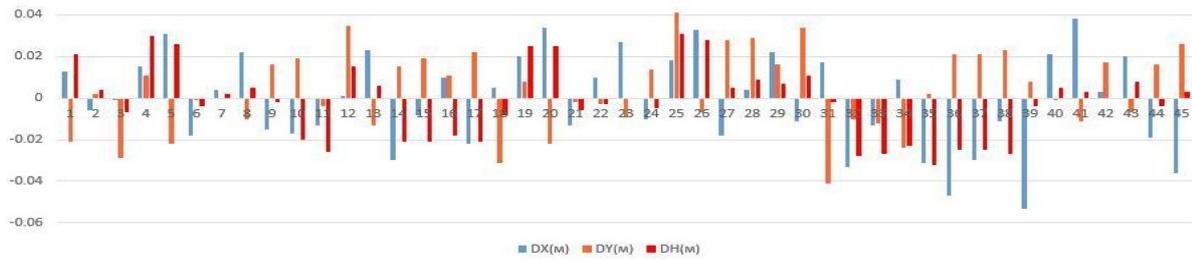


Рис. 4. Величины разностей приращений координат, полученных методами позиционирования высокой точности и статических измерений
Fig. 4. The values of the differences in the increments of coordinates obtained by Precise Point Positioning and static measurement methods

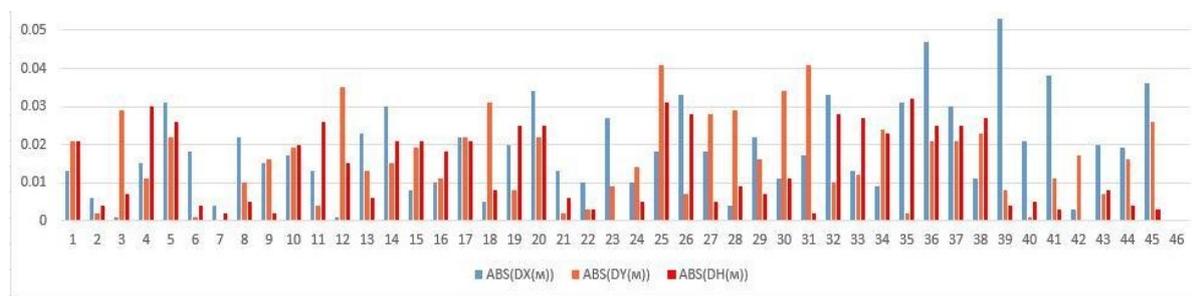


Рис. 5. Оценка абсолютных величин разности приращений координат, полученных методами позиционирования высокой точности и статических измерений
Fig. 5. Estimation of the absolute values of differences in coordinate increments obtained by Precise Point Positioning and static measurement methods

Табл. 1. Координаты определяемых контрольных пунктов
Table 1. Coordinates of the control points to be determined

№	Координаты								
	Метод PPP			Метод статических наблюдений			Каталог		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
9	9616.166	7316.086	34.265	9616.127	7316.091	34.252	9616.140	7316.101	34.228
10	9439.680	7897.468	19.301	9439.677	7897.495	19.291	9439.739	7897.492	19.287
7	4645.770	3203.468	26.142	4645.728	3203.263	26.727	4645.696	3203.464A	26.695
8	9410.156	1085.434	35.360	9410.111	1085.439	35.345	9410.104	1085.458	35.292

Табл. 2. Разность координат определяемых контрольных пунктов
Table 2. The difference in the coordinates of the control points to be determined

№	Разность полученных значений								
	PPP и метод статических наблюдений			PPP и каталог			Метод статических наблюдений и каталог		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
9	0.039	-0.005	0.013	0.026	-0.015	0.037	-0.013	-0.01	0.024
10	0.003	-0.027	0.010	-0.059	-0.024	0.014	-0.062	0.003	0.004
7	0.042	0.005	0.015	0.074	0.004	0.047	0.032	-0.001	0.032
8	0.045	-0.005	0.015	0.052	-0.024	0.058	0.007	-0.019	0.053

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исходя из полученных результатов вычисления координат четырех контрольных пунктов, их анализа и сравнения, представленных в табл. 1 и 2, видно, что разница координат и высот каталожных значений контрольных пунктов и координат и высот этих пунктов, полученных методом PPP и методом статических наблюдений одного порядка величины. Это свидетельствует о равнозначности этих методов ГНСС-наблюдений. Статический метод требует синхронизированных по времени наблюдений на пунктах, что в сложных физико-географических условиях не всегда может быть выполнено в полном объеме. Применение же метода позиционирования высокой точности не требует синхронных наблюдений на пунктах.

Практическая реализация приведенной методики была осуществлена при выполнении инженерных изысканий в районе Байкало-Амурской магистрали. Протяженность линейного объекта изысканий, расположенного в сложных физико-географических условиях, составляла порядка 400 км.

Начальным этапом работ явилось построение каркасной ГНСС-сети методом статических измерений. Координаты исходных пунктов представлены в трех местных системах координат. За исходные взяты пункты государственной геодезической сети не ниже 2 класса точности и имеющие высоту, полученную геометрическим нивелированием не ниже 4 класса точности. На этих пунктах выполнены длительные ГНСС-наблюдения и вычислены координаты и высоты методом PPP в системе отсчета ITRF2014 (WGS 84).

Далее было выполнено уравнивание каркасной сети в программном обеспечении Topcon Tools и вычислены коэффициенты семи параметров преобразования Гельмерта [Маркузе, Welsch, 1995; Маркузе, Антипов, 2004; Курошев, Харунжий, 2012; Reit, 2009] для каждой из трех местных систем координат. На следующем этапе выполнено уравнивание каркасной сети в местных системах координат с использованием модели геоида Earth Gravitational Model EGM2008 [Cefola, Broucke, 1975; Pavlis et al., 2012; Barnes et al., 2015; Pail et al., 2018] (рис. 6).

Таким образом, была получена база данных геодезических пунктов, которая использовалась при геодезическом обеспечении аэрофотосъемочных работ и оценке точности полученных ЦММ и ЦМР. Далее была проведена оценка точности полученных ЦМР и ЦММ [Мусихин, Зубкова, 2018]. Оценка выполнялась по следующей методике. Съёмка контрольных точек выполнялась методом RTK [Манухов и др., 2011; Варфоломеев и др., 2014, 2015; Варфоломеев, Чудайкина, 2015] с передачей поправок передвигшемуся приемнику по радиоканалу. По конфигурации приемника базовая станция выполнялась как свободная станция, т. е. координаты и высоты определялись с навигационной точностью. Одновременно с выполнением съёмки базовый приемник выполнял сбор результатов измерений в статическом режиме. Далее в камеральных условиях, по полученным результатам статических измерений, методом PPP вычислялись координаты свободной станции в системе WGS 84.

На следующем этапе была разработана программа, позволяющая вычислять по координатам свободной базисной станции и координатам ближайших пунктов (в системе WGS-84, X, Y, Z, mX, mY, mZ, B, L, H) компоненты приращения координат DX, DY, DZ и создавались SNAP-файлы. Данные файлы содержат данные по станциям и базовым линиям и их точностные характеристики (рис. 7).

Файлы импортировались в качестве вставки спутникового построения в проект Topcon Tools каркасной сети, выполнялось уравнивание с получением точных координат и высоты. Вычислялись и вносились соответствующие поправки в координаты и высоты точек, полученных при съёмке в режиме кинематики реального времени [Манухов и др., 2011; Варфоломеев и др., 2014, 2015; Варфоломеев, Чудайкина, 2015].

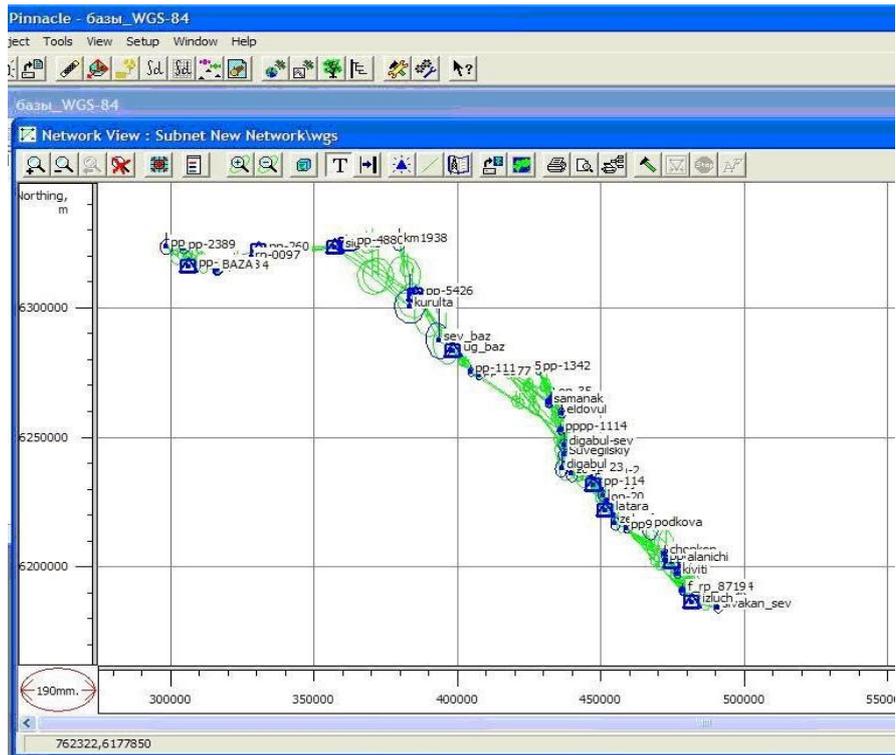


Рис. 6. Схема каркасной сети
Fig. 6. The scheme of the wireframe network

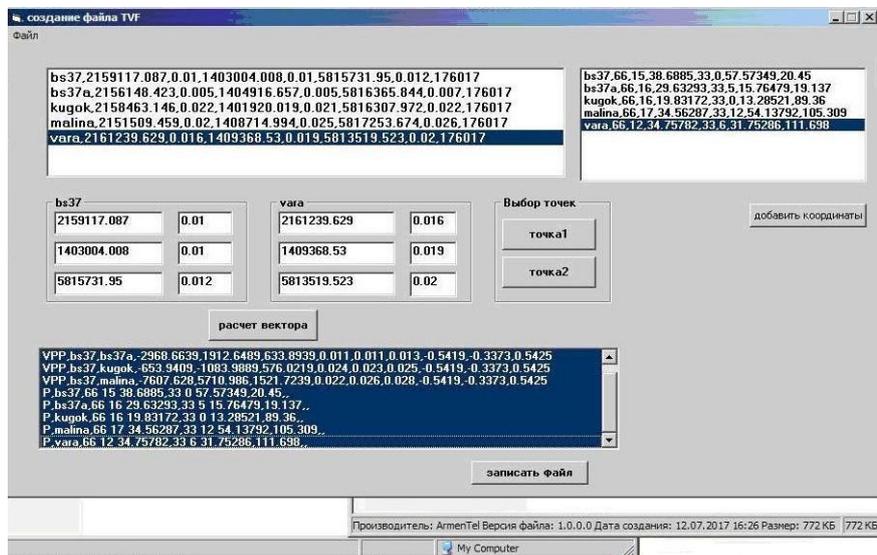


Рис. 7. Интерфейс разработанной программы
Fig. 7. The interface of the developed program

Важной характеристикой получаемых в процессе выполнения съемочных работ точек являются значения их высот в принятой системе высот (Балтийской 1977 г.). Данная нормальная система высот основана на использовании отвесной линии, проходящей через снимаемую точку. Высоты в рассматриваемом методе позиционирования высокой точности определяются относительно нормали к исходному эллипсоиду. Для вычисления необходимых поправок используют модель геоида. В работе для решения задачи уточнения

стандартной модели геоида, на основе значений нормальных высот исходных пунктов, с использованием ГИС-технологий была создана локальная пространственная геоинформационная модель поправок. Она представляет собой модель поверхности разности нормальных и эллипсоидальных высот исходных пунктов (рис. 8), полученную с использованием возможностей алгебры растров.

Модель была построена в ГИС с открытым объектным кодом QGIS в системах координат объекта работ для всего участка в районе Байкало-Амурской магистрали, и данный фрагмент демонстрирует ее результаты. Анализ результатов аэрофотосъемочных работ, выполненных в процессе инженерных изысканий, а также картографической модели разности нормальных и эллипсоидальных высот исходных пунктов на участке работ показал, что современные ГИС с их математическим аппаратом и технологиями позволяют создавать локальные модели геоидов, полностью отвечающие особенностям территории, на которой производятся работы. Это очень важный момент, т. к. в стандартных программах постобработки заложена стандартная модель геоида, не учитывающая локальные факторы изменения геоида для конкретных территорий.

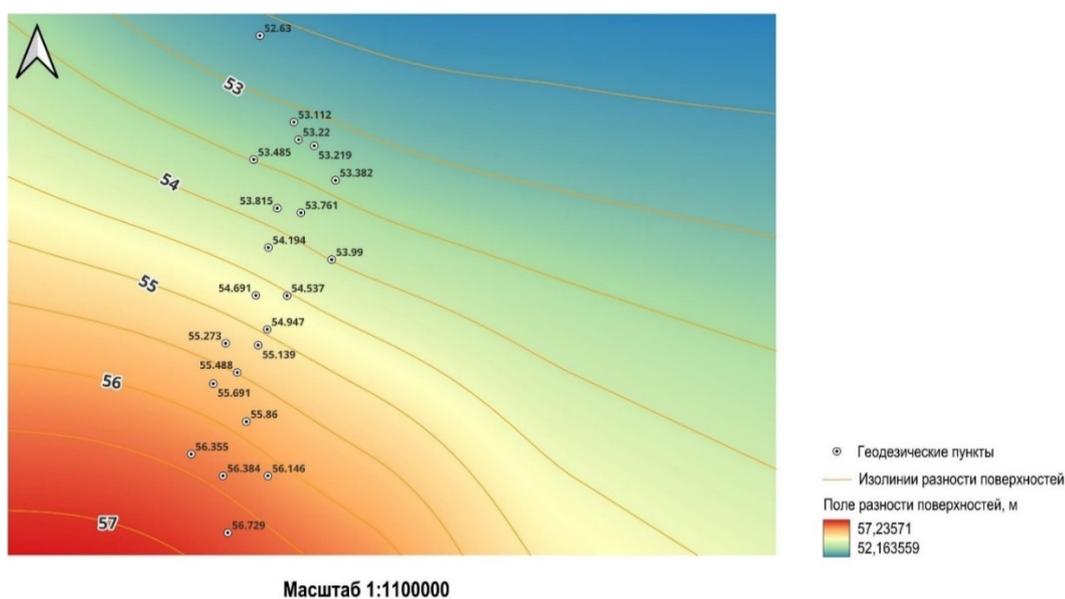


Рис. 8. Фрагмент карты разности нормальных и эллипсоидальных высот исходных пунктов
Fig. 8. A fragment of the map of the difference between the normal and ellipsoidal heights of the starting points

Таким образом, применение инструментария современных ГИС и геоинформационных технологий позволяет эффективно сопоставлять данные инженерных изысканий и оценивать точность выполнения топографо-геодезических работ.

ВЫВОДЫ

В исследовании приведен опыт определения координат и высот контрольных точек с использованием метода позиционирования высокой точности и стандартных программ постобработки. Рассмотрена возможность совместного применения методов PPP и статического при обеспечении геодезического сопровождения аэрофотогеодезических работ при осуществлении инженерных изысканий в нефтегазовом секторе. Разработана и создана база данных геодезических пунктов, практически использованная для геодезического обеспече-

ния аэрофотосъемочных работ и оценки точности полученных ЦММ и ЦМР. Разработана программа, позволяющая по координатам свободной базисной станции и координатам ближайших пунктов вычислять компоненты приращения координат и создавать SNAP-файлы, содержащие данные по станциям и базовым линиям, а также их точностные характеристики.

Использование возможностей алгебры растров позволило получить локальную пространственную геоинформационную модель поправок, являющуюся моделью поверхности разности нормальных и эллипсоидальных высот исходных пунктов. Это позволяет эффективно сравнивать данные съемочных инженерных изысканий в процессе оценки точности выполняемых топографо-геодезических работ. Применение предлагаемого метода позиционирования высокой точности, интегрированного со стандартными программами постобработки, созданных локальных пространственных геоинформационных моделей геоидов, полностью соответствующих особенностям территории производства топографо-геодезических работ, а также моделей поправок позволяют в значительной степени упростить процессы логистики при организации и выполнении работ, одновременно не снижая их точности. Более того, применение ГИС-технологий позволяет на основе метода позиционирования высокой точности создавать модели локального геоида, учитывающего особенности территории, что дает возможность осуществлять эффективный контроль изыскательских работ, существенно повышая их точность и достоверность.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по организации молодежной лаборатории в Югорском государственном университете (НИР 1022031100003-5-1.5.1) в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты».

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was supported by the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation to organize a new young researcher Laboratory in Yugra State University (Research number 1022031100003-5-1.5.1) as a part of the implementation of the National Project “Science and Universities”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авакян В. В.* Теория и практика инженерно-геодезических работ. Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 696 с.
- Алексеев Н. А., Курамагомедов В. М., Медведев А. А.* Тепловая съемка с беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях. Огарев-online, 2015. № 24. Электронный ресурс: <https://journal.mrsu.ru/arts/teplovaya-semka-s-bespilotnykh-letatelnykh-apparatov-v-geograficheskikh-issledovaniyakh> (дата обращения 04.01.2024).
- Алексеев Н. А., Медведев А. А., Карпенко И. А.* Опыт использования беспилотных летательных аппаратов в биогеографических исследованиях на территории заповедника Белогорье. Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС», 2014. Т. 20. С. 70–81.
- Антонович К. М.* Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Т. 2. М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2006. 360 с.
- Базлов Ю. А., Герасимов А. П., Ефимов Г. Н., Насретдинов К. К.* Параметры связи систем координат. Геодезия и картография, 1996. № 8. С. 6–7.
- Бойко Е. Г.* Высшая геодезия. Ч. II. Сфероидическая геодезия. М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 2003. 144 с.

Варфоломеев А. Ф., Коваленко А. К., Коваленко Е. А., Тесленок С. А., Тесленок К. С. ГИС-технологии в проведении проектных работ с использованием режима кинематики реального времени (РТК). Картография и геодезия в современном мире: Материалы II Всероссийской научно-практической конференции. Саранск: Издательство Мордовского университета, 2014. С. 216–222.

Варфоломеев А. Ф., Коваленко А. К., Коваленко Е. А., Тесленок К. С., Тесленок С. А. Геоинформационные технологии в определении зон покрытия территории поправками от постоянно действующих станций ГЛОНАСС/GPS. Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС», 2015. Т. 21. С. 522–528. DOI: 10.24057/2414-9179-2015-1-21-522-528.

Варфоломеев А. Ф., Чудайкина О. Ю. Использование РТК-режима систем глобального позиционирования GPS и ГЛОНАСС при проведении топографических работ. Огарев-online, 2015. № 4. Электронный ресурс: <http://journal.mrsu.ru/arts/ispolzovanie-rtk-rezhima-sistem-globalnogopozicionirovaniya-gps-i-glonass-pri-provedenii-topograficheskikh-rabot> (дата обращения 04.01.2024).

Веремеенко К. К., Желтов С. Ю., Ким Н. В., Козорез Д. А., Красильщиков М. Н., Себряков Г. Г., Сыпало К. И., Черноморский А. И. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. М.: Физматлит, 2009. 557 с.

Дементьев В. Е. Современная геодезическая техника и ее применение. М.: Академический проект, 2008. 591 с.

Дударев В. И. Преобразование основных систем координат, применяемых в космической геодезии. Гео-Сибирь, 2010. Т. 1. № 1. С. 135–144.

Залуцкий В. Т. О преобразовании координат в спутниковой технологии. Геодезия и картография, 2000. № 7. С. 17–24.

Кочетова Э. Ф., Акрицкая И. И., Тюльникова Л. Р., Гордеев А. Б. Инженерная геодезия. Нижний Новгород: ННГАСУ, 2017. 158 с.

Курошев Г. Д. Геодезия и география. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 1999. 372 с.

Курошев Г. Д., Харунжий А. А. Методы трансформации геодезических и пространственных прямоугольных координат, их алгоритмы, параметры, точность. Вестник СПбГУ. Науки о Земле, 2012. № 3. С. 79–90.

Кустов М. В., Тесленок С. А., Батин Д. А. Применение материалов аэрофотосъемки для изучения рельефа агроландшафтов (на примере территории городского округа Саранск Республики Мордовия). Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки, 2022. Т. 16. № 1. С. 76–85. DOI: 10.31161/1995-0675-2022-16-1-76-85.

Манухов В. Ф., Разумов О. С., Спиридонов А. И., Тюряхин А. С. Спутниковые методы определения координат пунктов геодезических сетей. Саранск: Издательство Мордовского университета, 2011. 128 с.

Маркузе Ю. Й., Антипов А. В. Возможности улучшения алгоритма объединения спутниковых и наземных сетей. Геодезия и картография, 2004. № 4. С. 16–21.

Маркузе Ю. Й., Welsch W. M. Два алгоритма объединения наземных и спутниковых сетей. Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1995. № 2. С. 45–64.

Мусихин В. В., Зубкова Ю. Д. Оценка точности создания модели местности на основе

аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). *Master's journal*, 2018. № 1. С. 44–49.

Овчинникова Н. Г., Медведков Д. А. Применение беспилотных летательных аппаратов для ведения землеустройства, кадастра и градостроительства. *Экономика и экология территориальных образований*, 2019. Т. 3. № 1. С. 98–108. DOI: 10.23947/2413-1474-2019-3-1-98-108.

Оприцова О. А. Исследование возможностей применения беспилотных авиационных систем для моделирования объектов недвижимости. *Вестник СГУГиТ*, 2018. Т. 23. № 3. С. 248–258.

Пашков С. В., Мажитова Г. З., Тесленок С. А. Картографирование агроландшафтов колочной лесостепи на основе геоинформационных технологий и дистанционного зондирования Земли. *Географический вестник*, 2021. № 1(56). С. 162–172. DOI: 10.17072/2079-7877-2021-1-162-172.

Соловьев А. Н. Применение глобальных навигационных спутниковых систем в инженерной геодезии. СПб.: СПбГЛТУ, 2014. 88 с.

Стешин И. С. Перспективы развития прикладной дронокартографии. *Academy*, 2016. № 2(5). Электронный ресурс: <https://scienceproblems.ru/images/PDF/2016/2/perspektivy-razvitiya-prikladnoj-dronokartografii.pdf> (дата обращения 04.01.2024).

Стешин И. С. Технология создания трехмерной модели местности на основе данных дистанционного зондирования земли с беспилотного летательного аппарата в сервисе *Maps Made Easy*. *Научное обозрение*, 2017. № 1. Электронный ресурс: <https://srjournal.ru/2017/id31/> (дата обращения 04.01.2024).

Тесленок С. А., Романов А. В. Новые технологии в производстве топографо-геодезических работ. *Общество*, 2014. № 2(2). С. 78–81.

Урмаев М. С., Родин С. П. Определение параметров преобразования геодезических прямоугольных пространственных координат при произвольных значениях параметров. *Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*, 1998. № 4–5. С. 314.

Федотов Г. А. *Инженерная геодезия*. М.: ИНФРА-М, 2023. 479 с.

Чинаев С. С., Тесленок К. С., Тесленок С. А. Создание топографического плана рекреационного комплекса. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Серия «Науки о Земле»*, 2020. № 2(18). С. 5–15. DOI: 10.25587/SVFU.2020.18.2.007.

Шовенгердт Р. А. *Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений*. М.: Техносфера, 2013. 589 с.

Ямбаев Х. К. *Инженерно-геодезические инструменты и системы*. М.: Издательство МИИГАиК, 2012. 462 с.

Ямбаев Х. К. *Геодезическое инструментоведение*. М.: Академический Проект, 2020. 583 с.

Яндров И. А. К вопросу о преобразовании координат для применения спутниковых технологий в строительстве зданий. *Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*, 2004. № 5. С. 47–58.

Barnes D., Factor J. K., Holmes S. A., Ingalls S., Presicci M. R., Beale J., Fecher T. *Earth Gravitational Model 2020*. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA 2015. P. G34A–03.

Cefola P., Broucke R. On the formulation of the gravitational potential in terms of equinoctial variables. *AIAA Pap*, 1975. No. 9. P. 1–25.

Pail R., Fecher T., Barnes D., Factor J. F., Holmes S. A., Gruber T., Zingerle P. Short note: the experimental geopotential model XGM2016. *Journal of Geodesy*, 2018. No. 92(4). P. 443–451. DOI: 10.1007/s00190-017-1070-6. S2CID 126360228.

Pavlis N. K., Holmes S. A., Kenyon S. C., Factor J. K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012. V. 117(B04406). P. 1–38. DOI: 10.1029/2011JB008916.

Polo-Blanco I., González-Vega L. A symbolic analysis of Vermeille and Borkowski polynomials for transforming 3D Cartesian to geodetic coordinates. *Journal of Geodesy*, 2009. V. 83. P. 1071–1081. DOI: 10.1007/s00190-009-0325-2.

Reit B.-G. On geodetic transformations. Gävle, 2009. 57 p.

Ries C., Kager H., Stadler P. GPS/IMU-unterstützte Georeferenzierung der Daten flugzeuggetragener multispektraler Scanner. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 2002. Bd. 11. S. 59–66.

Tudor T. Drone mapping. *MapsMadeEasy*, 2015. Web resource: https://www.mapsmadeeasy.com/drone_mapping (accessed 04.01.2024).

Vermeille H. H. Direct Transformation from Geocentric to Geodetic Coordinates. *Journal of Geodesy*, 2002. V. 76. P. 451–454. DOI: 10.1007/s00190-002-0273-6.

REFERENCES

Alekseenko N. A., Kuramagomedov V. M., Medvedev A. A. Thermal imaging from unmanned aerial vehicles in geographical research. *Ogarev-online*, 2015. No. 24. Web resource: <https://journal.mrsu.ru/arts/teplovaya-semka-s-bespilotnyx-letatelnyx-apparatov-v-geograficheskix-issledovaniyax> (accessed 04.01.2024) (in Russian).

Alekseenko N. A., Medvedev A. A., Karpenko I. A. The experience of UAV's use for biogeographical research in “Belogorye” natural Nature Reserve. *Proceedings of the International conference “InterCarto. InterGIS”*, 2014. V. 20. P. 70–81 (in Russian).

Antonovich K. M. Use of satellite radio navigation systems in geodesy. V. 2. Moscow: FSUE “Cartgeocenter”, 2006. 360 p. (in Russian).

Avakyan V. V. Theory and practice of engineering and geodetic work. Vologda: Infra-Engineering, 2021. 696 p. (in Russian).

Barnes D., Factor J. K., Holmes S. A., Ingalls S., Presicci M. R., Beale J., Fecher T. Earth Gravitational Model 2020. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2015. P. G34A–03.

Bazlov Y. A., Gerasimov A. P., Efimov G. N., Nasretdinov K. K. Coordinate system connection parameters. *Geodesy and Cartography*, 1996. No. 8. P. 6–7 (in Russian).

Boyko E. G. Higher geodesy. Part II. Spheroidal geodesy. Moscow: Kartgeotsentr-Geodesizdat, 2003. 144 p. (in Russian).

Cefola P., Broucke R. On the formulation of the gravitational potential in terms of equinoctial variables. *AIAA Pap*, 1975. No. 9. P. 1–25.

Chinaev S. S., Teslenok K. S., Teslenok S. A. Creation of a topographic plan of the recreational complex. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Series “Earth Sciences”*, 2020. No. 2(18). P. 5–15 (in Russian). DOI: 10.25587/SVFU.2020.18.2.007.

Dementiev V. E. Modern geodetic technology and its application. Moscow: Academic Project, 2008. 591 p. (in Russian).

Dudarev V. I. Transformation of the main coordinate systems used in space geodesy. *Geo-Siberia*, 2010. V. 1. No. 1. P. 135–144 (in Russian).

- Fedotov G. A.* The engineering geodesy. Moscow: INFRA-M, 2023. 479 p. (in Russian).
- Kochetova E. F., Akritskaya I. I., Tyulnikova L. R., Gordeev A. B.* The engineering geodesy. Nizhny Novgorod: NNGASU, 2017. 158 p. (in Russian).
- Kuroshv G. D.* Geodesy and geography. St. Petersburg: St. Petersburg University Press, 1999. 372 p. (in Russian).
- Kuroshv G. D., Kharunzhiy A. A.* Methods for transforming geodetic and spatial rectangular coordinates, their algorithms, parameters, accuracy. Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences, 2012. No. 3. P. 79–90 (in Russian).
- Kustov M. V., Teslenok S. A., Batin D. A.* The use of aerial photography materials to study the relief of agricultural landscapes (using the example of the territory of the Saransk urban district of the Republic of Mordovia). Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact Sciences, 2022. V. 16. No. 1. P. 76–85 (in Russian). DOI: 10.31161/1995-0675-2022-16-1-76-85.
- Manukhov V. F., Razumov O. S., Spiridonov A. I., Tjurjahin A. S.* Satellite methods for determining the coordinates of points of geodetic networks. Saransk: Publishing House of Mordovian University, 2011. 128 p. (in Russian).
- Marcuse Y. Y., Antipov A. V.* Possibilities for improving the algorithm for combining satellite and terrestrial networks. Geodesy and Cartography, 2004. No. 4. P. 16–21 (in Russian).
- Marcuse Y. Y., Welsch W. M.* Two algorithms for combining terrestrial and satellite networks. Izvestiya vuzov “Geodesy and aerophotosurveying”, 1995. No. 2. P. 45–64 (in Russian).
- Musikhin V. V., Zubkova Yu. D.* Accuracy evaluation of creating a locality model on the basis of aerial photography with an unmanned aerial vehicles (UAV). Master’s Journal, 2018. No. 1. P. 44–49 (in Russian).
- Opritova O. A.* Study of the possibilities of using unmanned aerial systems for modeling real estate objects. Vestnik of SSUGT, 2018. V. 23. No. 3. P. 248–258 (in Russian).
- Ovchinnikova N. G., Medvedkov D. A.* The use of unmanned aerial vehicles for land management, cadastre and urban planning. Economy and Ecology of Territorial Formations, 2019. V. 3. No. 1. P. 98–108 (in Russian). DOI: 10.23947/2413-1474-2019-3-1-98-108.
- Pail R., Fecher T., Barnes D., Facto J. F., Holmes S. A., Gruber T., Zingerle P.* Short note: the experimental geopotential model XGM2016. Journal of Geodesy, 2018. No. 92(4). P. 443–451. DOI: 10.1007/s00190-017-1070-6. S2CID 126360228.
- Pashkov S. V., Mazhitova G. Z., Teslenok S. A.* Mapping of agricultural landscapes of outlier forest steppe based on geoinformation technologies and remote sensing of the Earth. Geographical Bulletin, 2021. No. 1(56). P. 162–172 (in Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2021-1-162-172.
- Pavlis N. K., Holmes S. A., Kenyon S. C., Factor J. K.* The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2012. V. 117(B04406). P. 1–38. DOI: 10.1029/2011JB008916.
- Polo-Blanco I., González-Vega L.* A symbolic analysis of Vermeille and Borkowski polynomials for transforming 3D Cartesian to geodetic coordinates. Journal of Geodesy, 2009. V. 83. P. 1071–1081. DOI: 10.1007/s00190-009-0325-2.
- Reit B.-G.* On geodetic transformations. Gävle, 2009. 57 p.
- Ries C., Kager H., Stadler P.* GPS/IMU-supported georeferencing of data from airborne multispectral scanners. Publications of the German Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2002. V. 11. P. 59–66 (in German).

- Shovengerdt R. A.* Remote sensing. Models and methods of image processing. Moscow: Technosphaera, 2013. 589 p. (in Russian).
- Soloviev A. N.* Application of global navigation satellite systems in engineering geodesy. St. Petersburg: SPbSFTU, 2014. 88 p. (in Russian).
- Steshin I. S.* Prospects for the development of applied drone mapping. Academy, 2016. No. 2(5). Web resource: <https://scienceproblems.ru/images/PDF/2016/2/perspektivy-razvitiya-prikladnoj-dronokartografii.pdf> (accessed 04.01.2024) (in Russian).
- Steshin I. S.* Technology for creating a three-dimensional terrain model based on remote sensing data from an unmanned aerial vehicle in the Maps Made Easy service. Scientific Review, 2017. No. 1. Web resource: <https://srjournal.ru/2017/id31/> (accessed 04.01.2024) (in Russian).
- Teslenok S. A., Romanov A. V.* New technologies in the production of topographic and geodetic works. Society, 2014. No. 2(2). P. 78–81 (in Russian).
- Tudor T.* Drone mapping. MapsMadeEasy, 2015. Web resource: https://www.mapsmadeeasy.com/drone_mapping (accessed 04.01.2024).
- Urmaev M. S., Rodin S. P.* Determination of parameters for transforming geodetic rectangular spatial coordinates for arbitrary parameter values. Izvestia vuzov “Geodesy and aerophotosurveying”, 1998. No. 4–5. 314 p. (in Russian).
- Varfolomeev A. F., Chudaikina O. Yu.* Using the RTK mode of global positioning systems GPS and GLONASS when carrying out topographic work. Ogarev-online, 2015. No. 4. Web resource: <http://journal.mrsu.ru/arts/ispolzovanie-rtk-rezhima-sistem-globalnogo-pozicionirovaniya-gps-i-glonass-priprovedenii-topograficheskikh-rabot> (accessed 04.01.2024) (in Russian).
- Varfolomeev A. F., Kovalenko A. K., Kovalenko E. A., Teslenok S. A., Teslenok K. S.* GIS technologies in carrying out design work using real-time kinematics (RTK) mode. Cartography and geodesy in the modern world: Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference. Saransk: Publishing House of Mordovian University, 2014. P. 216–222 (in Russian).
- Varfolomeev A. F., Kovalenko A. K., Kovalenko E. A., Teslenok K. S., Teslenok S. A.* GIS technology in the determination of cover zones of the territory amendments from permanent GLONASS/GPS stations. Proceedings of the International conference “InterCarto. InterGIS”, 2015. V. 21. P. 522–528 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2015-1-21-522-528.
- Veremeenko K. K., Zheltov S. Yu., Kim N. V., Kozorez D. A., Krasilshchikov M. N., Sebryakov G. G., Sypalo K. I., Chernomorsky A. I.* Modern information technologies in the tasks of navigation and guidance of unmanned maneuverable aerial vehicles. Moscow: Fizmatlit, 2009. 557 p. (in Russian).
- Vermeille H. H.* Direct Transformation from Geocentric to Geodetic Coordinates. Journal of Geodesy, 2002. V. 76. P. 451–454. DOI: 10.1007/s00190-002-0273-6.
- Yambaev H. K.* Engineering and geodetic instruments and systems. Moscow: Publishing House of MIIGAiK, 2012. 462 p. (in Russian).
- Yambaev H. K.* Geodetic instrumentation. Moscow: Academic Project, 2020. 583 p. (in Russian).
- Yandrov I. A.* On the issue of coordinate transformation for the use of satellite technologies in the construction of buildings. Izvestia vuzov “Geodesy and aerophotosurveying”, 2004. No. 5. P. 47–58 (in Russian).
- Zalutsky V. T.* On the transformation of coordinates in satellite technology. Geodesy and Cartography, 2000. No. 7. P. 17–24 (in Russian).

О. И. Маркова¹, А. Н. Гуня², А. Ж. Пуреховский³

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ТЕРРИТОРИИ БОЛЬШОЙ МОСКВЫ ЗА ДВАДЦАТЬ ЛЕТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

АННОТАЦИЯ

В статье изложены результаты изучения динамики древесной растительности на территории Большой Москвы за двадцать лет (2000–2020 гг.). С помощью материалов дистанционного зондирования Landsat ARD и геоинформационных технологий на основе значений отражательной способности, яркостной температуры, вегетационных индексов построена серия карт приростов и потерь древесной растительности. При подсчете площадей лесов и полей установлено, что за 20 лет их площадь в целом немного увеличилась. Установлено, что прирост древесной растительности в Старой Москве характерен в основном для жилых районов, близких к МКАД. В ТиНАО максимальные приросты древесной растительности разбросаны равномерно по районам. На ООПТ, как правило, большого прироста не наблюдается. Потери древесной растительности на ООПТ связаны с их ландшафтным преобразованием и строительством различных сооружений. Наибольшие потери леса наблюдаются в спальных районах Старой Москвы, не примыкающих непосредственно к МКАД. В Новой Москве выделяются линии транспортных магистралей и районы, ориентированные на застройку. Из особо охраняемых природных территорий наибольшие потери леса характерны для национального парка «Лосиный остров». Из природно-исторических парков наиболее пострадали Измайлово, Кузьминки-Люблино, Царицыно, Москворецкий парк. Территории ООПТ в основном характеризуются стабильностью своих древесных насаждений, не отличаясь ни сильным приростом, ни большой убылью. Была произведена оценка изменений площадей прироста и убыли лесов в целом в городе по категориям высот деревьев, в результате которой установлено, что наибольший прирост характерен для категорий 5, 7, 9–13 м, а наибольшие потери — для категорий 12, 18, 19 и 21 м. Территории, где высота деревьев не изменялась, также имеют свою небольшую долю в площади города (около 1,5 %). Полученные данные можно рекомендовать для изучения истории города, развития городского планирования и природоохранных мероприятий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: растительный покров, космические снимки, геоинформационные технологии, вегетационные индексы, динамика городских ландшафтов

¹ Московский государственный университет, географический факультет, Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: solntsevaolga1401@gmail.com

² Институт географии Российской академии наук (ИГ РАН), Старомонетный пер., д. 29, стр. 4, Москва, Россия, 119017, *e-mail*: a.n.gunya@igras.ru

³ Институт географии Российской академии наук (ИГ РАН), Старомонетный пер., д. 29, стр. 4, Москва, Россия, 119017, *e-mail*: purekhovskii@igras.ru

Olga I. Markova¹, Alexey N. Gunya², Andrey G. Purekhovskii³

ASSESSMENT OF CHANGE IN VEGETATION COVER OF THE TERRITORY OF GREATER MOSCOW OVER TWENTY YEARS USING SATELLITE IMAGES

ABSTRACT

The article presents the results of a study of the dynamics of woody vegetation in the territory of Greater Moscow over twenty years (2000–2020). Using Landsat ARD remote sensing data and geoinformation technologies, a series of maps of growth and loss of woody vegetation were constructed based on reflectivity values, brightness temperature, and vegetation indices. When calculating the areas of forests and fields, it was found that over 20 years their area has slightly increased overall. It was found that the increase in woody vegetation in Old Moscow is characteristic mainly of residential areas close to the Moscow Ring Road. In TiNAO, the maximum increases in woody vegetation are evenly distributed across the districts. In nature protected areas, as a rule, there is no significant increase. Losses of woody vegetation in protected areas are associated with their landscape transformation and construction of various structures. The greatest forest losses are observed in the residential areas of Old Moscow, not directly adjacent to the Moscow Ring Road. In New Moscow, there are lines of transport arteries and areas oriented towards development. Of the specially protected natural areas, the greatest forest losses are typical for the Losiny Ostrov National Park. Of the natural and historical parks, Izmailovo, Kuzminki-Lyublino, Tsaritsyno, and Moskvoretsky Park suffered the most. The territories of the specially protected natural areas are mainly characterized by the stability of their tree stands, not distinguished by either strong growth or large losses. An assessment was made of changes in the areas of forest growth and loss in the city as a whole by tree height categories, which found that the greatest growth is typical for categories 5, 7, 9–13 m, and the greatest losses are for categories 12, 18, 19, and 21 m. The territories where the tree height did not change also have a small share in the city area (about 1.5%). The data obtained can be recommended for studying the history of the city, developing urban planning and environmental protection measures.

KEYWORDS: vegetation cover, space images, geoinformation technologies, vegetation indices, dynamics of urban landscapes

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходят большие изменения в преобразовании московского мегаполиса. Население города постоянно увеличивается, производится крупномасштабное строительство и ландшафтное преобразование. С 2012 г. к старым городским территориям присоединились еще и территории Новой Москвы⁴.

Весьма заметным в ландшафтных преобразованиях города является изменение естественного растительного покрова. Он является основным ресурсообразующим фактором биосферы, значимость которого определяется свойством продуцирования

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: solntsevaolga1401@gmail.com

² Institute of Geography, RAS, 29, build. 4, Staromonetny ln., Moscow, 119017, Russia, e-mail: a.n.gunya@igras.ru

³ Institute of Geography, RAS, 29, build. 4, Staromonetny ln., Moscow, 119017, Russia, e-mail: purekhovskii@igras.ru

⁴ Постановление Московской городской Думы от 7 декабря 2011 г. № 372 «Об утверждении соглашения об изменении границы между субъектами Российской Федерации городом Москвой и Московской областью»

органического вещества и способностью поддерживать качество среды [Петров, Терехина, 2013]. Растительность чувствительна к различным антропогенным нарушениям и наглядно отражает изменения экологической обстановки. Глубокое антропогенное воздействие приводит к значительной трансформации или уничтожению растительного покрова в целом или отдельных, наиболее уязвимых видов растений [Радченко и др., 2016].

Растительность — чувствительный индикатор уровня антропогенной нагрузки на природную среду. Надежными показателями степени экологического неблагополучия являются уменьшение площади коренных сообществ, лесистости, полноты древостоев (плотность древостоя, сомкнутость крон, бонитет), повреждение древостоев техногенными выбросами, заболевания древостоев, уменьшение проективного покрытия и биологической продуктивности, изменение плотности подроста, выбитость напочвенного покрова, замена одних видов на другие [Кочуров, 2003; Гусев, Соколов, 2008].

Сбор и анализ картографических источников, экологическое дешифрирование аэрокосмических материалов с использованием различных видов съемок является необходимой частью первого этапа оценки состояния растительности [Радченко, 2016].

Оценка состояния растительного покрова по космическим снимкам известна в России по многим современным работам, например [Алексеева и др., 2017; Голубева и др., 2019; Захаров и др., 2019; Антонов, 2020; Литинский, 2020; Гусев, Шпилевская, 2020; Шахбазян, 2021; Грищенко и др., 2022; Васильченко, Выприцкий, 2023; Мелкий, Верхотуров, 2023 и др.]. Для оценки состояния растительного покрова используют различные вегетационные индексы, которые рассчитываются в результате математических операций с разными спектральными каналами в каждом пикселе снимка.

В настоящей работе сделана попытка оценить изменение площадей растительного города, включая новые территории, по космическим снимкам за двадцатилетие, прошедшее с начала XXI в., за которое произошло наиболее интенсивное преобразование городских территорий и масштабное строительство.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе для выявления трендов в изменении земельного и лесного покрова Москвы использовались тематические продукты Landsat ARD, подготовленные лабораторией GLAD (Global Land Analysis and Discovery) Университета Мэриленда (США), на базе 16-дневных композитов, сформированных из лучших вариантов съемки серии космических спутников Landsat Геологической службы США (USGS) и Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства (NASA), нормализованных по отражательной способности (для видимого, ближнего и коротковолнового инфракрасного диапазонов каналов), а также уровню качества данных [Potapov et al., 2020]. Landsat является единственным общедоступным источником глобальных спутниковых данных со средним разрешением (30 м), доступным до 2016 г., что позволяет проводить историческую оценку изменений наземных ландшафтов [Wulder et al., 2012].

Продукт Landsat ARD состоит из 16-дневных композиционных данных, нормированных по отражательной способности и температурной яркости, составленных из лучших вариантов съемки. Участки, закрытые облаками и дымкой в безоблачных композитах, заполняются с помощью специализированного метода заполнения пробелов. Ежегодные 16-дневные временные ряды Landsat ARD преобразованы в набор основанных на ранжировании статистических данных (фенологических показателей), что позволяет применить для них многовременную классификацию и регрессионные модели. Для тематической классификации рассчитывались коэффициенты детерминации между физическими характеристиками композита и истинными значениями Landcover.

Ранжирование строилось на основе:

- 1) значений отражательной способности;
- 2) соответствующих значений яркостной температуры;
- 3) соответствующих значений вегетационных индексов: нормализованного вегетационного индекса (NDVI) и нормализованного водного индекса (NDWI).

Вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) служит количественным показателем фотосинтетически активной биомассы [Гусев, Шпилевская, 2020]. Нормализованный разностный водный индекс (Normalized Difference Water Index (NDWI)) служит для определения и мониторинга изменений содержания поверхностных вод, является важным показателем оценки мутности вод [Халин, 2022].

Для каждого ранжирования извлекался набор статистических данных, включающих выбранные ранги (минимум, максимум, квартили), межранговые средние значения (минимум — первый квартиль, первый — третий квартиль, третий квартиль — максимум) и амплитуды (от минимума до максимума, от минимума к медиане, от медианы к максимуму). Был также рассчитан набор показателей на основе вегетационных индексов, который представляет собой основные этапы фенологии (начало, конец, пик вегетационного периода).

Для изучения изменения типов земельного покрова использовались тематические продукты, полученные в рамках проекта “The Global 2000–2020 Land Cover and Land Use Change”: “Cropland” — возделываемые или пахотные земли, и “Built-Up Lands” — застроенные территории, которые были созданы на основе Landsat ARD с помощью индивидуальных моделей на основе нейронных сетей типа «дерева решений» или сверточных нейронных сетей с функцией deep learning и откалиброваны с применением наземных полевых данных для каждого класса группы наземных ландшафтов [Potapov et al., 2022].

Для изменения (прирост и сведение) древесной растительности использовался продукт “Forest Extent and Height” — высота древесной растительности. Это глобальное покрытие модели высоты древесной растительности делалось на основе данных Landsat ARD и калибровалось с использованием лидарных данных GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation Lidar).

В качестве обучающих данных использовалась метрика 95 % GEDI энергии сигнала относительно высоты поверхности (RH95). Для каждого тайла Landsat ARD была откалибрована отдельная модель с использованием обучающих данных, собранных в соседних тайлах. Была использована GEDI RH95 2019 г. в качестве зависимой переменной и многовременные показатели Landsat того же года в качестве независимых переменных для калибровки ансамблей алгоритмов деревьев регрессии. Минимальная высота древесных растений, включенных в покрытие, была принята за 3 м [Potapov et al., 2021].

Геопространственный анализ проводился в среде утилиты командной строки Gidal и с использованием утилит, написанных на языке Python. Статистический анализ включал в себя расчет площадей трансформации ландшафтов по административным единицам с использованием утилиты «Таблица пересчетов».

Тематические слои, полученные с помощью геоинформационных технологий, были проанализированы и обработаны картографическими способами изображения, созданы легенды; была создана информация о динамике (потерях и приросте) лесных площадей, которая была сопоставлена с картами административных районов, особо охраняемых природных территорий (для Новой Москвы — крупных лесных массивов).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего, по произведенным расчетам динамика площадей лесных территорий была сопоставлена с динамикой территорий сельскохозяйственных (табл. 1). За первое двадцатилетие XXI в. в целом, несмотря на активное строительство, лесопокрытые площади увеличились на 8 243 891 м² (около 824 га или 8,2 км² — 0,3 % от всей территории, 0,8 % от территории лесов). Это небольшая, но все же положительная динамика. В то же время сельскохозяйственные земли в результате перевода областных территорий в московские и ликвидации распахов (которые хоть в малом количестве, но были) в Старой Москве сократились на 130 943 489 м² (около 13 094 га или 130,9 км² — 5,2 % от всей территории, 95,1 % от территории полей), т. е. поля сократились более чем вдвое.

Табл. 1. Динамика площадей леса и сельскохозяйственных земель в Москве (учитывая новые территории, общая площадь 2 561,5 км²) с 2000 по 2020 гг.
Table 1. Dynamics of forest and agricultural land areas in Moscow (including new territories, total area 2 561.5 km²) from 2000 to 2020

Территории	Общая площадь на 2020 г., м ²	Прирастание, м ²		Убывание, м ²	
Лесопокрытые территории	1 062 936 379	49 780 404		41 536 513	
		% от всей территории	% от территории лесов	% от всей территории	% от территории лесов
		1,9	4,68	1,6	3,91
Распаханные сельскохозяйственные земли	137 679 911	44 803 450		175 746 939	
		% от всей территории	% от территории полей	% от всей территории	% от территории полей
		1,7	32,54	6,9	127,65

Далее подробно были рассмотрены изменения площадей лесных территорий. На рис. 1 показана общая ситуация изменения лесного покрова (прироста и убывания) на фоне самих лесных территорий, расположенных в границах административных округов Москвы.

Наиболее крупные лесные массивы расположены в Восточном административном округе (национальный парк «Лосиный остров» — 30,8 км² на территории Москвы; природно-исторический парк (ПИП) «Измайлово» — 16,1 км²; лесопарк «Кусково» — 2,7 км²), Юго-Западном АО (ПИП «Битцевский лес» — 22,1 км², Бутовский лесопарк — 16,1 км², ландшафтный заказник «Теплый Стан» — 3,3 км²), Северо-Западном АО (ПИП «Москворецкий» — 36,6 км² совместно с частью, расположенной в ЗАО; ПИП «Тушинский» — 6,6 км², ПИП «Долина р. Сходни в Куркино» — 2,7 км²; ПИП «Покровское-Стрешнево» — 2,2 км²), Зеленоградском АО (Зеленоградский лесопарк — 10,2 км²), Новомосковский АО (Ульяновский лесопарк — 26,8 км², Валуевский лесопарк — 21,0 км², государственный природный заказник «Дубровицкий лес» — 5,8 км²).

На рис. 2 и 3 отражен прирост древесных растений в пяти категориях высоты деревьев в метрах с наложением сетки административных районов.

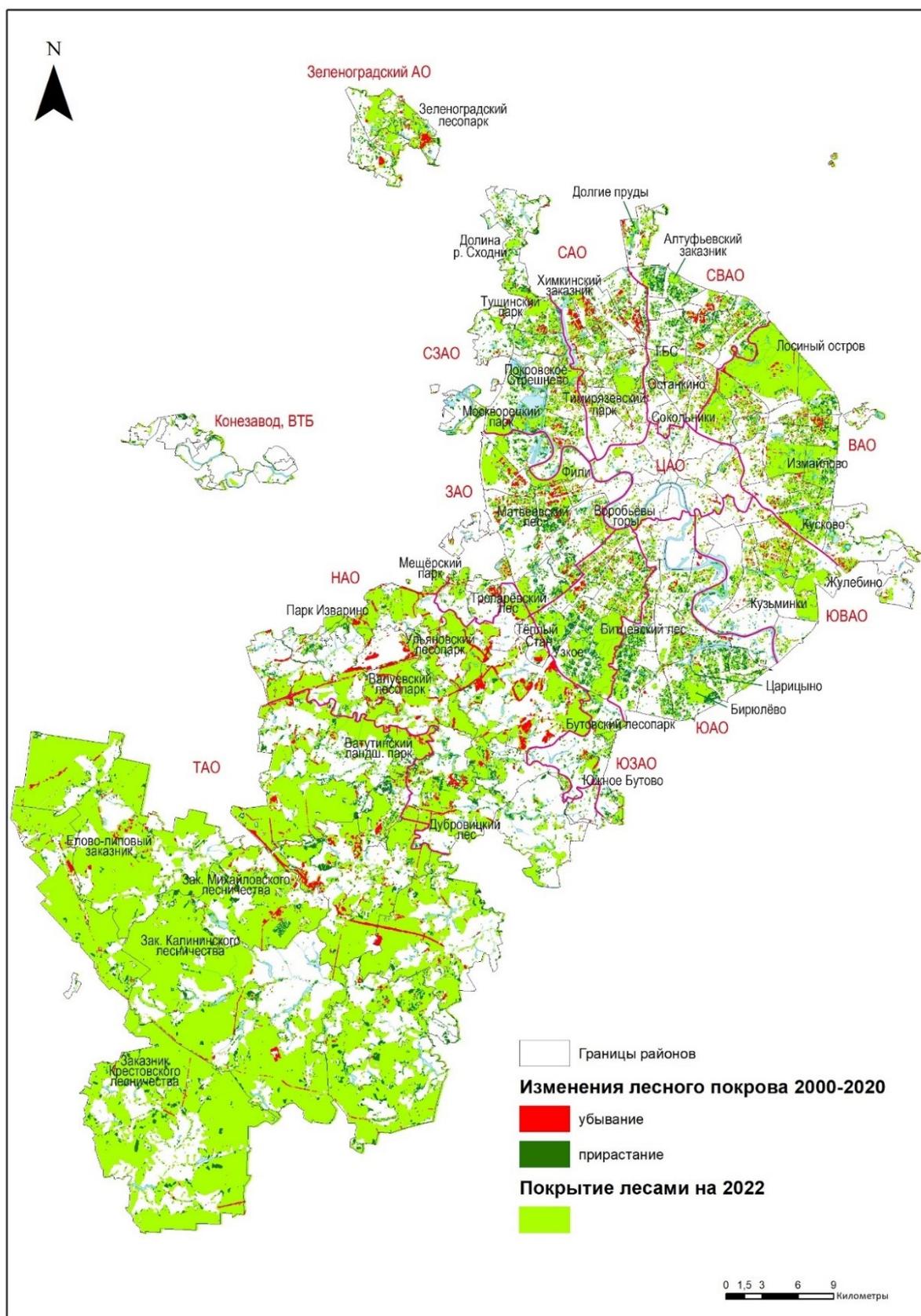


Рис. 1. Изменение лесного покрова Москвы за двадцать лет
Fig. 1. Changes in Moscow's forests cover over twenty years

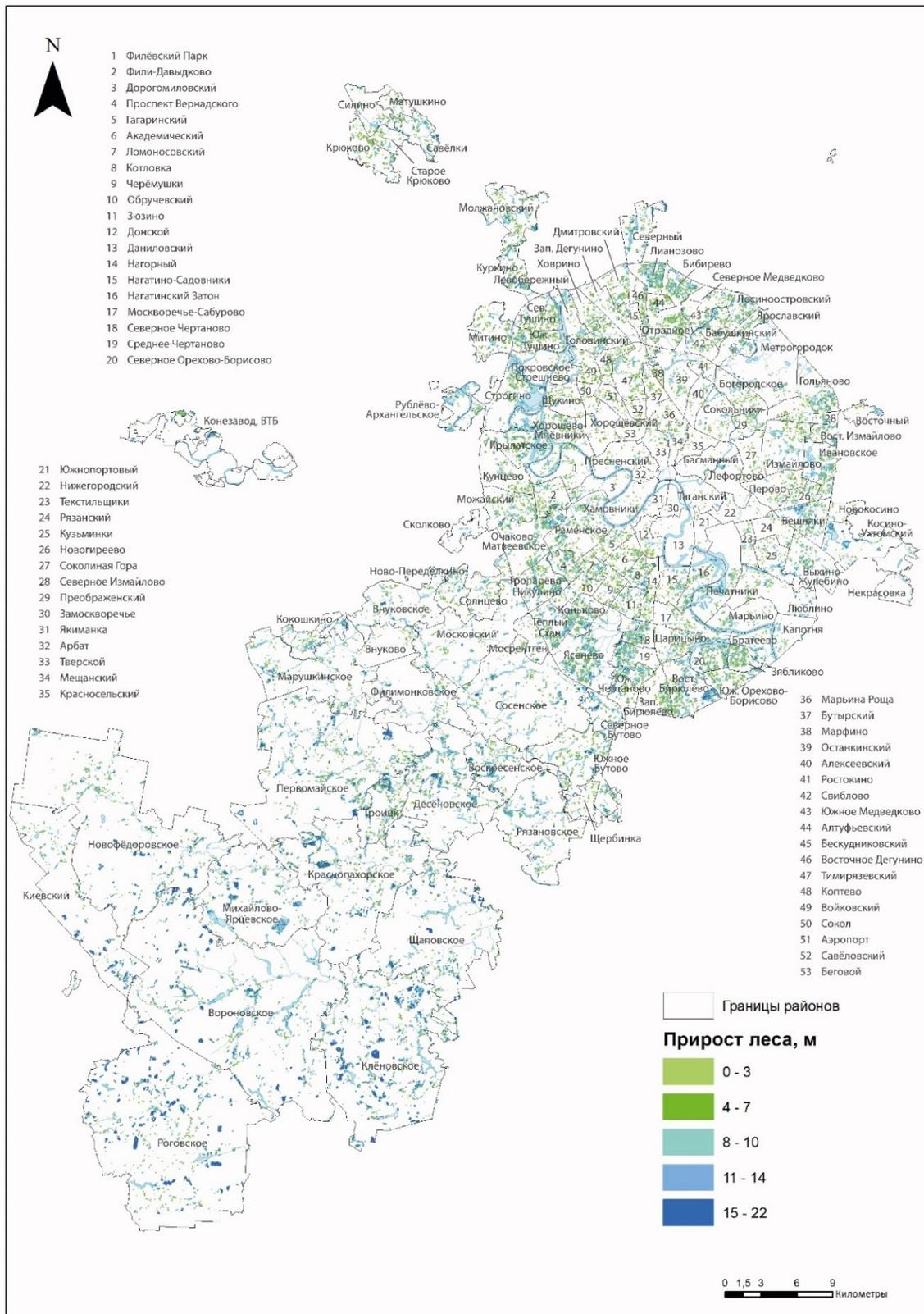


Рис. 2. Прирост древесных растений за 20 лет, м
Fig. 2. Growth of woody plants over 20 years, m

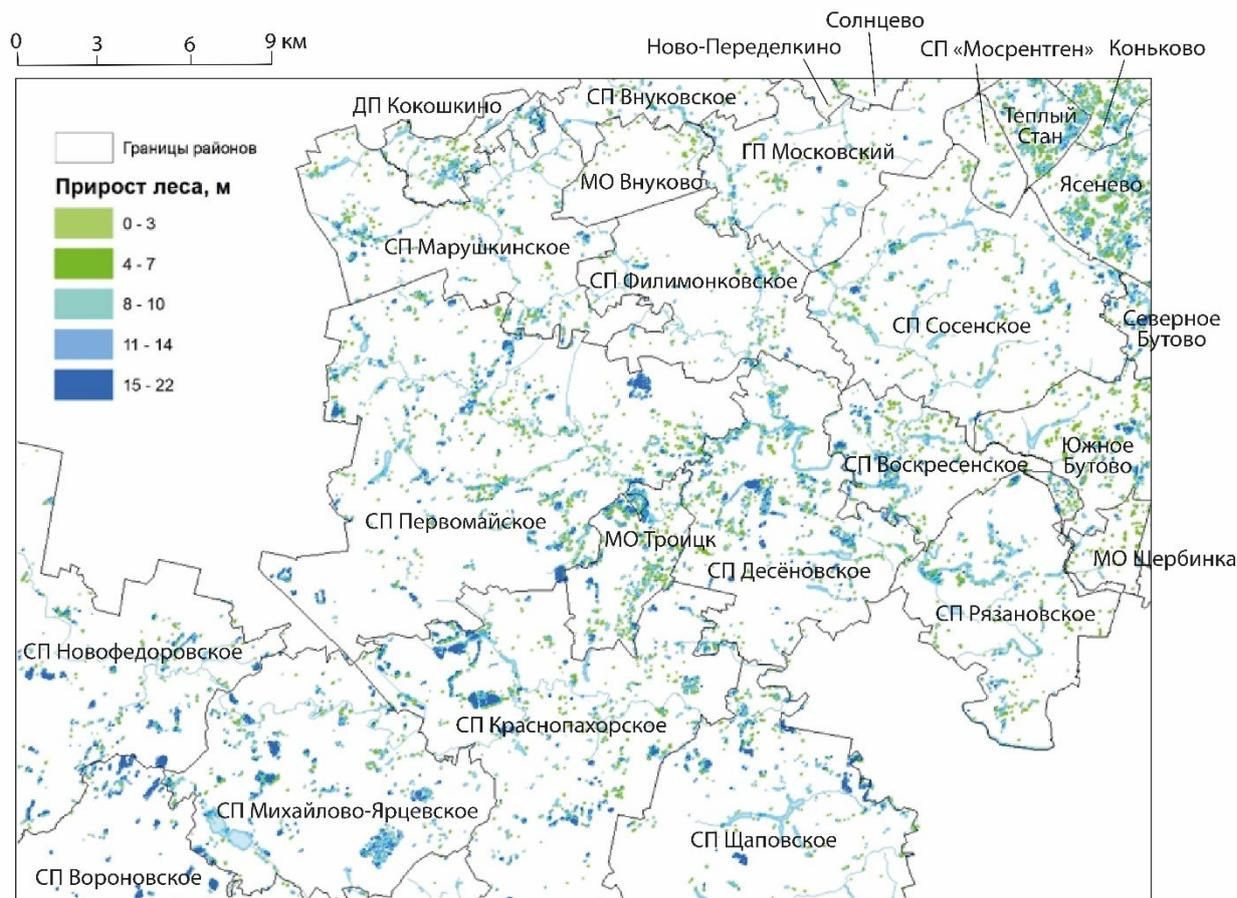


Рис. 3. Места наиболее высоких приростов деревьев в Новой Москве
Fig. 3. Places of the highest tree growth in New Moscow

Мещерский природный парк — 4,6 км²), Троицкий АО (заказники «Хвойно-широколиственные и осиновые леса Калининского лесничества» — 3,8 км²; «Широколиственный лес Крестовского лесничества» — 3,5 км²; «Дубрава с березой и осиной в Яковлевском лесничестве» — 2,1 км²; «Елово-липовые леса с примесью ясеня и вяза» в Голохвастово, Кузнецовское лесничество — 2,0 км²; «Елово-широколиственный и березовый лес Михайловского лесничества» — 1,3 км²).

Как правило, эти леса относятся к ООПТ (особо охраняемым природным территориям) или ООЗТ (особо охраняемым зеленым территориям в Новой Москве, где еще сохранилось достаточно большое количество лесов) [Маркова, 2020].

Наибольшие потери леса за 20 лет относятся к ТиНАО и северным округам Старой Москвы; наибольший прирост лесных территорий характерен для юга Старой Москвы.

Наиболее высокие приросты леса (от 11 до 22 м) и обширные по распространению приросты более низких категорий наблюдаются в районах Старой Москвы:

- Северо-Восточный АО — Лианозово, Алтуфьево, Бибирево, (Алтуфьевский заказник), Лосиноостровский, Ярославский, Бабушкинский, Отрадное;
- Восточный АО — Гольяново, Восточное и Северное Измайлово, Ивановское, Новогиреево, Преображенский, Вешняки (лесопарк «Кусково»);
- Южный АО — Северное, Среднее, Южное Чертаново (парки Покровское, Варшавские пруды), Западное и Восточное Бирюлево (Бирюлевский лесопарк), Северное и Южное Орехово-Борисово, Царицыно (ПИП «Царицыно»), Зябликово;

- Юго-Западный АО — Котловка, Нагорный, Коньково, Теплый Стан, Ясенево (Ясневский лесопарк), Северное и Южное Бутово;
- Западный АО — Тропарево-Никулино (Тропаревский лесопарк), Проспект Вернадского, Очаково-Матвеевское, Раменское, Ломоносовский, Крылатское (ПИП «Москворецкий»);
- Северо-Западный АО — Строгино, Хорошево-Мневники, Северное и Южное Тушино, Молжановский, Куркино (ПИП «Долина р. Сходни в Куркино»).

В основном это жилые районы, близкие к МКАД. На ООПТ, как правило, большого прироста не наблюдается. В Юго-Восточном, Северном и Центральном АО также больших приростов нет (в Центральном более всего — в Мещанском районе и в Лефортово). Отчасти приросты связаны с быстрорастущими породами, используемыми в озеленении города (клен, липа, рябина, береза). Но наибольшей скоростью роста и агрессивностью отличается древесный сорняк клен ясенелистный, или американский (*Acer negundo*), инвазионный вид, натурализовавшийся интродуцент, который представляет угрозу биологическому разнообразию и активно распространился в Москве [Гниненко, 2005]. Весьма быстрым ростом обладают также тополя (в основном используется тополь бальзамический — *Populus balsamifera*), которые крайне выгодны для города благодаря исключительным свойствам поглощать пыль и давать прохладу в жаркие дни. С тополями, однако, в последние годы ведется ожесточенная борьба (в основном жесткое опиливание) из-за тополиного пуха, который на самом деле аллергеном не является, и, кроме того, существуют методы высаживания «непушистых» тополей^{1,2}. Тополя для озеленения города на самом деле весьма перспективны.

В ТиНАО максимальные приросты древесной растительности разбросаны довольно равномерно по районам (муниципальному образованию Троицк и сельским поселениям), как на территориях сельских населенных пунктов, так и зарастающих полей и частично лесов. Наибольшие приросты деревьев в высоту характерны для Троицкого МО, Первомайского, Десёновского, Воскресенского, Краснопахорского, Михайлово-Ярцевского, Клёновского, Роговского СП (в основном в центральной части ТиНАО).

С помощью материалов Landsat изучены также потери лесной растительности (рис. 4). При создании карты особое внимание уделено территориям природопользования, где наблюдаются наибольшие потери. В легенде выделены комплексы жилой и торговой застройки, которые с начала XXI в. были весьма расширены, производственные и транспортные зоны (здесь деревья в основном вырубались под новое строительство). Отмечены спортивные, лечебные и оздоровительные комплексы, характеризующиеся особым типом освоения. Нанесены парки и рекреационные зоны, где наблюдались наибольшие потери лесной растительности.

Для нанесения на карту выбрано прозрачное оформление условных знаков, они в основном даны обводкой различных цветов и форм (кроме знака аэропортов). Это сделано с целью наилучшего совмещения со слоем потерь леса, чтобы они были хорошо видны.

Наибольшие потери леса наблюдаются в спальных районах Старой Москвы, не примыкающих непосредственно к МКАД. Это относится ко всем административным округам, кроме Южного и Юго-Западного (в них больше всего потерь в районах

¹ Головина Е. Ученые выявили самое лучшее дерево для озеленения города. Вечерняя Москва, 26 марта 2019. Электронный ресурс: <https://vm.ru/society/728473-uchenye-vuyavili-samoe-luchshee-derevo-dlya-ozeleneniya-goroda> (дата обращения 28.01.2024)

² Зиннатова А. Д., Снигирева Е. А. Незаслуженно обиженный. Старт в науке. VI Международный конкурс научно-исследовательских и творческих работ учащихся. Электронный ресурс: <https://school-science.ru/6/1/36881> (дата обращения 28.01.2024)

На схеме отражены основные виды московских ООПТ:

- национальный парк;
- природно-исторические парки;
- ландшафтные заказники;
- природные заказники;
- фаунистические заказники;
- орнитологический заказник;
- комплексные заказники;
- заповедный участок;
- экологические парки.

Нагатинно-Садовники, Царицыно, Москворечье-Сабурово, Западное Бирюлёво, Зюзино, Коньково, Обручевский). Небезызвестно, что практически во всех районах столицы за 20 лет шло и в настоящее время продолжается активное высотное строительство. В Центральном АО больше всего деревьев убыло в Пресненском (строительство Делового Центра) и Таганском (расширение Нижегородской улицы) районах. Отмечены также производственные предприятия, в основном относящиеся к автомобильному делу, которых было создано с начала XXI в. большое количество.

На востоке Зеленоградского АО также произошли крупные потери древесной растительности. Например, это относится к промзоне Малино, занятой в основном гаражами и автопредприятиями. Сейчас там планируется построить жилые кварталы¹.

В Новой Москве по потерям деревьев особенно выделяются линии транспортных магистралей, которые за 20 лет были расширены или проложены вновь (ЦКАД, Калужское, Киевское, Филимонковское шоссе, линии улиц и железных дорог). Довольно много линий протек. И, конечно, много осуществлено вырубок под строительство жилых, деловых и медицинских комплексов (Троицк, Красная Пахра, Коммунарка и др.). Выделяется полигон отходов в Малинках (новая московская свалка). Из ООЗТ в ТиНАО отмечены некоторые заказники и парки, потерявшие деревья (см. рис. 4).

На рис. 5 показаны потери леса с сопоставлением с территориями ООПТ (Старая Москва). Не все небольшие ООПТ имеются на фоновой подложке; в таком случае они нанесены прозрачными кольцевыми значками.

Наибольшие потери леса характерны для Лосиног острова, что является весьма неблагоприятным явлением для сохранения природной среды национального парка. Из природно-исторических парков наиболее пострадали Измайлово, Кузьминки-Люблино, Царицыно, Москворецкий парк. Ландшафтные преобразования и городское транспортное строительство в настоящее время, после 2020 г., значительно повлияли на Покровское-Стрешнево и Битцевский лес, но на данной схеме это не отразилось. Из других ООПТ можно отметить природные заказники «Склоны долины р. Москвы в Сабурово», «Троицкий», «Долина р. Сетуни», ландшафтный заказник «Химкинский», экологический парк «Участок Нагатинской поймы р. Москвы», где произошли значительные потери.

Изменения площадей прироста и убыли лесов в целом по категориям высот деревьев мы можем проследить по табл. 2 и диаграммам, которые были построены для наглядной демонстрации числовых данных (рис. 6). С использованием геоинформационных

¹ В промзону «Малино» вдохнут вторую жизнь. Zelao.ru. Новости Зеленограда. Окружная электронная газета, 13.10.2023. Электронный ресурс: <https://www.zelao.ru/58/582/55831-v-promzonu-malino-vdohnut-vtoruyu-jizn/> (дата обращения 28.01.2024)

технологий был произведен подсчет площадей для каждой категории высот в м², а также подсчитан % от площади изменений.

Наибольшие площади прироста деревьев наблюдается в категориях 5, 7, 9–13 м, наименьший — 1–4 и 25 м. Максимальные потери площадей леса наблюдаются в высотах 12, 18, 19 и 21 м, минимальные — в категориях 1–4 и 27 м. Нулевые приросты и потери — не самые маленькие, около 1,5 % в относительной категории (доля стабильных экосистем).

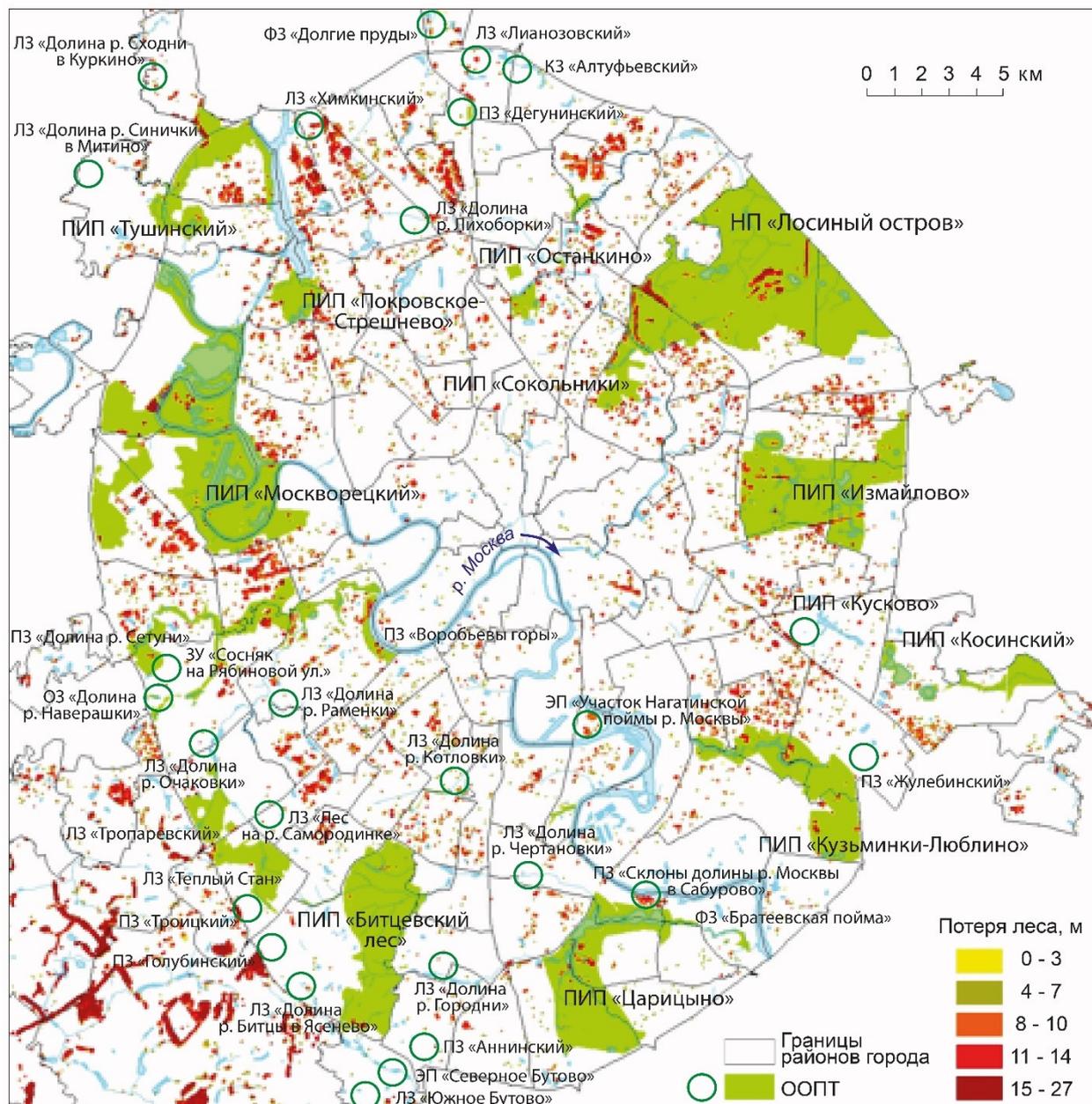


Рис. 5. Фрагмент наложения схемы потерь леса на схему ООПТ. Москва внутри МКАД
Fig. 5. Fragment of the overlay of the forest loss scheme on the protected area scheme.
Moscow inside the Moscow Ring Road

Табл. 2. Изменения в приросте и убыли лесов по категориям высот (в м) с 2000 по 2020 гг.
Table 2. Changes in forest gain and loss by altitude categories (in m) from 2000 to 2020

Категории, м	Прирост		Убыль	
	Площадь, м ²	% от площади изменений	Площадь, м ²	% от площади изменений
0	618 467	1,24	676 021	1,63
1	11 841	0,02	14 895	0,04
2	37 276	0,07	33 342	0,08
3	51 703	0,10	112 142	0,27
4	46 007	0,09	114 225	0,27
5	5 075 642	10,20	1 085 275	2,61
6	3 650 511	7,33	1 231 641	2,97
7	5 764 800	11,58	2 227 664	5,36
8	3 297 931	6,62	1 707 285	4,11
9	4 461 581	8,96	2 510 770	6,04
10	4 514 785	9,07	2 718 701	6,55
11	4 604 177	9,25	2 342 810	5,64
12	5 715 415	11,48	3 895 852	9,38
13	4 023 400	8,08	2 945 972	7,09
14	3 461 695	6,95	2 970 850	7,15
15	3 316 434	6,66	2 816 237	6,78
16	2 424 825	4,87	2 281 012	5,49
17	2 465 558	4,95	2 798 048	6,74
18	2 503 319	5,03	3 123 272	7,52
19	1 951 349	3,92	3 100 729	7,47
20	1 625 699	3,27	2 236 722	5,38
21	1 099 282	2,21	3 942 211	9,49
22	1 394 427	2,80	2 509 693	6,04
23	775 945	1,56	1 404 019	3,38
24	242 222	0,49	1 135 944	2,73
25	6 192	0,01	1 640 115	3,95
26	—	—	200 591	0,48
27	—	—	8 256	0,02

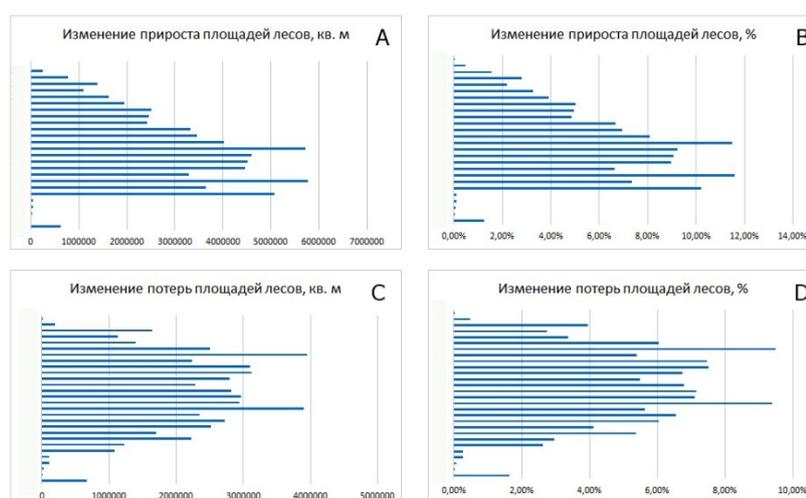


Рис. 6. Диаграммы изменений лесов по категориям высот (в м) с 2000 по 2020 гг.
Прирост площадей: А — в м²; В — в %. Убыль площадей: С — в м²; D — в %
Fig. 6. Diagrams of forest changes by altitude categories (in m) from 2000 to 2020. Area gain:
A — in m²; B — in %. Area loss: C — in m²; D — in %

ВЫВОДЫ

В результате исследований проделана следующая работа и получены определенные выводы:

1. Изучена динамика древесной растительности на территории Большой Москвы за двадцать лет (2000–2020 гг.), с того времени, когда Москва еще не расширила свои границы.
2. С помощью материалов дистанционного зондирования Landsat ARD и геоинформационных технологий на основе значений отражательной способности, яркостной температуры, вегетационных индексов построена серия карт приростов и потерь древесной растительности.
3. При подсчете площадей лесов и полей установлено, что за 20 лет их площадь немного увеличилась, что является положительной динамикой для Москвы. Площадь сельскохозяйственных угодий значительно, более чем вдвое, сократилась (имеется в виду Новая Москва).
4. Прирост древесной растительности в Старой Москве характерен в основном для жилых районов, близких к МКАД. Максимальные приросты, вероятнее всего, связаны с инвазивным видом клен ясенелистный (*Acer negundo*). В ТиНАО максимальные приросты древесной растительности разбросаны равномерно по районам.
5. На ООПТ, как правило, большого прироста не наблюдается. Потери древесной растительности на ООПТ связаны с их ландшафтным преобразованием и строительством различных утилитарных и рекреационных объектов, в т. ч. спортивных.
6. Наибольшие потери леса наблюдаются в спальных районах Старой Москвы, не примыкающих непосредственно к МКАД. В Новой Москве выделяются линии транспортных магистралей и районы, ориентированные на застройку.
7. Из особо охраняемых природных территорий наибольшие потери леса характерны для национального парка «Лосиный остров», что является весьма неблагоприятным явлением. Из природно-исторических парков наиболее пострадали Измайлово, Кузьминки-Люблино, Царицыно, Москворецкий парк.
8. В основном же территории ООПТ характеризуются стабильностью своих древесных насаждений, не отличаясь ни сильным приростом, ни большой убылью.
9. Была произведена оценка изменений площадей прироста и убыли лесов в целом в городе по категориям высот деревьев, в результате которой установлено, что наибольший прирост характерен для категорий 5, 7, 9–13 м, а наибольшие потери — для категорий 12, 18, 19 и 21 м. Территории, где высота деревьев не изменялась, также имеют свою небольшую долю в площади города (около 1,5 %).

Полученные данные можно рекомендовать для изучения истории города, развития городского планирования и природоохранных мероприятий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках тем госзадания МГУ имени М. В. Ломоносова «Изучение динамики социоприродных систем с использованием геоинформационного картографирования и цифровых технологий» (121051100163-3), 2021/2025 и ИГРАН «Биотические, географо-гидрологические и ландшафтные оценки окружающей среды для создания основ рационального природопользования» (FMWS-2024-0007), 2024/2028.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Lomonosov Moscow State University “Studying the dynamics of socio-natural systems using geoinformation mapping and digital technologies” (121051100163-3), 2021/2025, and of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences “Biotic, geographic-hydrological and landscape assessments of the environment to create a basis for rational nature management” (FMWS-2024-0007), 2024/2028.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеева Н. Н., Климанова О. А., Хазиева Е. С. Глобальные базы данных земельного покрова и перспективы их использования для картографирования современных ландшафтов. Известия РАН. Серия географическая, 2017. № 1. С. 110–123. DOI: 10.15356/0373-2444-2017-1-110-123.

Антонов С. А. Анализ пространственного положения защитных лесных насаждений на основе геоинформационных технологий и данных дистанционного зондирования Земли. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2020. Т. 26. Ч. 2. С. 408–420. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-408-420.

Васильченко А. А., Выприцкий А. А. Картографирование лесных насаждений Волгоградской области по данным ДЗЗ с использованием индексов BSFI и NDWI. Геодезия и картография, 2023. № 10. С. 39–49. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1000-10-39-49.

Гниненко Ю. И. Инвазии чуждых видов в лесные сообщества. Чужеродные виды на территории России, 11.02.2012. Электронный ресурс: http://www.sevin.ru/invasive/publications/gninenko_02.html (дата обращения 02.02.2024).

Голубева Е. И., Каширина Е. С., Новиков А. А., Глухова А. В. Использование индекса NDVI для геоэкологической оценки особо охраняемых природных территорий на примере города Севастополя. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2019. Т. 25. Ч. 1. С. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-320-331.

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. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 496–507. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-496-507.

Гусев А. П., Соколов А. С. Информационно-аналитическая система для оценки антропогенной нарушенности лесных ландшафтов. Вестник Томского государственного университета. Биология, 2008. № 309(4). С. 176–179.

Гусев А. П., Шпилевская Н. С. Фитоиндикаторы техногенного химического воздействия на лесной ландшафт. Геополитика и экогеодинамика регионов, 2020. Том 6(16). Вып. 1. С. 192–198.

Захаров К. В., Медведков А. А., Иванова Е. Ю. Технология геоэкологической оценки урбанизированных территорий (на примере Ближнего Подмосковья). ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2019. Т. 25. Ч. 1. С. 352–361. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-352-361.

Кочуров Б. И. Геоэкология: экодиагностика и эколого-хозяйственный баланс территорий. Смоленск: Маджента, 2003. 500 с.

Литинский П. Ю. Анализ динамики антропогенных изменений экосистем водосбора р. Кемь (бассейн Белого моря) с использованием данных Global Forest Change. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2020. Т. 26. Ч. 2. С. 396–407. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-396-407.

Маркова О. И. Особо охраняемые территории Москвы как основа экологического каркаса мегаполиса. Географическая среда и живые системы, 2020. № 4. С. 28–47. DOI: 10.18384/2712-7621-2020-4-28-47.

Мелкий В. А., Верхотуров А. А. Анализ динамики состояния лесных растительных сообществ в заказнике «Макаровский» (Сахалин) по данным дистанционного зондирования земли. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2023. Т. 29. Ч. 1. С. 393–405. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-393-405.

Петров К. М., Терехина Н. В. Растительность России и сопредельных территорий. СПб.: Химиздат, 2013. 328 с.

Радченко Т. А., Морозова Л. М., Веселкин Д. В., Федоров Ю. С. Оценка состояния растительности: луга и тундры [учеб.-метод. пособие]. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2016. 86 с.

Халин П. С. Анализ замутненности воды р. Волга в районе Волжской ГЭС на основе данных дистанционного зондирования. Прогрессивные технологии в мировом научном пространстве: Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 14 марта 2022 г.). Стерлитамак: АМИ, 2022. С. 5–10.

Шахбазян Т. З. Мониторинг особо охраняемых природных территорий лесостепных ландшафтов Ставропольской возвышенности средствами ДДЗ. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 1. С. 364–376 DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-364-376.

Potapov P., Hansen M. C., Kommareddy I., Kommareddy A., Turubanova S., Pickens A., Adusei B., Tyukavina A., Ying Q. Landsat Analysis Ready Data for Global Land Cover and Land Cover Change Mapping. Remote Sensing, 2020. No. 12, 426. 22 p. DOI: 10.3390/rs12030426.

Potapov P., Li X., Hernandez-Serna A., Tyukavina A., Hansen M. C., Kommareddy A., Pickens A., Turubanova S., Tang H., Silva C. E., Armston J., Dubayah R., Blair J. B., Hofton M. Mapping Global Forest Canopy Height through Integration of GEDI and Landsat Data. Remote Sensing of Environment, 2021. V. 253. Art. 112165. 11 p. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112165.

Potapov P., Hansen M. C., Pickens A., Hernandez-Serna A., Tyukavina A., Turubanova S., Zalles V., Li X., Khan A., Stolle F., Harris N., Song X.-P., Baggett A., Kommareddy I., Kommareddy A. The Global 2000–2020 Land Cover and Land Use Change Dataset Derived from the Landsat Archive: First Results. Frontiers in Remote Sensing, 2022. V. 3. Art. 856903. 22 p. DOI: 10.3389/frsen.2022.856903.

Wulder M. A., Masek J. G., Cohen W. B., Loveland T. R., Woodcock C. E. Opening the Archive: How Free Data Has Enabled the Science and Monitoring Promise of Landsat. Remote Sensing of Environment, 2012. V. 122. P. 2–10. DOI: 10.1016/j.rse.2012.01.010.

REFERENCES

Alekseeva N. N., Klimanova O. A., Khazieva E. S. Global land cover databases and prospects for their use for mapping modern landscapes. *Izvestia RAN. Seriya Geograficheskaya (News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series)*, 2017. V. 1. P. 110–123 (in Russian). DOI: 10.1536/0373-2444-2017-1-110-123.

Antonov S. A. Spatial analysis of protective forest plantations based on geographic information technologies and remote sensing data. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2020. V. 26. Part 2. P. 408–420 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-408-420.*

Golubeva E. I., Kashirina E. S., Novikov A. A., Glukhova A. V. Using the NDVI index for geocological estimation of specially protected natural territories by the example of Sevastopol. *InterCarto. InterGIS. Geoinformation support for sustainable development of territories: Proceedings of the International Conf. Moscow: Moscow University Press, 2019. V. 25. Part 1. P. 320–331 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-320-331.*

Gninenko Yu. I. Invasions of alien species into forest communities. *Alien species on the territory of Russia*, 11.02.2012. Web resource: http://www.sevin.ru/invasive/publications/gninenko_02.html (accessed 02.02.2024).

Grishchenko M. Y., Lucher D. A., Bocharnikov M. V. Evaluation of the possibility of vegetation interpretation on thermal infrared satellite images, case of the Southern Urals and Kuznetsk Alatau. *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. 496–507 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-496-507.*

Gusev A. P., Shpilevskaya N. S. Phytoindicators of technogenic chemical impact on forest landscape. *Geopolitics and ecogeodynamics of regions*, 2020. V. 6(16). Iss. 1. P. 192–198.

Gusev A. P., Sokolov A. S. Information and analytical system for assessing anthropogenic disturbance of forest landscapes. *Tomsk State University Journal. Biology*, 2008. No. 309(4). P. 176–179.

Khalin P. S. Analysis of turbidity of the Volga River water in the area of the Volga Hydroelectric Power Station based on remote sensing data. *Progressive technologies in the global scientific space: Proceedings of articles based on the results of the International scientific and practical conference (Ekaterinburg, March 14, 2022). Sterlitamak: AMI, 2022. P. 5–10.*

Kochurov B. I. *Geoecology: ecodiagnosics and ecological-economic balance of territories.* Smolensk: Magenta, 2003. 500 p. (in Russian).

Litinsky P. Yu. Analysis of the dynamics of anthropogenic changes in ecosystems of the Kem River catchment (White Sea basin) using Global Forest Change data. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2020. V. 26. Part 2. P. 396–407 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-396-407.*

Markova O. I. Specially protected territories of Moscow as the basis of the ecological framework of a metropolis. *Geographical Environment and Living Systems*, 2020. No. 4. P. 28–47. DOI: 10.18384/2712-7621-2020-4-28-47.

Melkiy V. A., Verkhoturov A. A. Analysis of the dynamics of condition forest plant communities in the “Makarovsky” nature sanctuary (Sakhalin Island) by remote sensing data. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International*

conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2023. V. 29. Part 1. P. 393–405 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-393-405.

Petrov K. M., Terekhina N. V. Vegetation of Russia and adjacent territories. St. Petersburg: Chimizdat, 2013. 328 p. (in Russian).

Potapov P., Hansen M. C., Kommareddy I., Kommareddy A., Turubanova S., Pickens A., Adusei B., Tyukavina A., Ying Q. Landsat Analysis Ready Data for Global Land Cover and Land Cover Change Mapping. Remote Sensing, 2020. No. 12, 426. 22 p. DOI: 10.3390/rs12030426.

Potapov P., Li X., Hernandez-Serna A., Tyukavina A., Hansen M. C., Kommareddy A., Pickens A., Turubanova S., Tang H., Silva C. E., Armston J., Dubayah R., Blair J. B., Hofton M. Mapping Global Forest Canopy Height through Integration of GEDI and Landsat Data. Remote Sensing of Environment, 2021. V. 253. Art. 112165. 11 p. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112165.

Potapov P., Hansen M. C., Pickens A., Hernandez-Serna A., Tyukavina A., Turubanova S., Zalles V., Li X., Khan A., Stolle F., Harris N., Song X.-P., Baggett A., Kommareddy I., Kommareddy A. The Global 2000–2020 Land Cover and Land Use Change Dataset Derived from the Landsat Archive: First Results. Frontiers in Remote Sensing, 2022. V. 3. Art. 856903. 22 p. DOI: 10.3389/frsen.2022.856903.

Radchenko T. A., Morozova L. M., Veselkin D. V., Fedorov Yu. S. Assessment of vegetation condition: Meadows and tundra [study-method. manual]. Ekaterinburg: Publishing House of the Ural University, 2016. 86 p. (in Russian).

Shahbazyan T. Z. Monitoring of specially protected natural territories of forest-steppe landscapes of the Stavropol upland by means of 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. 364–376 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-364-376.

Vasilchenko A. A., Vypritsky A. A. Mapping of forest plantations of the Volgograd region according to remote sensing data using the BSFI and NDWI indices. Geodesy and Cartography, 2023. No. 84(10). P. 39–49 (in Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1000-10-39-49.

Wulder M. A., Masek J. G., Cohen W. B., Loveland T. R., Woodcock C. E. Opening the Archive: How Free Data Has Enabled the Science and Monitoring Promise of Landsat. Remote Sensing of Environment, 2012. V. 122. P. 2–10. DOI: 10.1016/j.rse.2012.01.010.

Zakharov E. V., Medvedkov A. A., Ivanova E. Yu. Technology of geocological assessment of urbanized territories (on the example of the Near Moscow Region). InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2019. V. 25. Part 1. P. 352–361 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-352-361.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ И КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ, ЭКОНОМИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ АСПЕКТОВ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ

<i>Маркова О.И., Тикунов В. С.</i> Атласные информационные системы для охраны природного и культурного наследия	5
<i>Красовская Т. М., Евсеев А. В., Слипечук М. В., Белоусов С. К.</i> Пространственный анализ потенциальных экологических конфликтов в Антарктиде на фоне усиления антропогенной нагрузки и изменений климата	23
<i>Панкратов А. А., Бадина С. В.</i> Анализ трансформации территориально-отраслевой структуры выручки ИТ-сектора Российской Федерации в 2019–2022 гг.	37
<i>Syomin P. O.</i> Legal business geography in Russia: regional analysis and mapping using tax service open data	54
<i>Криксунов Е. А., Чистов С. В., Аляутдинов А. Р., Бобырев А. Е., Ковзель Д. Г., Гриценко В. А., Фершалов М. Ю.</i> Пространственное распределение серых китов в Пильтунском нагульном районе с учетом данных акустического мониторинга	66
<i>Занозин В. В., Бармин А. Н., Занозин В. В.</i> Геопространственное моделирование организации ландшафтно- экологического каркаса дельты Волги	80
<i>Минеев А. Н., Семина И. А., Фоломейкина Л. Н.</i> Анализ транспортной доступности населенных пунктов Республики Мордовия с использованием геоинформационных технологий	94
<i>Спирин Ю. А., Зотов С. И., Таран В. С., Янковский С. А.</i> Сравнительный анализ пространственно-временной изменчивости загрязнения рек юго-восточной части Калининградской области по осенним гидрологическим сезонам	112

<i>Огурцов А. Н., Дмитриев В. В., Каледин Н. В.</i> Пространственно-временной анализ роли социальных детерминант общественного здоровья в распространении COVID-19 в Северо-Западном федеральном округе	128
<i>Тебиева Д. И., Доброносков В. В.</i> Природно-экологический каркас Республики Северная Осетия — Алания	145
<i>Ямашкин А. А., Ямашкин С. А.</i> Геопорталы и технологии интернета вещей как инструмент управления организационными территориально распределенными системами	161
<i>Suhail M., Khan M. N., Ravshanov A. X., Usmanov M.</i> Suitability assessment of wind energy farming in the desert landscape of Zarafshan Valley, Uzbekistan	179
<i>Панкратов А. А.</i> Подходы к разработке рейтинга регионов России по уровню развития ИТ-индустрии	193
<i>Grudtsyn N. A., Chistobaev A. I., Kulakovskiy E. S.</i> GIS in the study of the spatial organization of medical tourism infrastructure: methodology and practical approaches	208
<i>Марчукова О. В., Дирин Д. А., Борисенко М. А., Гудковских М. В.</i> Тенденции изменения климатических характеристик в Горном Алтае в постсоветский период	224
<i>Варшанина Т. П., Плисенко О. А., Свиридова Е. П.</i> ГИС «Паспорт климатической безопасности Республики Адыгея»	232
<i>Гуня А. Н., Гакаев Р. А.</i> Ландшафтно-геоэкологическое картографирование оползней на территории Чеченской Республики	242
<i>Ротанова И. Н., Важенин Е. Н., Маменов С. Д., Юнаков В. С.</i> Подходы к формированию регионального геоинформационного ресурса в Алтайском крае	257

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ В ГЕОИНФОРМАЦИОННОМ
МОДЕЛИРОВАНИИ И АНАЛИЗЕ ДАННЫХ

<i>Обухов Л. А., Паниди Е. А., Бляхарский Д. П.</i> Совершенствование методов создания картографических анимаций	270
<i>Рыльский И. А., Парамонов Д. А., Кожухарь А. Ю., Груздев Р. В.</i> Создание виртуальной модели района Архыз	280
<i>Воробьева А. А.</i> Применение машинного обучения методом случайного леса и систем управления большими пространственными данными для восстановления рядов данных вегетационных индексов	295
<i>Высоцкая А. А., Медведков А. А., Кузьмичев И. С.</i> Ландшафтно-картографический анализ территории Южно-Камчатского природного парка (участка Всемирного природного наследия «Вулканы Камчатки»)	306
<i>Красовский А. П.</i> Большие данные как инструмент исследований в топонимике и истории межевания	321
<i>Красовский А. П.</i> О проблеме идентификации одноименных сел в отечественных документах XVI–XX вв. и инструментах ее изучения	342
<i>Требелева Г. В., Сакания С. М.</i> Распространение христианства в Абхазии в позднеантичный и средневековый периоды по данным пространственного анализа памятников в ГИС	362
<i>Грибок М. В.</i> Подходы к разработке анимированной инфографики о регионах России в рамках реализации просветительского проекта	384
<i>Гордезиани Т. П., Элбакидзе С. Г.</i> Картографирование историко-религиозных памятников Карельского муниципалитета (Грузия)	397

Кочетова А. В., Игнатенко Д. А., Сидорина И. Е.
Использование цифровых моделей местности высокого
пространственного разрешения для выделения водотока 410

Сукманова Т. В., Белов Н. С.
Применение цифровых двойников при исследовании
исторических ландшафтов береговой зоны 425

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ
REMOTE METHODS IN EARTH RESEARCH

Kazaryan M. L., Shahramanian M. A., Tikunov V. S., Lin H.
The system of global space monitoring of the processes of littering of the planet Earth
(a joint Russian-Chinese project) 442

*Рыльский И. А., Потапов М. А., Панин А. Н.,
Груздев Р. В.*
Сравнение качества создания цифровой модели рельефа залесенной территории
по данным аэрофотосъемки с использованием программных
комплексов Photomod и Metashape 462

*Asangaliyev E. A., Apshikur B., Lutay S. S.,
Assylkhanova Z. A.*
Spatial analysis and mapping of potential wildfires from Landsat satellite data 476

*Лаврусевич А. А., Алешина Т. С., Вадачкоря О. А., Лаврусевич И. А.,
Машкова Е. А., Шендяпина С. В., Гордиенко А. Н.*
Анализ данных ДЗЗ для оценки карстоопасности участка строительства аавтодороги
Мезмай–Лагонаки (Краснодарский край) 491

*Kazaryan M. L., Shahramanian M. A., Tikunov V. S.,
Tikunova I. N.*
Application of discrete orthogonal transformations for identifying and displaying
municipal solid waste in geoinformation systems on the Earth's surface 507

*Kartsan I. N., Zhukov A. O.,
Skripachev V. O.*
Model for calculating the speed of delivery of remotely sensed Earth
observation information 534

<i>Петрова О. А., Даумова Г. К., Денисова Н. Ф., Искалиева Г. М., Елисеева А. В.</i> Геоинформационные исследования для мониторинга снежных лавин в Восточно-Казахстанской области Республики Казахстан	545
<i>Скрыпичина Т. Н., Воротилов А. Г., Кочнева Д. А., Гаврилюк Ф. Д., Смирнов Е. А.</i> Особенности съемки и методика моделирования частично разрушенных архитектурных объектов по фотограмметрическим данным	556
<i>Китов А. Д., Плюснин В. М.</i> Сравнительная динамика отдельных ледников широтного трансекта (Кодар–Гималаи)	568
<i>Melkiy V. A., Verkhoturov A. A.</i> Mapping of forest disturbance from winds of extratropical cyclones in the southern part of Sakhalin by remote sensing data	581
<i>Поletaев А. О.</i> Особенности пространственно-временной изменчивости фотосинтетической активности растительности долинно-речных ландшафтов	588
<i>Захарова Е. В., Фомин В. В.</i> Оценка точности спутниковой температуры поверхности Балтийского моря	604
<i>Рыльский И. А., Парамонов Д. А., Грибок М. В., Груздев Р. В.</i> Методика планирования залета при проведении воздушного лазерного сканирования на территориях с горным рельефом	617
<i>Коваленко А. К., Тесленок С. А., Калашикова Л. Г., Богдашкина О. Ф., Дмитриев П. С., Скурихин А. А., Фомин И. А.</i> Применение метода позиционирования высокой точности для геодезического обеспечения аэрофотосъемочных работ при инженерных изысканиях	632
<i>Маркова О. И., Гуня А. Н., Пуреховский А. Ж.</i> Оценка изменения растительного покрова территории Большой Москвы за двадцать лет с использованием космических снимков	650

CONTENTS¹

GIS AND CARTOGRAPHIC SUPPORT OF ECOLOGICAL, ECONOMIC AND SOCIAL ASPECTS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF TERRITORIES

<i>Markova O. I., Tikunov V. S.</i> Atlas information systems for the protection of natural and cultural heritage	5 (6)
<i>Krasovskaya T. M., <u>Evseev A. V.</u>, Slipenchuk M. V., Belousov S. K.</i> Spatial analysis of potential environmental conflicts in Antarctica at the background of anthropogenic pressure increase and climate change	23 (24)
<i>Pankratov A. A., Badina S. V.</i> Analysis of transformation of the territorial and industry structure of revenue of the it sector of the Russian Federation in 2019–2022	37 (38)
<i>Syomin P. O.</i> Legal business geography in Russia: regional analysis and mapping using tax service open data	54
<i>Kriksunov E. A., Chistov S. V., Alyautdinov A. R., Bobyrev A. E., Kovzel D. G., Gritsenko V. A., Fershalov M. Yu.</i> Spatial distribution of gray whales in the Piltun feeding area taking into account acoustic monitoring data	66 (67)
<i>Zanozin V. V., Barmin A. N., Zanozin V. V.</i> Geospatial modeling of the organization of the landscape-ecological framework of the Volga delta	80 (81)
<i>Mineev A. N., Semina I. A., Folomeikina L. N.</i> Analysis of the Republic of Mordovia settlements transport accessibility via geoinformation technologies	94 (95)
<i>Spirin Yu. A., Zotov S. I., Taran V. S., Yankovsky S. A.</i> Comparative analysis of spatio-temporal variability of rivers pollution in the southeastern part of the Kaliningrad region by autumn hydrological seasons	112 (113)

¹ The page number in brackets corresponds to the English text

<i>Ogurtsov A. N., Dmitriev V. V., Kaledin N. V.</i>	128
Spatio-temporal analysis of the role of social determinants of public health in the spread of COVID-19 in the Northwestern federal district	(129)
<hr/>	
<i>Tebieva D. I., Dobronosov V. V.</i>	145
Naturally-ecological framework of the Republic of North Ossetia — Alania	(146)
<hr/>	
<i>Yamashkin A. A., Yamashkin S. A.</i>	161
Geoportals and technologies of the internet of things as a tool for managing organizational territorially distributed systems	(162)
<hr/>	
<i>Suhail M., Khan M. N., Ravshanov A. X., Usmanov M.</i>	
Suitability assessment of wind energy farming in the desert landscape of Zarafshan Valley, Uzbekistan	179
<hr/>	
<i>Pankratov A. A.</i>	193
Approaches to developing ratings of Russian regions by level of IT industry development	(194)
<hr/>	
<i>Grudtsyn N. A., Chistobaev A. I., Kulakovskiy E. S.</i>	
GIS in the study of the spatial organization of medical tourism infrastructure: methodology and practical approaches	208
<hr/>	
<i>Marchukova O. V., Dirin D. A., Borisenko M. A., Gudkovskikh M. V.</i>	224
Trends of climate change in Mountain Altai during post-soviet period	(225)
<hr/>	
<i>Varshanina T. P., Plisenko O. A., Sviridova E. P.</i>	232
GIS “Passport of climatic safety of the Republic of Adygea”	(233)
<hr/>	
<i>Gunya A. N., Gakaev R. A.</i>	242
Landscape and geoecological mapping of landslides on the territory of the Chechen Republic	(243)
<hr/>	
<i>Rotanova I. N., Vazhenin E. N., Mamenov S. D., Yunakov V. S.</i>	257
Approaches to the formation of a regional geoinformation resource in the Altai krai	(258)

NEW METHODS AND APPROACHES IN GEOINFORMATION MODELING
AND DATA ANALYSIS

<i>Obuhov L. A., Panidi E. A., Bliakharskii D. P.</i> Improving the methods of creating cartographic animations	270 (271)
<i>Rylskiy I. A., Paramonov D. A., Kozhukhar A. Yu., Gruzdev R. V.</i> Creating virtual models of Arhyz region	280 (281)
<i>Vorobyeva A. A.</i> Application of random forest machine learning and big geospatial data management systems applied to reconstruct the vegetation index data series	295 (296)
<i>Vysotskaya A. A., Medvedkov A. A., Kuzmichev I. S.</i> Landscape analysis of the South Kamchatka natural park territory (World Natural Heritage site “Volcanoes of Kamchatka”)	306 (307)
<i>Krassowski A. P.</i> Big data as a research tool in toponymy and the history of land surveying	321 (322)
<i>Krassowski A. P.</i> About the problem of identifying rural of the same name in russian documents of the XVI–XX centuries and the tools to research it	342 (343)
<i>Trebeleva G. V., Sakania S. M.</i> The spread of christianity in Abkhazia according to the spatial analysis of monuments in GIS in the late antique and medieval periods	362 (363)
<i>Gribok M. V.</i> Approaches to the development of animated infographics about the regions of Russia in the framework of the outreach project	384 (385)
<i>Gordeziani T. P., Elbakidze S. G.</i> Mapping of historical and religious monuments of the Karelian municipality (Georgia)	397 (398)
<i>Kochetova A. V., Ignatenko D. A., Sidorina I. E.</i> Use of high spatial resolution digital surface models to waterline delineation	410 (411)

<i>Sukmanova T. V., Belov N. S.</i> Application of digital twins in the study of historical landscapes of the coastal zone	425 (426)
--	------------------

REMOTE METHODS IN EARTH RESEARCH

<i>Kazaryan M. L., Shahramanian M. A., Tikunov V. S., Lin H.</i> The system of global space monitoring of the processes of littering of the planet Earth (a joint Russian-Chinese project)	442
--	-----

<i>Rylskiy I. A., Potapov M. A., Panin A. N., Gruzdev R. V.</i> Comparison of the quality of creation of a digital territory model of a forested territory from aerial photo data using Photomod and Metashape software complexes	462 (463)
--	------------------

<i>Asangaliyev E. A., Apshikur B., Lutay S. S., Assylkhanova Z. A.</i> Spatial analysis and mapping of potential wildfires from Landsat satellite data	476
---	-----

<i>Lavrusevich A. A., Aleshina T. S., Vadachkoria O. A., Lavrusevich I. A., Mashkova E. A., Shendyapina S. V., Gordienko A. N.</i> Remote sensing data analysis of geological environment components for the purposes of karst hazard assessment in the territory of the Mezmai–Lagonaki road construction site (Krasnodar region)	491 (492)
---	------------------

<i>Kazaryan M. L., Shahramanian M. A., Tikunov V. S., Tikunova I. N.</i> Application of discrete orthogonal transformations for identifying and displaying municipal solid waste in geoinformation systems on the Earth's surface	507
---	-----

<i>Kartsan I. N., Zhukov A. O., Skripachev V. O.</i> Model for calculating the speed of delivery of remotely sensed Earth observation information	534
---	-----

<i>Petrova O. A., Daumova G. K., Denissova N. F., Iskaliyeva G. M., Yelisseyeva A. V.</i> Geoinformation research for monitoring snow avalanches in the East Kazakhstan region of the Republic of Kazakhstan	545 (546)
--	------------------

<i>Skrypitsyna T. N., Vorotilov A. G., Kochneva D. A., Gavriluk F. D., Smirnov E. A.</i> Features of the survey and methods of modelling partially destroyed architectural objects based on photogrammetric data	556 (557)
--	------------------

<i>Kitov A. D., Plyusnin V. M.</i> Comparative dynamics of individual glaciers of the latitudinal transect (Kodar–Himalayas)	568
<hr/>	
<i>Melkiy V. A., Verkhoturov A. A.</i> Mapping of forest disturbance from winds of extratropical cyclones in the southern part of Sakhalin by remote sensing data	581
<hr/>	
<i>Poletaev A. O.</i> Features of spatio-temporal variability of photosynthetic activity of vegetation in valley-river landscapes	588 (589)
<hr/>	
<i>Zakharova E. V., Fomin V. V.</i> Assessment of the accuracy of the sea surface temperature of the Baltic sea	604 (605)
<hr/>	
<i>Rylskiy I. A., Paramonov D. A., Gribok M. V., Gruzdev R. V.</i> Methodology for planning a flight when carrying out air laser scanning in territories with mountainous relief	617 (618)
<hr/>	
<i>Kovalenko A. K., Teslenok S. A., Kalashnikova L. G., Bogdashkina O. F., Dmitriev P. S., Skurikhin A. A., Fomin I. A.</i> Application of the precise point positioning method for geodetic support of aerial photography during engineering surveys	632 (633)
<hr/>	
<i>Markova O. I., Gunya A. N., Purekhovskii A. G.</i> Assessment of change in vegetation cover of the territory of Greater Moscow over twenty years using satellite images	650 (651)
<hr/>	

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНОВ В УСЛОВИЯХ КРИЗИСА

Материалы Международной конференции
Усть-Каменогорск (Казахстан),
1–3 октября,
Грозный (Чеченская Республика),
7–9 октября 2024 г.

ТОМ 30

ЧАСТЬ 1

Оформление обложки *К. В. Саутенков*
Корректоры *О. И. Маркова, А. А. Котов, Н. А. Налюткина*
Компьютерная верстка *О. Г. Полевич*

Подписано в печать 20.11.2024.

Географический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова
119234, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, ауд. 2209, научно-исследовательская
лаборатория комплексного картографирования
тел.: +7(495)939-23-54
e-mail: intercarto@conf.msu.ru
сайт издания: <http://intercarto.msu.ru/>