ИнтерКарто. ИнтерГИС

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ

Материалы Международной конференции

Ташкент (Узбекистан), 1–2 июня,
Пятигорск (Россия), 24–26 сентября,
Тбилиси (Грузия), 28–29 сентября, 2020

Том 26

Часть 2

http://intercarto.msu.ru

Москва
Издательство Московского университета
2020

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

Организаторы конференции:

Международная картографическая ассоциация (МКА), Международная академия наук Евразии, Центр мировой системы данных по географии ICSU-WDS, МГУ имени М. В. Ломоносова, Северо-Кавказский федеральный университет, Севастопольский государственный университет, Тбилисский государственный университет, Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства, Секция океанологии, физики атмосферы и географии Отделения наук о Земле РАН

ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития
И 732 территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2020. Т. 26. Ч. 2. 464 с.

Сборник включает материалы, представленные на Международную конференцию ИнтерКарто. ИнтерГИС 26. В статьях рассматриваются теоретические и методические аспекты геоинформационного и картографического обеспечения экологических, экономических и социальных вопросов устойчивого развития, геоинформатики, картографии, создания атласов, дистанционного зондирования Земли. Также рассматриваются аспекты картографического и геоинформационного обеспечения решения вопросов общественного здоровья, сельского хозяйства и землепользования, туризма, природного и культурного наследия, исторической географии и географического образования. Освещено состояние географической и картографической науки в Грузии. Сборник выпускается 1 раз в год, начиная с 1994 г. В 2020 г. конференция «ИнтерКарто. ИнтерГИС» проведена совместно с конференцией «ГИС в Центральной Азии» (GISCA 2020) при поддержке проекта DSinGIS программы Европейского Союза “Erasmus+”.

Главный редактор: **В. С. Тикунов** (МГУ, советник рабочей группы «Картография для устойчивого развития» МКА)

Ответственные редактора: **М. В. Грибок** (МГУ), **О. Ю. Черешня** (МГУ)

Редакционная коллегия: **О. Е.Архипова** (Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону), **П. Я. Бакланов** (Тихоокеанский ин-т географии РАН, г. Владивосток), **А. Р. Батуев** (Ин-т географии СО РАН, г. Иркутск), **В. С. Белозеров** (Северо-Кавказский федеральный ун-т, г. Ставрополь), **С. Н. Бобылев** (МГУ), **Ц. Вэйхун** (Нац. исслед. центр инженерии и геоматики, Китай), **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. Кошкарев** (Институт географии РАН), **Х. Кремерс** (советник рабочей группы «Картография для устойчивого развития» МКА, Германия), **А. Курбан** (Синьцзянский ин-т экологии и географии, Китай), **Х. Линь** (Китайский ун-т Гонконга), **Д. В. Лисицкий** (Сибирский государственный ун-т геосистем и технологий, г. Новосибирск), **Д. М. Лопес Лопес** (Мексика), **И. К. Лурье** (МГУ), **Ф. Де Мейер** (Гентский ун-т, Бельгия), **М. В. Нырцов** (МГУ), **Г. Нямдава** (Министерство окружающей среды, зелёного развития и туризма, Монголия), **Ф. Ормелинг** (Ун-т Утрехта, Нидерланды), **Е. А. Паниди** (Санкт-Петербургский государственный ун-т), **А. Н. Панин** (МГУ), **А. В. Погорелов** (Кубанский государственный ун-т, г. Краснодар), **С. В. Пьянков** (Пермский государственный ун-т), **И. Н. Ротанова** (Алтайский государственный ун-т, г. Барнаул), **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), **Щитова Н. А.** (Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь)

При цитировании просим использовать точное наименование сборника.
Образцы цитирования:
Ivanov A. B., Petrov A. B. Title of the article. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2020. V. 26. Part 2. P. 110–120. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-110-120 (для цитирования на английском языке).
Иванов И. О., Петров И. О. Название статьи. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2020. Т. 26. Ч. 2. С. 110–120. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-110-120 (для цитирования на русском языке).

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

© Международная картографическая ассоциация, 2020
© Коллектив авторов, 2020

InterCarto. InterGIS

GI SUPPORT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF TERRITORIES

Proceedings of the International conference

Tashkent (Uzbekistan), June 1–2,
Pyatigorsk (Russia), September 24–26,
Tbilisi (Georgia), September 28–29, 2020

Volume 26

Part 2

http://intercarto.msu.ru

Moscow
Moscow University Press
2020

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

Organized by:

International Cartographic Association (ICA), International Eurasian Academy of Sciences, World Data Center for Geography ICSU-WDS, Moscow State University named after M. V. Lomonosov (MSU), North Caucasus Federal University, Sevastopol State University, Tbilisi State University, Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers, Section of Oceanology, Atmospheric Physics and Geography of the Division of Earth Sciences of RAS

InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2020. V. 26. Part 2. 464 p.

The Proceedings include papers presented at the "InterCarto. InterGIS 26" 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. The state of geographical and cartographic science in Georgia is highlighted. The Proceedings have been published once per year since 1994. In 2020, the conference "InterCarto. InterGIS" was held together with the conference "GIS in Central Asia" (GISCA 2020) supported by the DSinGIS project of "Erasmus+" Programme of the EU.

Editor-in-Chief: **V. Tikunov** (MSU, Advisor to the Working Group "Cartography for Sustainable Development" ICA)

Executive Editors: **O. Chereshnya** (MSU), **M. Gribok** (MSU)

Editorial Board: **O. Arkhipova** (Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences (RAS), Rostov-on-Don), **P. Baklanov** (Pacific Institute of Geography RAS, Vladivostok), **A. Batuev** (Institute of Geography SB RAS, Irkutsk), **V. Belozerov** (North-Caucasus Federal University, Stavropol), **S. Bobylev** (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 RAS, Moscow), **H. Kremers** (Advisor of ICA Working Group Cartography for Sustainability, 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), **D. M. Lopez Lopez** (Mexico), **I. Lourie** (MSU), **Ph. De Maeyer** (Ghent University, Belgium), **G. Nyamdavaa** (Ministry of Environment, Green Development and Tourism, Mongolia), **M. Nyrtsov** (MSU), **F. Ormeling** (Utrecht University, Netherlands), **E. Panidi** (St. Peterburg State University), **A. Panin** (MSU), **A. Pogorelov** (Kuban State University, Krasnodar), **S. Pyankov** (Perm State University), **I. Rotanova** (Altai State University, Barnaul), **N. Shchitova** (North Caucasus Federal University, Stavropol), **N. Ulugtekin** (Istanbul Technical University, Turkey), **C. Weihong** (National Engineering Research Center for Geomatics of China)

Please use the exact name of the Proceedings for citations.
Citation example:
Ivanov A. B., Petrov A. B. Title of the article. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2020. V. 26. Part 2. P. 110–120. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-110-120.

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

© International Cartographic Association, 2020
© Authors, 2020

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

УДК: 528.94/556.5 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-5-19**

С.В. Пьянков[1], Р.К. Абдуллин[1], А.Н. Шихов[1], А.В. Семакина[1]

КАРТОГРАФИЧЕСКИЙ ВЕБ-СЕРВИС МОНИТОРИНГА СНЕЖНОГО ПОКРОВА И ОПАСНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В БАССЕЙНЕ Р. КАМЫ: ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ И ИНФОРМАЦИОННОГО НАПОЛНЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

Одним из направлений совершенствования мониторинга и прогнозирования опасных гидрологических явлений (ОГЯ) является разработка веб-ГИС для оперативной визуализации и анализа гидрологической обстановки. В настоящей работе рассматривается структура и информационное наполнение картографического веб-сервиса мониторинга снежного покрова и ОГЯ в бассейне р. Камы (http://hydromonitor.maps.psu.ru/). Пользователями сервиса могут быть региональные управления гидрометслужбы, Камское бассейновое водное управление и другие организации, заинтересованные в оперативном получении гидрологической информации. В структуре картографического сервиса выделяются базовые и тематические слои. Тематические слои включают данные мониторинга и моделирования (обновляющиеся в ежесуточном режиме) и прочие данные, не требующие регулярного обновления. Информационной основой сервиса являются картографические слои бассейнов рек и наблюдательной сети Росгидромета (метеостанций и гидропостов). На основе анализа научной литературы, данных наблюдений гидропостов, сведений, опубликованных в СМИ и спутниковых снимков, созданы картографические слои паводкоопасных населённых

[1] Пермский государственный национальный исследовательский университет, Кафедра картографии и геоинформатики, ул. Букирева, д. 15, 614990, Пермь, Россия; *e-mail:* **gis@psu.ru**

пунктов, мест образования заторов льда на реках, случаев ОГЯ и зон затопления в поймах рек. База данных ОГЯ включает 97 записей (75 случаев), которые наблюдались в 63 населённых пунктах. Большинство случаев ОГЯ со значительным ущербом наблюдалось в бассейне р. Белой. Наибольшие площади затопляемых пойменных земель расположены в этом же бассейне. На картографическом сервисе также публикуются расчётные характеристики снежного покрова: запас воды в снеге, водоотдача и площадь снегового покрытия. Входными данными для расчётов являются суточные прогнозы температуры и влажности воздуха, скорости ветра и количества осадков по моделям атмосферы ICON (Германия) и GFS (США), а также данные метеостанций. Периодичность обновления данных составляет один раз в сутки, пространственное разрешение — 3 км.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: опасные гидрологические явления, весеннее половодье, дождевые паводки, картографическая база данных, картографический веб-сервис

Sergey V. Pyankov[1], **Rinat K. Abdullin**[1], **Andrey N. Shikhov**[1], **Anastasia V. Semakina**[1]

ONLINE WEB MAP SERVICE FOR MONITORING OF SNOW COVER AND HAZARDOUS HYDROLOGICAL EVENTS IN THE KAMA RIVER BASIN: THE FEATURES OF DEVELOPMENT AND CONTENT

ABSTRACT

The development of web-GIS for operational visualization and analysis of the hydrological threats is one of the main ways to improve the monitoring and forecasting of hazardous hydrological events (HHE). This paper considers the structure and content of the online web map service for monitoring snow cover and HHE in the Kama river basin (http://hydromonitor.maps.psu.ru/). The regional departments of the Russian hydro-meteorological service, Kama Basin Water Administration and other institutions interested in operational obtaining of the hydrological information can successfully use the developed web map service. Basic and thematic layers are distinguished in the structure of the web map service. Thematic layers include daily updated monitoring and modelling outputs and other data (that does not require regular updating). The layers of river basins and observational network (weather stations and gauging stations) of the Russian hydrometeorological service are the information basis of the service. The GIS layers of flooded settlements, locations of ice jams formation on the rivers, HHE and flood zones in floodplains have been created on the basis of the analysis of scientific publications, hydrological gauges, flood damage reports in media and satellite images. The database of HHE includes 97 records (75 HHE), which happened in 63 settlements. Most of HHE causing significant damage were occurred in the Belaya river basin, and the largest areas of flooded floodplain are also located in the same basin. Also, the simulated characteristics of snow cover (snow water equivalent, meltwater outflow and snow-covered area) are published on the web map service. The input data for calculations are daily forecasts of the air temperature, humidity, wind speed and precipitation by numerical weather prediction models ICON (Germany) and GFS (USA), as well as weather station data. The data are updated daily, and their spatial resolution is 3 km.

KEYWORDS: hazardous hydrological events, spring flood, rain flood, GIS database, online web map service

[1] Perm State University, Department of Cartography and Geoinformatics, Bukirev str., 15, 614990, Perm, Russia; *e-mail:* **gis@psu.ru**

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг опасных гидрологических явлений (ОГЯ) и предоставление пользователям актуальной информации об их развитии является важной задачей для многих регионов России. Одним из важных элементов комплексного мониторинга ОГЯ является разработка систем прогнозирования наводнений, основанных на веб-ГИС технологиях. В России такие системы были разработаны НИЦ Космической гидрометеорологии «Планета» и Гидрометцентром РФ для бассейнов рек Амура [*Frolov et al.*, 2016] и Кубани [*Борщ и др.*, 2015]. Для этих бассейнов характерны быстроразвивающиеся наводнения, связанные с дождевыми (ливневыми) паводками, которые наносят наибольший ущерб.

В большинстве речных бассейнов России основные риски наводнений связаны не с дождевыми паводками, а с прохождением снегового половодья [*Frolova et al.*, 2017]. Опыт создания систем мониторинга наводнений для рек, на которых основные риски связаны с весенним половодьем, остаётся весьма ограниченным. Первая подобная система разработана только в 2019 г. для бассейна р. Волги [*Дерюгина и др.*, 2019]. Также важно отметить, что все вышеперечисленные системы мониторинга наводнений недоступны для обычных пользователей, а ориентированы в основном на региональные УГМС.

Существенной проблемой является дефицит и отсутствие в открытом доступе некоторых данных, необходимых для краткосрочного гидрологического прогноза в период половодья (в частности, данных снегомерных съёмок). Особенно это актуально для районов со сложным рельефом, где пункты снегомерных наблюдений расположены преимущественно в долинах рек и нерепрезентативны для прилегающей территории. В настоящее время известен только один открытый сервис, предоставляющий данные о пространственном распределении снегозапасов[1]. Однако для создания карт снегозапасов здесь применяется простая интерполяция данных снегомерных съёмок с ограниченного числа станций, что ведёт к большим ошибкам для районов с пересечённым рельефом.

Все обозначенные проблемы с доступностью данных о характеристиках снежного покрова актуальны и для бассейна р. Камы. В последние годы авторами настоящей работы проводились эксперименты по моделированию формирования и таяния снежного покрова на основе входных данных численных моделей атмосферы для бассейна Воткинского водохранилища, расположенного в северо-восточной части водосбора р. Камы [*Pyankov et al.*, 2018]. Было подтверждено, что снегозапасы, рассчитанные на основе данных об осадках, полученных по моделям прогноза погоды, как правило, отличаются от данных снегосъёмок менее чем на 25 %. При этом были получены реалистичные оценки как средних снегозапасов по бассейнам рек, так и их пространственного распределения, что и необходимо для последующего прогноза талого стока. Было показано, что правдоподобные результаты расчёта снегозапасов могут быть получены не только с применением данных мезомасштабной модели прогноза погоды WRF (с пространственным разрешением 10 км и менее), но и по данным глобальных моделей атмосферы (в частности, канадской модели GEM и немецкой модели ICON), данные которых находятся в открытом доступе.

В 2018–2019 гг. был разработан онлайн-картографический сервис для мониторинга характеристик снежного покрова и ОГЯ в бассейне р. Камы. Целью его создания является отображение в оперативном режиме характеристик снежного покрова в бассейне р. Камы и информационная поддержка мониторинга и прогноза ОГЯ в интересах региональных УГМС и других заинтересованных пользователей. Картографический сервис доступен в сети Интернет по ссылке[2]. В настоящей статье рассматривается структура сервиса, особенности его создания и информационного наполнения, а также некоторые особенности

---

[1] Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. Электронный ресурс: http://gis.vodinfo.ru/ (дата обращения 30.11.2019)

[2] Мониторинг весеннего половодья в бассейне Камы. Электронный ресурс: http://hydromonitor.maps.psu.ru/ (дата обращения 30.11.2019)

пространственно-временного распределения ОГЯ в бассейне р. Камы. Методы моделирования, реализованные для оперативного картографирования характеристик снежного покрова с публикацией выходных данных на веб-сервисе, рассматриваются в других работах [*Пьянков и др.*, 2019; *Pyankov et al.*, 2019].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аппаратная и программная реализация картографического сервиса

Для организации хранения данных и управления ими создана многопользовательская база данных под управлением СУБД PostgreSQL. Для публикации пространственных данных в сети Интернет, а также организации доступа к ним пользователей применяется установленный на веб-сервер ГИС-сервер ArcGIS Server 10.x, публикация данных выполняется из настольного программного обеспечения ArcGIS Desktop 10.x. Доступ пользователей картографического сервиса через сеть Интернет организован при помощи клиентского веб-приложения, реализованного на базе технологий HTML5, CSS3 и JavaScript.

Функциональные возможности сервиса включают стандартные инструменты, просмотр атрибутивных данных с помощью идентификации по картографическим слоям, поиск по атрибутивным таблицам, анимированное отображение характеристик снежного покрова (пространственное распределение снегозапасов, водоотдачи по различным исходным данным). Более подробно функциональные возможности сервиса описаны в Руководстве пользователя[1].

Структура и информационное наполнение картографического сервиса

В структуре картографического сервиса традиционно выделяются базовые и тематические слои. В свою очередь, тематические данные подразделяются на данные мониторинга (обновляющиеся в ежесуточном режиме) и прочие данные, не требующие регулярного обновления с высокой частотой. Общая характеристика информационного наполнения сервиса представлена в табл. 1, более подробное описание приведено ниже.

Табл. 1. Информационное наполнение картографического веб-сервиса
Table 1. Content of the online web map service

Базовые слои	**Тематические слои**		
	Наблюдательная сеть и бассейны	**Опасные гидрологические явления**	**Оперативно обновляемые (мониторинг)**
Топографическая основа; Рельеф; Растительность	Метеостанции; Гидропосты; Бассейны рек (до гидропостов)	Населённые пункты в зоне риска затопления; Затороопасные участки на реках; Случаи ОГЯ и ЧС; Зоны затопления по спутниковым данным	Запас воды в снежном покрове, рассчитанный на основе данных об осадках, полученных по метеостанциям и по моделям прогноза погоды ICON, GFS; Расчётная водоотдача снега и площадь снегового покрытия; Средний снегозапас и водоотдача по бассейнам рек; Площадь снегового покрытия по данным MODIS

[1] Руководство пользователя картографического сервиса «Мониторинг весеннего половодья в бассейне Камы». Электронный ресурс: http://hydromonitor.maps.psu.ru/help/help.html (дата обращения 30.11.2019)

Базовые картографические слои

В качестве картографической основы используются WMS-сервисы OpenStreetMap, карта Росреестра, ArcGIS.World Topo Map (топографические слои), ArcGis Imagery (мозаика космических снимков).

Основной цифровой моделью рельефа является GMTED-2010 с пространственным разрешением 250 м [*Danielson, Gesch*, 2011], поскольку она покрывает всю территорию бассейна Камы и имеет существенно меньше артефактов, чем ASTER GDEM.

Также на сервисе опубликована карта растительности с пространственным разрешением 350 м, которая описана в работе [*Пьянков и др*., 2019] и использовалась для моделирования формирования и таяния снежного покрова в бассейне р. Камы.

Тематические слои

Наблюдательная сеть Росгидромета представлена слоями метеостанций и гидрологических постов. Данные о координатах метеостанций получены с сервиса[1], а также по сведениям региональных УГМС. Всего слой включает 103 метеостанции, из них 71 находится в пределах бассейна Камы, а остальные — вблизи его границ. Картографический слой гидропостов создан на основе базы данных, опубликованной на электронном ресурсе АИС ГМВО[2]. Всего он включает 161 действующий гидропост. Для каждого гидропоста приведены следующие атрибутивные данные: идентификатор, название, координаты, принадлежность к УГМС, площадь бассейна, максимальный зафиксированный уровень воды и дата его наблюдения, критическая отметка уровня воды (опасный уровень).

Границы частных бассейнов выделены по ЦМР GMTED-2010. Для 159 бассейнов замыкающими створами являются гидропосты. Также выделены бассейны крупных водохранилищ (на рр. Каме, Косьве, Уфе). Для каждого бассейна приведены значения площади, средняя высота и уклон, лесистость в %.

Данные об опасных гидрологических явлениях и зонах затопления представлены несколькими картографическими слоями, которые созданы по материалам многолетних наблюдений, сведениям региональных управлений МЧС, сведениям из средств массовой информации, а также на основе космических снимков

Слой паводкоопасных территорий (населённых пунктов, расположенных в зонах затопления) подготовлен по материалам монографии [*Разумов и др.,* 2018], в основу которой легли сведения региональных управлений МЧС и другие данные из открытых источников. В настоящее время выделено 130 населённых пунктов, производится актуализация информации по данным региональных УГМС. Для каждого населённого пункта приведена доля затапливаемой площади при половодье 1 % и 10 % обеспеченности.

Слой затороопасных участков на реках также подготовлен по материалам монографии [*Разумов и др.,* 2018], в которой выделено 48 таких участков в бассейне Камы. По каждому затороопасному участку приведены следующие атрибутивные данные: название, протяжённость участка (км), средняя и максимальная толщина льда (см), средний и максимальный подъём уровня воды при заторах (зажорах), даты возникновения заторов (зажоров) и их повторяемость.

База данных о случаях ОГЯ в бассейне р. Камы

В связи с редкостью наблюдательной сети и отсутствием в открытом доступе многолетних данных наблюдений за уровнями воды за период до 2002 г., для создания базы данных об ОГЯ были проанализированы все доступные информационные ресурсы. Основное внимание было уделено сведениям об ущербе от ОГЯ, опубликованным в СМИ. Отбор случаев ОГЯ производился по следующим критериям: достижение критерия ОГЯ (опасного

---

[1] Расписание погоды. Электронный ресурс: https://rp5.ru (дата обращения 30.11.2019)

[2] Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). Электронный ресурс: https://gmvo.skniivh.ru (дата обращения 30.11.2019)

уровня воды) по данным ближайшего гидропоста, значительный масштаб ущерба или факт введения режима чрезвычайной ситуации на пострадавшей территории.

Табл. 2. Структура атрибутивной таблицы случаев ОГЯ в бассейне р. Камы
Table 2. The structure of the attribute table of hazardous hydrological events in the Kama river basin

Имя поля	Тип (длина) поля	Описание
Settlement_ID	Short integer	Идентификатор населённого пункта, в котором наблюдалось ОГЯ
Settlement_name	Text, 30	Населённый пункт, в котором наблюдалось ОГЯ
Flood_type	Text, 25	Тип наводнения
Cause	Text, 255	Описание гидрометеорологических условий возникновения ОГЯ
Dead_and_missed	Short integer	Число погибших и пропавших без вести
Number_of_people_evacuated	Short integer	Число эвакуированных людей в зоне ЧС
Number_of_flooded_houses	Short integer	Число затопленных домов
Damage_description	Text, 255	Описание ущерба, вызванного ОГЯ
Emergency_date	Text, 255	Даты ЧС (начало и конец)
Emergency_ID	Short integer	Идентификатор ЧС
URL	Text, 100	URL-адрес описания ЧС
Video_file	Text, 50	Ссылка на видеофайл
Year	Short integer	Год возникновения ОГЯ
Month	Short integer	Месяц возникновения ОГЯ*
Related_hydropost	Short integer	Название ближайшего гидропоста
Max_level	Short integer	Максимальный зафиксированный уровень воды в относительных отметках (см)
Max_level_date	Date	Дата максимального уровня
Water_level_file	Text, 25	Ссылка на графический файл с изображением динамики уровня воды на гидропосту

*В случае, если ОГЯ продолжалось в течение двух месяцев, указывается первый месяц

В рамках настоящей работы создана база данных об ОГЯ в бассейне р. Камы за период с 1990 г. по н.в. Ограничение периода для анализа связано с проблемой доступности данных. Так, в базе данных об опасных гидрометеорологических явлениях, нанесших

социально-экономический ущерб[1], приведена информация за период с 1991 г. В монографии [*Разумов и др.*, 2018] рассматриваются случаи наводнений за 1990–2005 гг. Электронные архивы новостных СМИ также имеются в открытом доступе с 1990-х гг. Получение данных о случаях ОГЯ за период до 1990 г. более проблематично.

Структура атрибутивного описания случаев ОГЯ приведена в табл. 2. На рис. 1 приведён пример отображения данных на картографическом сервисе. Особенности пространственно-временного распределения случаев ОГЯ в бассейне Камы за период с 1990 по 2019 гг. рассмотрены в разделе «Результаты».

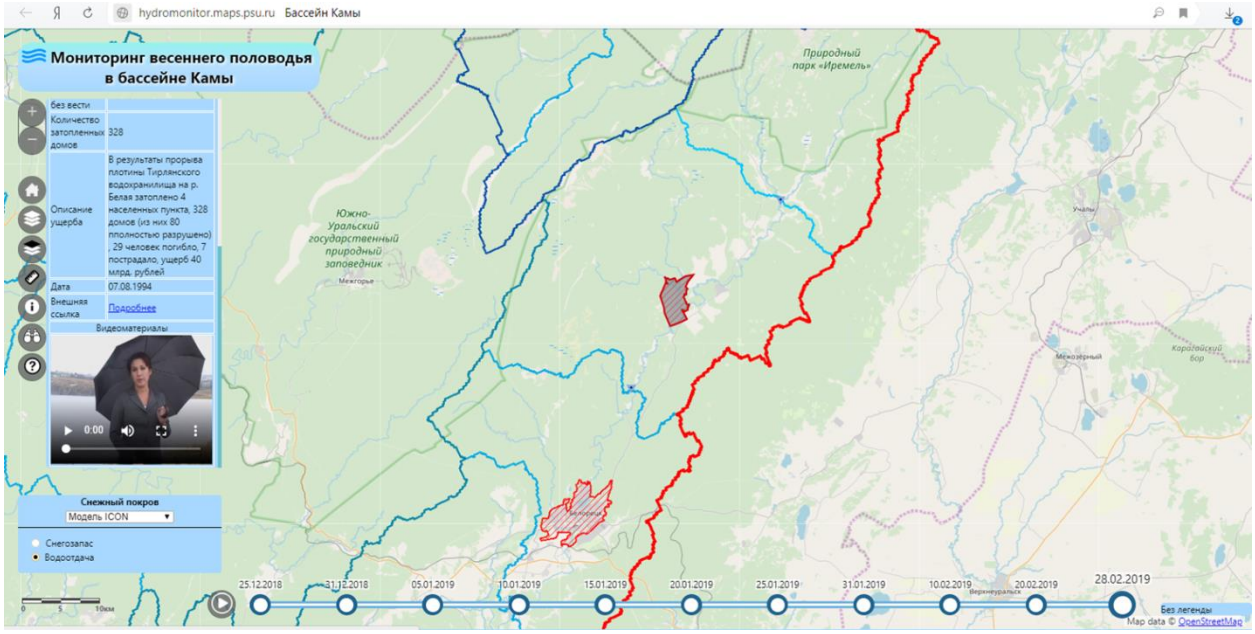


Рис. 1. Отображение данных о случае ОГЯ на картографическом веб-сервисе
Fig. 1. The data on hazardous hydrological events on the online web map service

<u>Картографический слой зон затопления в поймах крупных рек</u>

Для создания слоя зон затопления в поймах крупных рек в бассейне Камы использован архив спутниковых данных Landsat за 1984–2019 гг., полученный с сервиса Геологической службы США[2]. На сегодняшний день архив данных Landsat практически не имеет альтернативы для картографирования зон сезонного затопления — например, [*Qi et al.*, 2009; *Olthof*, 2017]. В то же время существенными ограничениями данных Landsat являются зависимость от облачности и сравнительно низкая повторяемость съёмки, что в совокупности не позволяет зафиксировать максимальные площади затопления.

Для выделения зон затопления были получены снимки с облачностью менее 20 %, соответствующие датам прохождения пиков весеннего половодья (с середины апреля до начала июня), а также за период летней межени (с конца июля до середины сентября). Методика картографирования зон затопления по снимкам Landsat достаточно хорошо разработана [*Преснякова и др.*, 2017]. В настоящей работе выделение водной поверхности на снимках производилось по двум пороговым критериям: отрицательным значениям нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI и пороговому значению

[1] Единая государственная система информации об обстановке в Мировом Океане (ЕСИМО). Стихийные бедствия. Электронный ресурс: http://data.oceaninfo.ru/applications/disaster/index.jsp?&sortBy=region (дата обращения 30.11.2019)
[2] USGS Earth Explorer. Электронный ресурс: https://earthexplorer.usgs.gov/ (дата обращения 30.11.2019)

коэффициента спектральной яркости в среднем ИК-канале. Расчёт производился в пределах буферных зон, которые соответствовали максимальной ширине зоны затопления для каждой реки. Для выделения зон сезонного затопления из площади водной поверхности, выделенной по весеннему снимку, вычиталась площадь водной поверхности в период межени. Затем производилась корректировка созданного векторного слоя в ручном режиме. Она включала, в частности, удаление участков разлива некоторых пойменных озёр, не имеющих соединения с основным руслом даже в период пика половодья. В случае, если значительное затопление в пойме одной и той же реки фиксировалось по снимкам Landsat неоднократно в разные годы, рассчитывались зоны затопления за каждый год и затем определялась максимальная по площади.

Таким образом, были созданы картографические слои зон максимального затопления в поймах 27 крупных рек бассейна Камы. Не рассматривались крупные реки, в поймах которых возможно значительное затопление, но отсутствуют населённые пункты.

Атрибутивная таблица созданного картографического слоя включает сведения об использованном снимке (дата съёмки, строка и столбец в системе WRS2), название реки, площадь затопления в пойме данной реки, название ближайшего гидропоста и уровень воды на гидропосту в день съёмки. В настоящее время недоступность данных об уровнях воды за 1990-е гг. не позволяет заполнить последние два поля полностью. Кроме того, на некоторых реках гидропосты вовсе отсутствуют. Пример отображения полученного слоя на картографическом веб-сервисе приведён на рис. 2.

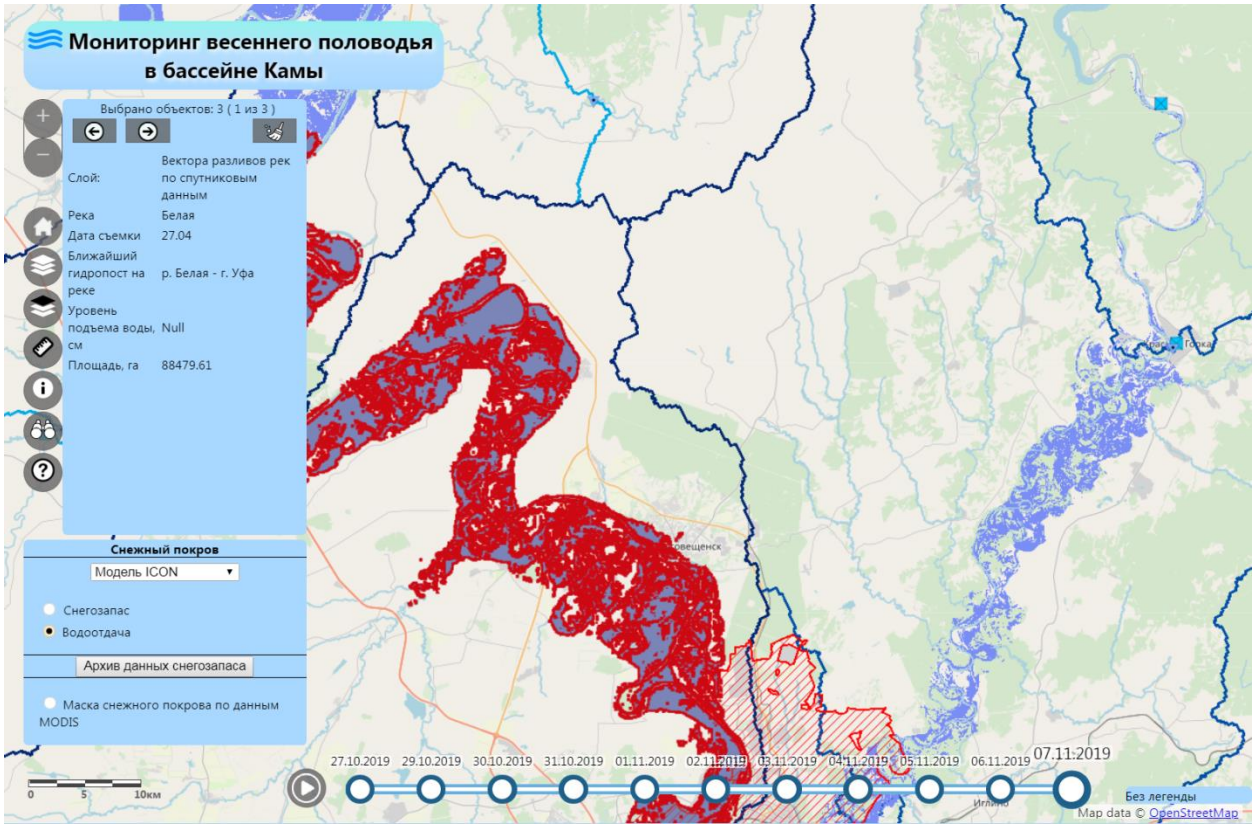


Рис. 2. Отображение зон затопления в поймах рек Белая и Уфа (выделенных по снимкам Landsat) на картографическом веб-сервисе
Fig. 2. The flooded areas in the floodplains of Belaya and Ufa rivers (delineated by Landsat images), displayed on the online web map service

Оперативно обновляемые данные

На картографическом сервисе публикуются результаты расчёта пространственного распределения снегозапасов на основе данных глобальных моделей прогноза погоды ICON (Германия) и GFS (США). Более подробные сведения об этих моделях приведены в работе [*Толстых*, 2016]. Выходные данные моделей прогноза погоды (прогноз на срок 27 ч) загружаются в режиме реального времени с серверов национальных метеослужб. Для загрузки данных (температура и влажность воздуха, количество осадков и скорость ветра) в коде GRIB2 и их конвертации в формат Geotiff разработаны скрипты на языке Python. Загрузка данных и их конвертация в режиме реального времени выполняется с помощью вычислительных мощностей, предоставляемых сервисом Yandex Compute Cloud.

Выходные данные моделей имеют пространственное разрешение от 13 до 25 км, однако моделирование снегонакопления производится с шагом сетки 3 км, т.к. при расчётах проводится коррекция на рельеф. Методика расчёта снегонакопления и снеготаяния в основных чертах описана в работах [*Pyankov et al.*, 2018; 2019]. Также моделирование снегонакопления производится на основе фактических данных о количестве выпавших осадков по данным с 94 метеостанций.

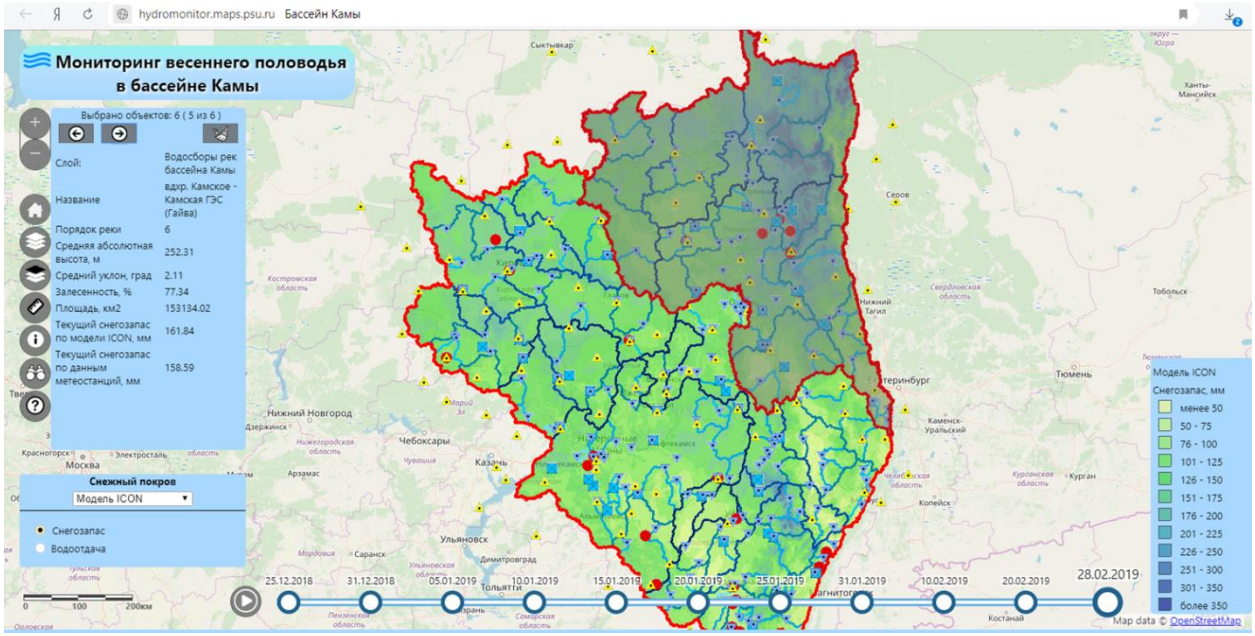


Рис. 3. Отображение данных о пространственном распределении снегозапасов (расчёт по данным модели ICON) на картографическом сервисе
Fig. 3. The spatial distribution of snow water equivalent (calculated based on ICON model data) displayed on the online web map service

Помимо снегозапаса, в период снеготаяния рассчитываются площадь снегового покрытия и поступление воды на водосборы рек. Результаты расчётов снегозапаса и водоотдачи представлены как в растровом формате, так и в виде средних значений по бассейну (рис. 3). Обновление данных на сервисе в период снегонакопления производится с частотой один раз в 10 суток, а в период снеготаяния — ежесуточно. Верификация результатов расчётов снегонакопления выполняется на основе данных маршрутных снегомерных съёмок (более 50 снегомерных маршрутов по всей площади бассейна). Методика верификации и некоторые результаты описана в статье [*Pyankov et al.*, 2019]. В холодный период 2018–2019 гг. наиболее правдоподобное распределение снегозапасов было получено на основе

данных модели ICON. При этом в северной части водосбора существенных систематических ошибок не было, в южной части наблюдалось занижение снегозапаса, в сравнении с данными снегомерных съёмок, наиболее значительное в степной части бассейна р. Белой.

Помимо характеристик снежного покрова, полученных по результатам моделирования, в период снеготаяния на сервисе публикуются также данные о площади снегового покрытия (маски снежного покрова), полученные по снимкам Terra/Aqua MODIS. Площади, покрытые снегом, выделяются по пороговым значениям нормализованного разностного индекса снега для лесопокрытых территорий (Normalized Difference Forest Snow Index, NDFSI), который наиболее эффективен для лесопокрытых территорий [*Wang et al.*, 2018]. В весенний период 2019 г. было подготовлено 15 масок снежного покрова, в остальные дни более 50 % площади бассейна находилось под облачностью. Спутниковые данные используются не только для оценки фактической площади снегового покрытия, но и для верификации результатов моделирования. Пример отображения на сервисе маски снежного покрова за 17.04.2019 г. приведён на рис. 4.

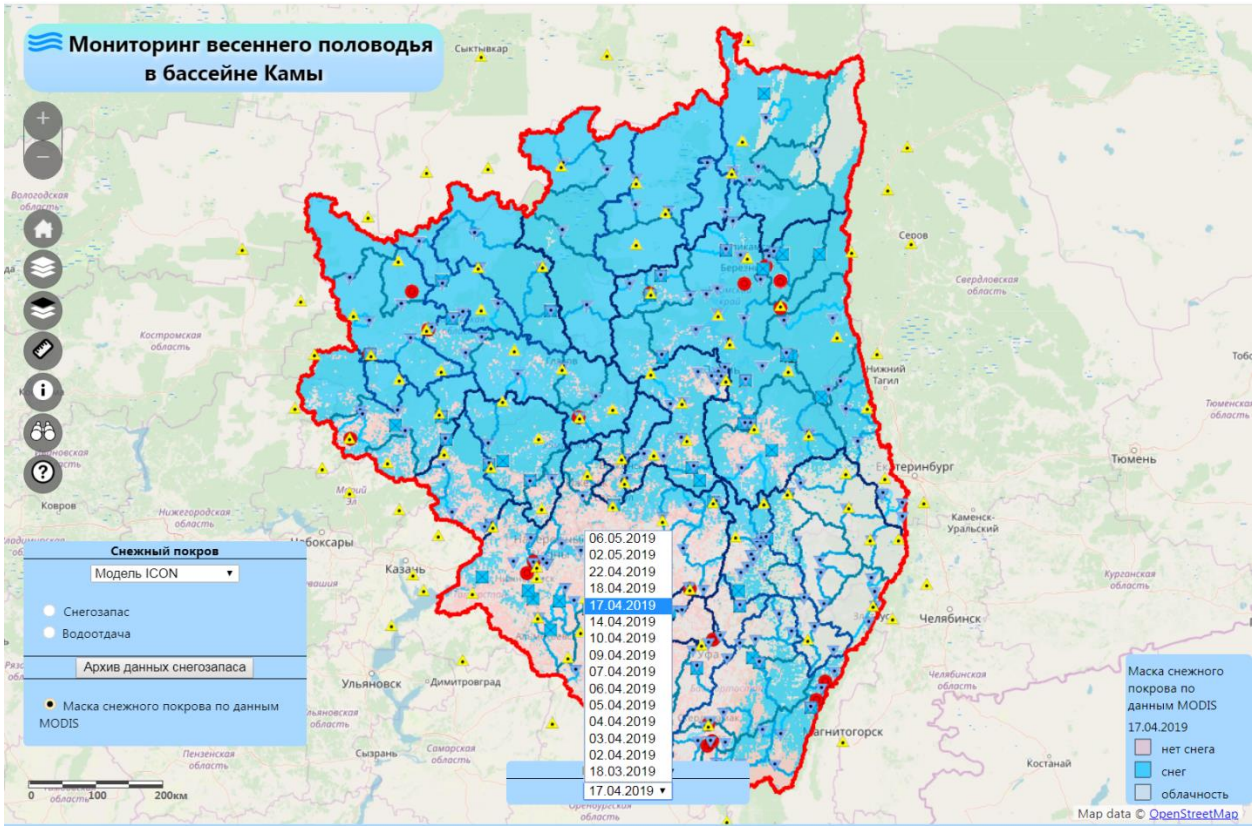


Рис. 4. Отображение площади снегового покрытия в бассейне р. Камы по спутниковым данным MODIS/Terra на картографическом веб-сервисе
Fig. 4. The snow-covered area in the Kama river basin according to MODIS/Terra images displayed on the online web map service

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственно-временное распределение случаев ОГЯ в бассейне р. Камы

Основные характеристики случаев ОГЯ в бассейне Камы, оцененные по созданной базе данных, приведены на рис. 5, их пространственное распределение показано на рис. 6. Созданная база данных ОГЯ содержит 97 записей, которые относятся к 75 случаям ОГЯ. Расхождение связано с тем, что каждая запись привязана к определённому населённому

пункту, в то время как некоторые ОГЯ нанесли существенный ущерб в нескольких населённых пунктах. Случаи ОГЯ зафиксированы в 63 различных насёленных пунктах (рис. 6). Наиболее паводкоопасными из них можно считать гг. Уфу и Стерлитамак (8 и 5 случаев ОГЯ соответственно). Наибольшее количество объектов, попадающих в зону затопления, также расположено в г. Уфе (свыше 3 500 жилых домов). В целом по бассейну Камы большинство случаев ОГЯ со значительным ущербом было зафиксировано в бассейне р. Белой. Все случаи гибели людей при наводнениях за последние 30 лет также отмечены в бассейне р. Белой.

Большинство случаев ОГЯ в бассейне Камы были вызваны весенним половодьем, однако вклад дождевых и снегодождевых паводков также значителен (рис. 5 а). В 5 случаях зафиксированы факты гибели людей от наводнений, из которых 4 случая связаны с дождевыми паводками. Наибольшее число жертв (по разным данным от 26 до 29 чел.) зафиксировано при прорыве плотины в пос. Тирлянском 07.08.1994 г., который был вызван редким по интенсивности дождевым паводком в верхнем течении р. Белой.

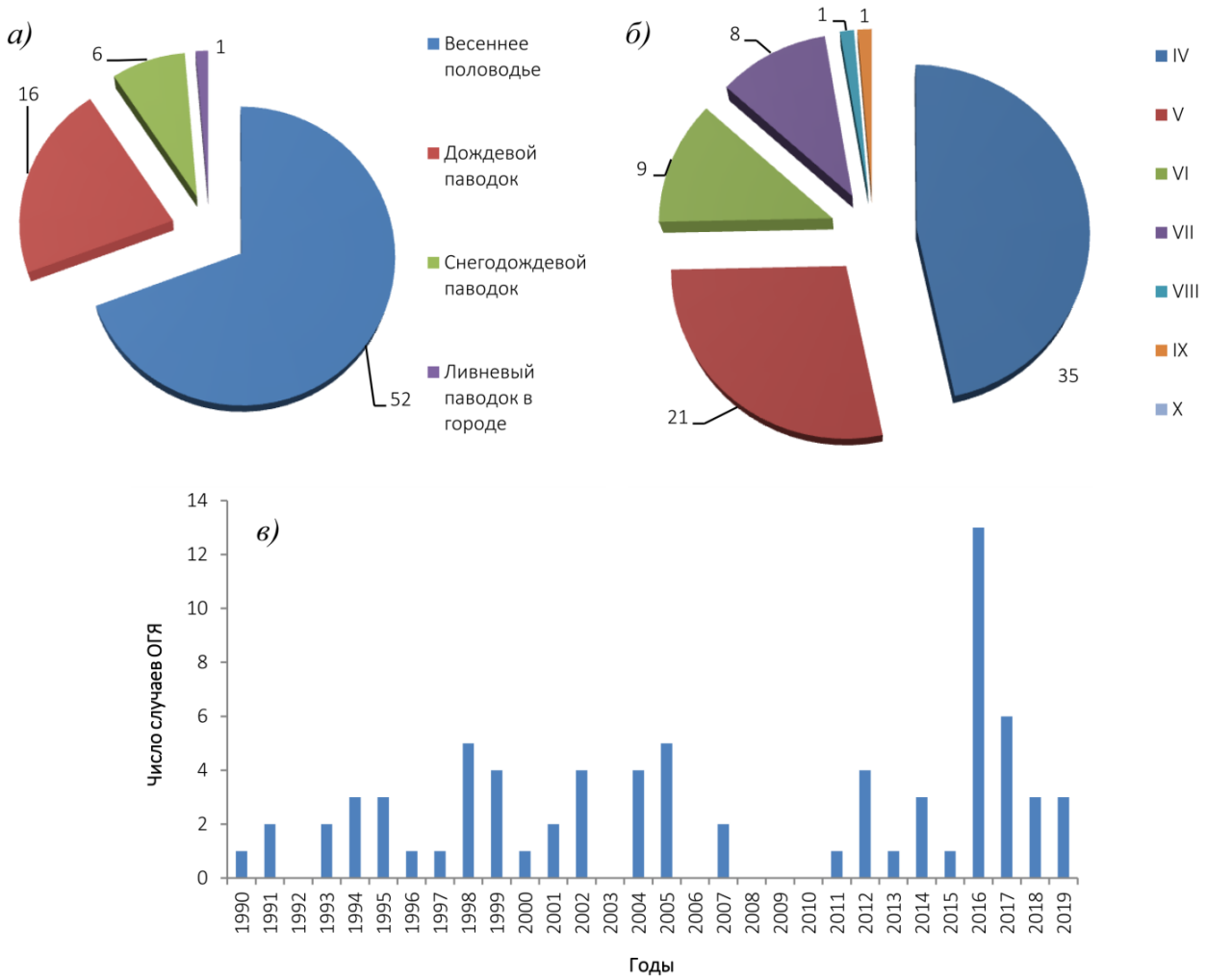


Рис. 5. Распределение числа случаев ОГЯ по причинам возникновения (а), внутригодовое (б) и межгодовое (в) распределение
Fig. 5. Distribution of the number of hazardous hydrological events by genesis types (a), monthly (b) and inter-annual (v) distribution

Поскольку большинство случаев ОГЯ вызваны весенним половодьем, наибольшее число их отмечалось в апреле и мае (рис 5 б). В межгодовом распределении максимум приходится на 2016 г., когда высокое половодье наблюдалось во всей северной половине бассейна р. Камы.

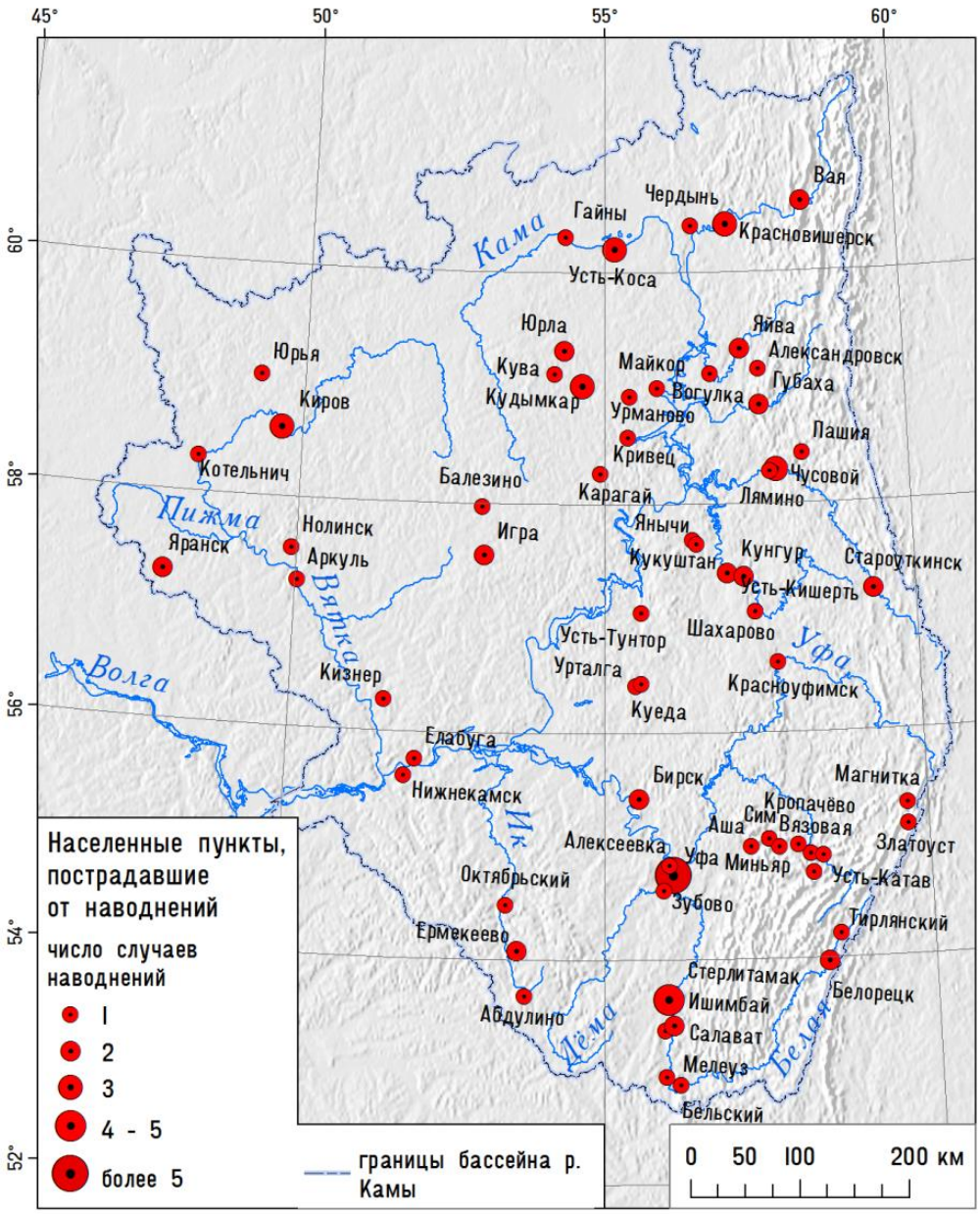


Рис. 6. Населённые пункты в бассейне Камы, в которых наблюдались ОГЯ
Fig. 6. Settlements in the Kama river basin, where hazardous hydrological events were observed

<u>Характеристика зон затопления в поймах крупных рек бассейна Камы, выделенных по снимкам Landsat</u>

Максимальные площади сезонного затопления выявлены в поймах рр. Белой (1730 км^2 по снимкам за 27.04. и 04.05.1991), Чепцы (497 км^2 по снимку за 23.04.1991) и Вятки (1068 км^2 по снимкам за 25–27.04.2016). Эти данные согласуются с экстремальными характеристиками весенних половодий 1991 и 2016 гг. Половодье 1991 г. в южной части бассейна

Камы было одним из самых высоких за последние 40 лет [*Разумов и др*., 2018]. Половодье 2016 г. в бассейне Вятки было самым высоким с 1998 г.

Также значительные площади затопления фиксировались по спутниковым данным Landsat весной 1985 г. (рр. Сылва, Чепца), 1987 г. (рр. Сылва, Чусовая), 1998 г. (все реки центральной и южной части Пермского края), 2001 г. (центральная, южная часть Пермского края, Удмуртия и Башкортостан). В последние полтора десятилетия в целом по бассейну Камы наблюдалась тенденция к снижению повторяемости высоких половодий; исключением стало аномально высокое половодье 2016 г.

Полученные оценки площади зон затопления по спутниковым снимкам пока являются недостаточно репрезентативными. Редкая повторяемость высоких половодий, а также наличие облачности в момент съёмки не позволяет зафиксировать по спутниковым данным максимальные площади разливов для многих рек. Так, для бассейнов рек центральной и южной части Пермского края, в которых самыми высокими за период действия съёмочной системы Landsat были половодья 1987, 1998 и 2016 гг., не удалось получить ни одного малооблачного снимка за соответствующие периоды.

ВЫВОДЫ

Разработанный картографический сервис является одним из первых в России открытых информационных ресурсов, предоставляющих данные об опасных гидрологических явлениях и характеристиках снежного покрова в бассейнах рек. Его пользователями могут быть региональные УГМС, а также Камское бассейновое водное управление и другие организации, заинтересованные в оперативном получении гидрологической информации.

Дальнейшее развитие сервиса предполагается в нескольких направлениях:

- реализация прогноза расходов и уровней воды по выбранным гидропостам, расположенным в зонах максимального риска возникновения ОГЯ. Для этого планируется использовать концептуальную модель формирования стока HBV;
- разработка новых инструментов картографической визуализации данных;
- дополнение созданной базы данных о случаях ОГЯ в бассейне р. Камы. Предполагается модификация структуры базы данных в соответствии с рекомендациями, предложенными в работе [*Napolitano et al.,* 2018], что позволит структурировать информацию оптимальным образом и более детально отобразить условия возникновения каждого случая ОГЯ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 17-05-01001-а.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, grant No 17-05-01001-a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Система прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани. Труды Гидрометцентра РФ. Спец. вып. 356, 2015. 247 с.

2. *Дерюгина В.В., Борщ С.В., Кровотынцев В.А., Симонов Ю.А.* Веб-ГИС системы мониторинга и прогнозирования гидрологической обстановки в бассейнах крупных рек России с использованием наземных и спутниковых данных. Тезисы докладов XVII Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса». М.: ИКИ РАН, 2019. С. 84.

3. *Преснякова А.Н., Писарев А.В., Храпов С.С.* Исследование динамики затопления территории Волго-Ахтубинской поймы по данным космического мониторинга. Вестник

Волгоградского государственного университета. Серия 1. Математика. Физика, 2017. № 1 (38). С. 66–74.
4. *Пьянков С.В., Шихов А.Н., Михайлюкова П.Г.* Моделирование снегонакопления и снеготаяния в бассейне р. Кама с применением данных глобальных моделей прогноза погоды. Лёд и снег, 2019. Т. 59. № 4. С. 494–508. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-4-423.
5. *Разумов В.В., Качанов С.А., Разумова Н.В., Чириков А.Г., Шагин С.И., Беккиев М.Ю., Глушко А.Я., Пчёлкин М.И., Фролко С.В.* Масштабы и опасность наводнений в регионах России. М.: ВНИИ ГО ЧС, 2018. 364 с.
6. *Толстых М.А.* Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития. Труды Гидрометцентра России, 2016. № 1. С. 5–33.
7. *Danielson J.J., Gesch D.B.* Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010). Open-File Report 2011–1073. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2011. 26 p.
8. *Frolov A.V., Asmus V.V., Borshch S.V., Vil'fand R.M., Zhabina I.I., Zatyagalova V.V., Krovotyntsev V.A., Kudryavtseva O.I., Leont'eva E.A., Simonov Y.A., Stepanov Y.A.* GIS-Amur system of flood monitoring, forecasting, and early warning. Russian Meteorology and Hydrology, 2016. V. 41 (3). P. 157–169. DOI: 10.3103/S1068373916030018.
9. *Frolova N.L., Kireeva M.B., Magrickiy D.V., Bologov M.B., Kopylov V.N., Hal J., Semenov V.A., Kosolapov A.E., Dorozhkin E.V., Korobkina E.A., Rets E.P., Akutina Y., Djamalov R.G., Efremova N.A., Sazonov A.A., Agafonova S.A., Belyakova P.A.* Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment. Natural Hazards, 2017. V. 88. P. 103–131. DOI: 10.1007/s11069-016-2632-2.
10. *Napolitano E., Marchesini I., Salvati P., Donnini M., Bianchi C., Guzzetti F.* LAND-deFeND — An innovative database structure for landslides and floods and their consequences. Journal of Environmental Management, 2018. V. 207. P. 203–218. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.11.022.
11. *Olthof I.* Mapping seasonal inundation frequency (1985–2016) along the St-John river, New Brunswick, Canada using the Landsat archive. Remote Sensing, 2017. V. 9 (2). Art. No 143. DOI: 10.3390/rs9020143.
12. *Qi S., Brown D.G., Tian Q., Jiang L., Zhao T., Bergen K.M.* Inundation extent and flood frequency mapping using LANDSAT imagery and digital elevation models. GIScience & Remote Sensing, 2009. V. 46 (1). P. 101–127. DOI: 10.2747/1548-1603.46.1.101.
13. *Pyankov S.V., Kalinin N.A., Shikhov A.N., Abdullin R.K., Bykov A.V.* Simulation of snow cover formation and melt with publication of the output data on the web map service (on the example of Kama river basin). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. V. 321. Art. No 012009. DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012009.
14. *Pyankov S.V., Shikhov A.N., Kalinin N.A., Sviyazov E.M.* A GIS-based modeling of snow accumulation and melt processes in the Votkinsk reservoir basin. Journal of Geographical Sciences, 2018. V. 28 (2). P. 221–237. DOI: 10.1007/s11442-018-1469-x.
15. *Wang X., Wang J., Che T., Huang X., Hao X., & Li H.* Snow cover mapping for complex mountainous forested environments based on a multi-index technique. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018. V. 11 (5). P. 1433–1441. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2810094.

REFERENCES

1. *Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V.* Flood forecasting and early warning system on the rivers of the Black Sea coast of the Caucasus and the Kuban basin. Proceedings of the Hydrometeorological Center of the Russian Federation. Spec. Issue 356, 2015. 247 p. (in Russian).
2. *Danielson J.J., Gesch D.B.* Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010). Open-File Report 2011–1073. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2011. 26 p.
3. *Deryugina V.V., Borsch S.V., Krovotyntsev V.A., Simonov Yu.A.* Web-GIS system for monitoring and forecasting of the hydrological situation in the basins of large rivers of Russia using ground-based and satellite data. Abstracts of the XVII All-Russian Open Conference "Current

Problems in Remote Sensing of the Earth from Space". Moscow: Space Research Institute of RAS, 2019. P. 84 (in Russian).
4. *Frolov A.V., Asmus V.V., Borshch S.V., Vil'fand R.M., Zhabina I.I., Zatyagalova V.V., Krovotyntsev, V.A., Kudryavtseva O.I., Leont'eva E.A., Simonov Y.A., Stepanov Y.A.* GIS-Amur system of flood monitoring, forecasting, and early warning. Russian Meteorology and Hydrology, 2016. V. 41 (3). P. 157–169. DOI: 10.3103/S1068373916030018.
5. *Frolova N.L., Kireeva M.B., Magrickiy D.V., Bologov M.B., Kopylov V.N., Hal J., Semenov V.A., Kosolapov A.E., Dorozhkin E.V., Korobkina E.A., Rets E.P., Akutina Y., Djamalov R.G., Efremova N.A., Sazonov A.A., Agafonova S.A., Belyakova P.A.* Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment. Natural Hazards, 2017. V. 88. P. 103–131. DOI: 10.1007/s11069-016-2632-2.
6. *Napolitano E., Marchesini I., Salvati P., Donnini M., Bianchi C., Guzzetti F.* LAND-deFeND — An innovative database structure for landslides and floods and their consequences. Journal of Environmental Management, 2018. V. 207. P. 203–218. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.11.022.
7. *Olthof I.* Mapping seasonal inundation frequency (1985–2016) along the St-John river, New Brunswick, Canada using the Landsat Archive. Remote Sensing, 2017. V. 9 (2). Art. No 143. DOI: 10.3390/rs9020143.
8. *Presnyakova A.N., Pisarev A.V., Khrapov S.S.* The study of the dynamics of flooding of the Volga-Akhtuba floodplain based on space monitoring. Bulletin of Volgogradsky State University. Series 1. Mathematics. Physics, 2017. V. 1 (38). P. 66–74 (in Russian).
9. *Pyankov S.V., Kalinin N.A., Shikhov A.N., Abdullin R.K., Bykov A.V.* Simulation of snow cover formation and melt with publication of the output data on the web map service (on the example of Kama river basin). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. V. 321. Art. No 012009. DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012009.
10. *Pyankov S.V., Shikhov A.N., Kalinin N.A., Sviyazov E.M.* A GIS-based modeling of snow accumulation and melt processes in the Votkinsk reservoir basin. Journal of Geographical Sciences, 2018. V. 28 (2). P. 221–237. DOI: 10.1007/s11442-018-1469-x.
11. *Pyankov S.V., Shikhov A.N., Mikhaylyukova P.G.* Simulation of snow accumulation and melting in the Kama river basin using data from global prognostic models. Ice and Snow, 2019. V. 59. No 4. P. 494–508. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-4-423 (in Russian).
12. *Qi S., Brown D.G., Tian Q., Jiang L., Zhao T., Bergen K.M.* Inundation extent and flood frequency mapping using LANDSAT imagery and digital elevation models. GIScience & Remote Sensing, 2009. V. 46 (1). P. 101–127. DOI: 10.2747/1548-1603.46.1.101.
13. *Razumov V.V., Kachanov S.A., Razumova N.V., Chirikov A.G., Shagin S.I., Bekkiev M.Yu., Glushko A.Ya., Pchelkin M.I., Frolko S.V.* The extent and hazard of floods in the regions of Russia. Moscow: Civil Defense and Disaster Management All-Russian Science Research Institute, 2018. 364 p. (in Russian).
14. *Tolstykh M.A.* Global atmospheric models: current status and development prospects. Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia, 2016. V. 1. P. 5–33 (in Russian).
15. Wang X., Wang J., Che T., Huang X., Hao X., Li H. Snow cover mapping for complex mountainous forested environments based on a multi-index technique. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018. V. 11 (5). P. 1433–1441. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2810094.

УДК: 911.375 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-20-40**

О.И. Вендина[1], А.Н. Панин[2]

КОНТАКТНОСТЬ И КОНФЛИКТНОСТЬ ГОРОДА: ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ ЭТНОКУЛЬТУРНЫМ РАЗНООБРАЗИЕМ[3]

АННОТАЦИЯ

В данной статье предпринята попытка определить возможный дизайн геоинформационного мониторинга проблем, связанных с ростом этнокультурного разнообразия населения крупнейших городов. Мониторинг рассматривается как одна из опор городского управления и методологический подход, позволяющий решать конкретные задачи в условиях неопределённости и изменчивости самого объекта управления — межэтнических отношений. Авторы исходят из представления о городе как высококонтактной среде — самонастраивающейся социальной реальности, пронизанной множеством связей и взаимодействий, которые поддаются прямым и/или косвенным управленческим воздействиям. Управление этнокультурным разнообразием в этом контексте видится как сочетание тактики следования в русле самоорганизации населения с управленческой логикой противодействия этнической дискриминации, насилию и конфликтам. В статье подчёркивается необходимость междисциплинарного подхода к анализу причин и следствий межэтнических и — шире — межкультурных проблем в городах. Сформулированы основные принципы, обеспечивающие эффективность мониторинга как аналитического инструмента вырабатываемой политики. Показаны возможности и ограничения разных теоретических концепций, методов анализа и источников информации. Подчёркивается роль ГИС-платформы для интеграции и обобщения разнородных данных — от статистических показателей и результатов опросов до «больших данных» и сообщений твиттера. Авторы полагают, что предлагаемая модель геоинформационного мониторинга позволит преодолеть проблему директивного уподобления этнокультурной политики городского уровня политике региональной и федеральной, добиться их синтеза взамен слепого копирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мониторинг, город, управление, этнокультурное разнообразие, ГИС

---

[1] Институт географии РАН, Старомонетный пер., д. 29, стр. 4, 119017, Москва, Россия; *e-mail:* **vendina@gmail.com**

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

[3] Исследование выполнено в Институте географии РАН и на географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова

Olga I. Vendina[1], **Alexander N. Panin**[2]

URBAN CONTACTS AND CONFLICTS: THE GIS-MONITORING AND MANAGEMENT OF ETHNOCULTURAL DIVERSITY

ABSTRACT

This article is aimed to outline the possible design of the GIS-monitoring for revealing the problems associated with the growth of ethnocultural diversity in mega-cities. Monitoring is considered to be one of the urban governance pillars and a methodological approach allowing administration to meet specific challenges in situations, where the object of governance — interethnic relationships — is uncertain, fragile and changeable. The authors assume that an urban environment is a highly contact environment — a self-organized social reality permeated by plethora of links and interactions which can be influenced by the direct and indirect administration. In this context cultural diversity management is seen as a combination of practices corresponding to grass-route processes with strategic logic of the politics of counteracting to ethnic discrimination, violence and conflicts. The importance of the interdisciplinary approach to the analysis of the causes and consequences of interethnic and wider intercultural tensions in the cities is underlined in the article. The key principles of the ethnocultural diversity monitoring which ensure its efficiency as an analytical tool of policy-making are formulated. The empirical abilities and limits of various theoretical concepts, methods, and data sources are shown. The role of GIS as a platform to integrate and synthesize heterogeneous information from many sources — from statistical indicators and survey results to BigData and twitter-messages, is emphasized. The authors believe that the proposed design of the GIS-monitoring should allow to overcome the problem of direct political subordination of the ethnocultural politics at the city level to that at the regional and federal levels, and to realize the synthesis of different approaches instead of replicating.

KEYWORDS: monitoring, city, governance, ethnocultural diversity, GIS

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг — широко используемый метод систематического наблюдения за изменениями, постепенно накапливающимися в природных, антропогенных, социальных и политических системах. Как правило, он преследует несколько целей: а) оценка сложившейся ситуации; б) контроль происходящих процессов; в) прогноз развития событий. Геоинформационный мониторинг в этом контексте означает подчёркнутое внимание к роли пространственных факторов, оказывающих существенное влияние на характер и особенности изучаемых процессов. От обычного сбора, систематизации и анализа первичной информации, также привязанной к месту (административно-территориальным единицам или геолокации), геоинформационный мониторинг отличает детальное знание территории, учёт накопленных ранее проблем и противоречий, а также неконтролируемых обстоятельств, связанных с внешними факторами, политическими решениями и действиями.

Сегодня уже никому не нужно доказывать эффективность геоинформационного мониторинга как аналитического инструмента вырабатываемой политики и территориального планирования, тем не менее, беспрецедентное расширение сферы его использования и проникновение в области, где он никогда ранее не применялся, ставит целый ряд вопросов. Прежде всего, о возможности переноса опыта, накопленного при изучении природных

[1] Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Staromonetny lane, 29-4, 119017, Moscow, Russia; *e-mail:* **vendina@gmail.com**

[2] Moscow State University M.V. Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail:* **alex_panin@mail.ru**

объектов на социальные явления и процессы. При общей универсальности подхода эмпирические измерения далеко не всегда способны адекватно отразить трансформации, происходящие в жизни общества. Если в случае природно-климатических систем опора на эмпирику позволяет установить причинно-следственные связи и прогнозировать развитие событий на основе корреляционных зависимостей, то мониторинг социально-политических изменений требует каузального подхода. Отсутствие строгой детерминированности человеческого поведения и вероятностный характер получаемых выводов затрудняют принятие управленческих решений. Опытные управленцы склонны скорее доверять собственной интуиции или следовать указаниям вышестоящих руководителей, нежели данным мониторинговых исследований, особенно если они расходятся с их представлениями. Но дело не только в консервативности бюрократического мышления и закрытости системы администрирования, но и в методологических проблемах мониторинга социальных процессов. Выходя за пределы эмпирического знания, исследователь начинает вязнуть в неопределённости и разного рода допущениях, попадает в ловушку устойчивых социальных стереотипов. Преодолеть эти затруднения возможно только при наличии ясных концептуальных установок, понимания того, что именно и для чего мы собираемся мониторить, каковы эмпирические ограничения теоретических построений и используемых методов, где искать данные, позволяющие компенсировать ощущаемый дефицит информации. Это превращает геоинформационный мониторинг из хорошо отработанной процедуры отслеживания динамики конкретных показателей в междисциплинарный и мультиперспективный квест. Неизбежно возникает риск методической эклектики, совмещения несовместимого и в результате неверных выводов. Фактически при соблюдении принципа методологической универсальности мониторинг социальных процессов обладает многими специфическими чертами. В данной статье мы предпринимаем попытку определить возможный дизайн геоинформационного мониторинга проблем, связанных с ростом этнокультурного разнообразия населения крупнейших городов, показать преимущества предлагаемого подхода и его методические ограничения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Города и миграции: мировые тренды

За прошедшую четверть века социально-демографический и этнический состав населения крупнейших городов мира значительно изменился под влиянием миграций. Массовые перемещения людей из регионов «глобального Юга» в города «глобального Севера» [Миграции и города мира…, 2016; *Вишневский, Денисенко*, 2016; *Price, Benton-Short*, 2008] позволили восполнить дефицит трудовых ресурсов стареющих мегаполисов развитого мира, но они также привели к снижению доли местного населения в составе городских социумов и культурной плюрализации городских сообществ. В Лондоне и Амстердаме численность т.наз. “British Whites” и “Dutch” опустилась ниже 50 %-ной отметки уже в 2012 и 2013 гг. За ними последовали Париж, Брюссель и Вена. Во Франкфурте-на-Майне — главном финансово-экономическом центре Германии — доля иммигрантов в 2016 г. составила 50 %, в Нюрнберге — 45 %, Мюнхене — 41 %, Дюссельдорфе — 39 %, Гамбурге — 32 %, Берлине — 28 %. Чем более город был вовлечён в глобальные экономические и политические процессы, тем выше была доля иммигрантов в его населении [*Schneider*, 2018; *Tribalat*, 2013].

Не менее существенное влияние на крупнейшие города оказал фактор диверсификации регионов исхода мигрантов. В отличие от недавнего прошлого, когда мигранты ассоциировались с представительными и институализированными меньшинствами, как правило, связанными с принимающей страной историческими альянсами и колониальным прошлым, современный этнокультурный спектр миграционного потока формируется множеством мелких этнических групп со всего мира. Например, во Франкфурте-на-Майне проживают выходцы из 177 стран, причём диаспоры

120 из них столь малочисленны, что в совокупности составляют 5,7 % приезжих. В Гамбурге — совокупная численность выходцев из Польши, Турции и Афганистана — трёх крупнейших землячеств города — едва превышает 10 %. Остальные иммигранты принадлежат к различным этно-национальным группам, каждая из которых не дотягивает до 1 % [*Schneider*, 2018]. Это не только создаёт проблемы городского общежития и соседства, ставшие уже привычными, но и значительно осложняет работу общественных институтов — системы образования, социального обеспечения и здравоохранения. Основной проблемой становится не культурное многообразие и необходимость особой политики, адресованной всё новым и новым меньшинствам, а размывание социально-нормативной культуры большинства, характеризующей принимающее сообщество. Фактически это означает необходимость пересмотра таких фундаментальных для европейского общества понятий, как нация, гражданство и национальное единство [*Castles*, 1993]. Справедливость данного тезиса подтверждают горячие дебаты между сторонниками культурного плюрализма и защитниками национальных ценностей, которые развернулись в европейских медиа в связи с «кризисом мультикультурализма» и последовавшим вскоре «миграционным кризисом».

Ситуация в крупнейших российских городах имеет много сходных и одновременно отличительных черт. Все они, а не только столицы — Москва и Санкт-Петербург — являются миграционно привлекательными и притягивают выходцев как из сельской местности, так и из постсоветских государств. При этом чем менее благоприятной является экономическая ситуация в городе и активнее идёт отток местных жителей в более динамичные центры страны или за рубеж, тем заметнее миграционное замещение населения. Помимо экономики, на процесс этнокультурной плюрализации российских городов влияют их статус (столичность) и географическое положение — близость к ключевым экономическим центрам, транспортным узлам, границам и зонам межкультурных контактов[1]. Хотя к этническим и культурным меньшинствам в российских городах применяется термин «диаспора», подавляющее большинство из них не является диаспорами других государств. Это граждане России, обладающие всеми политическими и социальными правами. Если употреблять термин «диаспора» в строгом смысле слова, то они сформированы преимущественно выходцами из постсоветских стран, их представители являются наследниками общей советской культуры, следы которой сохраняются до настоящего времени. Советское влияние проявляется не только в привычках и обыденных практиках людей, но и в укоренившихся представлениях о национальной политике. В советские годы её отличала двойственность: с одной стороны, она разводила этнические группы по «своим» национальным квартирам, где создавались условия для реализации этнокультурных запросов, а с другой — делала ставку на этнически индифферентную городскую культуру, опирающуюся на идеологию интернационализма. Постсоветская легитимация этнокультурного плюрализма как принципа городской жизни, пришедшего на смену советской унификации, была воспринята большинством городского населения как драма человеческих отношений. Люди увидели в происходящих изменениях не столько проявления нового типа развития, сколько шаг назад и угрозу привычному порядку вещей [*Мукомель*, 2017; *Вендина, Паин*, 2018]. Миграционные процессы, которые ещё относительно недавно воспринимались как знак социальной мобильности и романтики, стали рассматриваться через призму конфликтности, а проявления групповой солидарности (земляческой и этнической) — вызывать подозрения. Как и в западных обществах, в России развернулась дискуссия между сторонниками культурного плюрализма и защитниками национальных ценностей. Был поставлен целый ряд вопросов, имеющих вполне

[1] Случаи гомогенизации этнического состава населения российских региональных центров, как, например, в Грозном, редки; они являются следствием вооружённых конфликтов и оттока русского населения, напуганного агрессивными проявлениями этноцентризма

практическую подоплеку. Прежде всего, о мирном и продуктивном взаимодействии людей с разным опытом социализации и системами ценностей в «тесном» городском пространстве. Как оценить выгоды и риски роста этнокультурного разнообразия городов? Какие социальные принципы, нормы и правила необходимо поддерживать для устойчивого функционирования общественных институтов? На какие теории, концепции и практики можно опереться при выработке политики интеграции городского населения и профилактики потенциально возможных конфликтов?

Контактность и конфликтность города: теория и подходы

Крупнейшие города — это в высшей степени динамичная среда, в которой ежеминутно происходят тысячи контактов, в т.ч. между людьми, имеющими разные интересы, взгляды и убеждения. Большинство возникающих между ними противоречий и конфликтов не имеют отношения к этничности и являются социальными по своей природе. Тем не менее, этничность, по словам Роджерса Брубейкера, «пропитывает» взаимоотношения людей, выражаясь в знаниях здравого смысла, повседневной рутине, институциональных формах, дискурсах и социальных сетях [*Брубейкер*, 2012]. Именно поэтому под любую неприязнь несложно подвести этнический фундамент. Однако аргументация, основанная на этнических предубеждениях, далеко не всегда работает как фактор мобилизации и подталкивает к межгрупповым конфликтам, куда чаще люди остаются нечувствительными к ней. Частично ответить на вопрос о причинах возникновения и невозникновения этнических конфликтов в городах позволяют три теории — контактов, межгрупповых конфликтов и идентичности.

Теория контактов (*Contact theory*) была предложена в середине 1950-х гг. [*Allport,* 1954]. Ей предшествовали развёрнутые научные дискуссии о природе этнической предвзятости и её истоках — от усвоенных с детства предрассудков и манеры поведения до социально-экономических условий жизни. Одно из наблюдений того времени: всплески этнического негативизма, повышающие вероятность межгрупповых конфликтов, связаны с ростом численности этнических групп и темпами происходящих изменений [*Allport,* 1954, p. 221−229]. Выдвигая гипотезу о контактах как инструменте снижения напряжённости межэтнических отношений, Гордон Оллпорт исходил из предположения о ключевой роли межэтнической предвзятости и негативных стереотипов в провоцировании конфликтов. Суть предложенной им теории сводится к довольно ясному и простому принципу: прямые взаимодействия между людьми, разделяющими разные этногрупповые идентичности и системы ценностей, позволяют преодолеть взаимное предубеждение и предрассудки. Больше контактов, меньше предвзятости, страхов и фобий. Однако, чтобы данный принцип срабатывал, необходимо соблюдение целого ряда условий. Представители взаимодействующих групп должны: а) обладать равным или сравнимым статусом; б) быть взаимно заинтересованными и мотивированными к совместным действиям; в) взаимодействовать не только на официальном, но и неформальном уровнях. Важными факторами также являются — наличие опыта позитивных контактов, опровергающих негативные стереотипы, а также одобрение и поддержка со стороны общества и власти.

В 2000-х гг. в связи с обострением миграционных проблем и быстрым ростом численности иммигрантов в мегаполисах мира теория контактов вновь оказалась в центре внимания [*Vertovec,* 2007; 2019; *Pettigrew, Tropp,* 2008; 2011; *Hewstone et al*., 2014]. Сегодня на неё опираются не только многочисленные академические исследования, но и городская практика, связанная с программами аккомодации мигрантов [*Рубл,* 2012; «Свои» и «чужие» …, 2016; *Варшавер и др*., 2017; *Цапенко*, 2018]. Эмпирические эксперименты убедительно доказали наличие устойчивой обратной корреляции между интенсивностью межгрупповых контактов и этническим негативизмом. Однако возникли и сомнения.

Если на персональном уровне позитивный «эффект контактности» проявлялся вполне отчётливо, то на уровне межгрупповых взаимодействий он становился менее очевидным, превращаясь, по мере роста численности контактирующих групп, в свою противоположность [*Forbes*, 2004]. Также оказалось, что позитивный эффект контактов в большей

мере влияет на представителей большинства, нежели меньшинств [*Tropp, Pettigrew,* 2005]. Возник вопрос об интерференции «эффекта контактности», понижающего уровень межгрупповой неприязни, и «эффекта предвзятости», негативно сказывающегося на частоте и качестве контактов. Оба эффекта практически в равной мере влияли на состояние межэтнических отношений и настроения людей [*Binder et al.*, 2009], а динамическое равновесие, спонтанно устанавливающееся между ними, легко нарушалось внешними обстоятельствами — от масштабных геополитических изменений до политических игр локальных элит [*Шнирельман*, 2010]. Приток иммигрантов в крупнейшие города и рост этнического многообразия населения всё чаще стали упоминаться в числе факторов, препятствующих устойчивому и демократическому развитию общества. По мнению Роберта Патнэма, эти процессы привели к снижению уровня социальной солидарности в обществе и истощению социального капитала доверия [*Putnem,* 2007], необходимых для нормального функционирования государственных, экономических и общественных институтов [*Коллиер,* 2016]. Другими словами, как предсказывал ещё Оллпорт, при отсутствии необходимых социальных условий, поддерживающих позитивные эффекты межгрупповых контактов, возрастание их интенсивности влечёт за собой проблемы: “The more contact, the more trouble” [*Allport,* 1954].

Теория межгрупповых конфликтов (*Group conflict theory*) исходит из принципиально иной гипотезы. Предполагается, что межэтнические конфликты являются рациональными по своей природе [*Blumer,* 1958; *Bobo,* 1988; *Quillian,* 1995; *Glaser*, 2003], их глубинные причины кроются не в культурных различиях, а в неравенстве, бедности и дефиците развития [*Billiet et al.,* 2014]. Этот тезис опирается на многочисленные труды европейских и американских исследователей, которые показывают драматический разрыв в социальном и имущественном положении этно-расовых меньшинств, иммигрантов и принимающего общества в городах [*Barry,* 2001; *Jargowsky,* 2015; *Andersen*, 2019]. Сторонники прагматических аргументов теории межгрупповых конфликтов указывают на прямую связь между ухудшением экономической ситуации и ростом антимиграционной озабоченности городского населения [*Meuleman et al.,* 2009]. В среде наиболее затронутых кризисом социальных слоёв обостряется ощущение незащищённости, неопределённости будущего и наличия конкуренции со стороны «других» за жизненно важные ресурсы — материальные (доступное жильё, работа, доходы, социальный сервис и общественные блага) и нематериальные (статус, культурные ценности и власть). Негативизм в отношении тех, кто рассматривается как угроза собственному благополучию, неважно, реальная или вымышленная, является реакций на рост числа людей, претендующих на общественные блага. Градус негативизма резко возрастает, когда ощущение угрозы перерастает в чувство ущемлённости групповых привилегий, рассматриваемых как «естественное право». Требования дискриминационной политики в отношении соперников и защиты «своих» интересов обретают массовый характер, что заметно повышает вероятность межгрупповых конфликтов, имеющих этническую и антимиграционную составляющую.

Важно подчеркнуть, что оценка людьми значимости угроз зависит не только от их реального социально-экономического положения и фактически достигнутого уровня жизни, но и субъективного восприятия «катастрофичности» происходящих изменений, опыта негативных межгрупповых контактов, субъективного ощущения собственной успешности или обездоленности, распространённости общественных страхов, формирующих взгляд на существующие и потенциальные проблемы. Неслучайно среди переменных, влияющих на рост антимиграционных настроений, наибольшим прогнозным эффектом обладают не конкретные экономические показатели, а такие характеристики, как структура политических предпочтений, неустроенность личной жизни, социальная изоляция, безопасность в тёмное время суток, уровень безработицы и др. [*Rustenbach,* 2010; *Meuleman,* 2011], а среди мер, предлагаемых для снижения уровня межгрупповой напряжённости, —

удовлетворение потребностей в признании, уважении, безопасности и справедливости [*Tropp,* 2012; *Zartman,* 2000].

Существенным дополнением к описанным концепциям является теория идентичности, поскольку упомянутые признание, уважение и безопасность имеют прямое отношение к умиротворению конфликтующих идентичностей и мировоззренческих установок. Среди огромного количества публикаций, посвящённых этой теме, для анализа причин возникновения и/или невозникновения конфликтов в крупнейших городах наибольшее значение имеют работы, связанные с самоопределением человека как члена определённой группы — этнической, профессиональной, гендерной или сообщества — политического, национального, городского [*Taifel, Turner,* 1979; *Hogg et al.,* 1995; *Al Ramiah et al.,* 2011]. Становясь коллективными, такие идентичности не только укрепляют/ослабляют уверенность человека в себе и влияют на его самооценку, но и обретают силу нормативных предписаний, отражаясь на поведении людей. Способствуя внутригрупповой консолидации, они способствуют и выработке стереотипов, опирающихся на представления значительных групп людей, исторические нарративы, рассказы друзей и соседей. С их помощью формируется непротиворечивая картина мира, в которой на себя проецируются скорее позитивные национальные черты и качества, а на попадающих в категорию «другие» — скорее негативные [*Hogg, Abrams,* 1988].

Нормативные свойства разделяемых социокультурных идентичностей превращают их в важнейший регулятор человеческого поведения и фактор групповой мобилизации. Именно на социально-нормативные установки человека пытаются воздействовать политики разного уровня, продвигая те или иные ценности, идеи социальной интеграции, национальной и/или этнической солидарности (патриотизма). Нужно заметить, что такие «прививки» коллективных эмоций не слишком успешны. В слабо интегрированных индивидуалистических городских социумах, члены которых ощущают себя мобильными, независимыми и автономными, они срабатывают лишь в кризисных ситуациях (если срабатывают). Претензии на уникальность и исключительность каждой личности делают позитивную интеграцию включения менее привлекательным фактором формирования коллективных идентичностей, нежели негативную интеграцию исключения [*Luhmann*, 1997]. «Другие» начинают определяться через дефицит или отсутствие качеств, которые человек считает нормативными и значимыми для себя. Описание таких не до конца полноценных субъектов социальных коммуникаций изобилует частицами «не» и «без», указывающими на ущемлённость их социальных позиций [*Болтански, Кьяпелло*, 2011]. Если ещё совсем недавно в категорию «без и не» попадали преимущественно бездомные (бомжи) и девиантные группы, поведение которых не укладывалось в социально-одобряемые нормы и правила (беспредельщики), то ныне представление о городской маргинальности значительно расширилось. Оно включило в себя не только иммигрантов (неграждан) и представителей этнических меньшинств, носителей «неправильных» идентичностей, но и «обычных людей», не попадающих в число мобильных и self-made горожан. Однако и эти «последние» отдают предпочтение не солидаризации со всеми обездоленными ради защиты общих интересов, а негативной интеграции исключения, обеспечивающей им адаптацию к изменениям групповой и институциональной структуры социума [*Гудков,* 2004].

Описанные тенденции приводят к статусной (позиционной) иерархизации городских сообществ. Если для лиц, занимающих верхние этажи социальной пирамиды, их этническая и даже национальная принадлежность имеет малое значение в силу космополитичности представлений и жизненной практики, то «внизу» этничность является знаком бедности и маргинальности. Ещё хуже то, что подобная этно-статусная иерархия закрепляется в городском пространстве, и на районы, где в силу более низкой стоимости жилья селятся мигранты, общественное мнение навешивает ярлык этнических анклавов и гетто (рис. 1).

Достаточно очевидно, что подобное маркирование городского пространства повышает конфликтность городской среды[1].

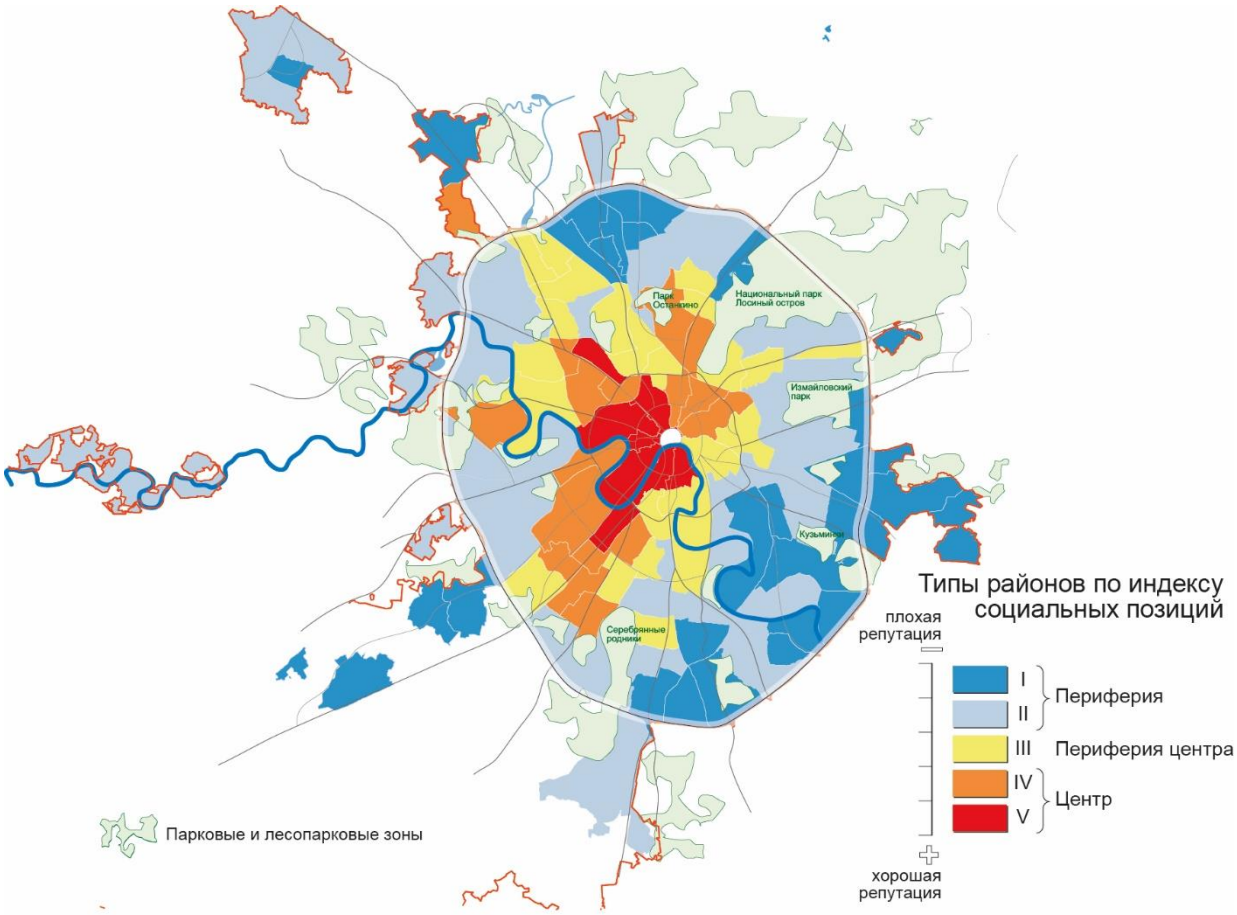


Рис. 1. Москва: резидентная дифференциация районов города в зависимости от репутации места
Fig. 1. Moscow: differentiation of the residential city districts depending on the reputation of the place

Какие выводы можно сделать из предложенного беглого обзора теоретических концепций? Во-первых, ни одна из них не является всеобъемлющей и не предлагает окончательного решения проблемы межэтнических и, шире, межкультурных конфликтов в городах. Только опора на знания, «добытые» в разных исследовательских областях, позволяет приблизиться к пониманию и объяснению сложных городских ситуаций и выработать необходимые подходы к решению возникающих проблем. Во-вторых, возрастающая сложность городских социумов, проявляющаяся прежде всего в многообразии этнокультурного состава населения, не позволяет рассматривать возникающие проблемы межэтнических отношений только с позиции конфликтующих идентичностей, взаимной неприязни, предвзятости, ксенофобии и прав человека, какими бы важными эти аспекты ни казались. Всё острее встают вопросы новых форм социального неравенства и плохо предсказуемых последствий двойственности процессов социального включения/исключения, влекущие за собой пересмотр многих общественных представлений (например, о социальной солидарности и справедливости) и расширение городской маргинальности. В-третьих, противоречивость и

[1] Понятие «среды» объединяет представления о локальном социуме и его жизненном пространстве

ограниченность теоретических построений, объясняющих причины напряжённости межэтнических отношений, не означает их ущербности и бесполезности. Напротив, неполнота концепций проявляет многообразие происходящих процессов, показывает их неоднозначность, выявляет сферы городской жизни, нуждающиеся в диагностике, и стимулирует развитие исследовательского инструментария для более тонкой настройки мониторинга.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Архитектура мониторинга этнокультурного разнообразия

Мониторинг этнокультурного разнообразия рассматривается нами как одна из основ городского управления и методологический подход, позволяющий решать конкретные задачи в условиях не только высокой степени неопределённости внешней среды, но и изменчивости самого объекта управления — межэтнических отношений. Невозможность априори выделить доминирующие факторы, влияющие на ход процессов (приведённый обзор теоретических концепций это убедительно показывает), заставляет уделять наибольшее внимание динамике происходящих изменений. Главным становится не достижение декларативной цели «гармонизации межэтнических отношений», а понижение уровня неопределённости ситуации и остроты вызовов, связанных с ростом этнокультурного разнообразия. Благодаря внесению ясности в проблему соотношения контактности и конфликтности городской среды, мониторинг становится инструментом непрямого контроля ситуации. Во многих случаях власти достаточно опереться на локальные процессы самоорганизации: практика городской жизни, социальные уклады и традиции делают проявления открытого насилия социально неприемлемыми [*Вендина, Паин,* 2018]. Но точно так же нередки ситуации, когда неформальные институты социума оказываются недостаточно развитыми и авторитетными, чтобы регулировать межгрупповые взаимодействия. Необходимы целенаправленные управленческие усилия.

Но как достичь идеала адресной политики в сфере межэтнических отношений, найти оптимальное сочетание тактики следования в русле самоорганизации с управленческой логикой противодействия этнической дискриминации, насилию и конфликтам? С нашей точки зрения, это возможно, если в основу архитектуры мониторинга этнокультурного разнообразия будут положены основные принципы ситуационного менеджмента [*Jakobson et al.,* 2007]. Симбиоз инструментального и диагностического подходов, благодаря более точной диагностике причин возникновения кризиса, позволяет частично компенсировать дефицит управленческих компетенций и «рецептов» выхода из сложных положений. Но чтобы мониторинг обеспечивал ориентацию в нестандартных обстоятельствах, он должен отвечать определённым принципам и требованиям. Важнейшими из них являются:

- ***полимасштабность***, предполагающая учёт различия факторов, действующих на разных территориальных уровнях, и возможность детализации пространственных данных — от анализа общей ситуации до выявления «горячих точек» и их подробного изучения;
- ***темпоральность***, обеспечивающая непрерывный анализ динамики изменений, благодаря чему существует возможность вести мониторинг между переписями населения (1959–2020 гг.), электоральными циклами (4–5 лет), итогами ежегодной статистической отчётности, сезонными миграциями, суточными перемещениями горожан и мн. др.;
- ***мультиперспективность***, избегание одностороннего взгляда на исследуемый феномен — данный принцип предполагает отсутствие разрыва между теоретико-методологическими подходами и выработкой конкретной городской политики, знание международной практики, учёт разнообразия поводов и мотиваций, влекущих за собой межгрупповые конфликты и примирения;

- ***использование смешанных методов анализа*** — количественные методы более эффективны при необходимости «взгляда сверху», позволяя увидеть общую картину и понять её структурные особенности, а качественные дают возможность разобраться в деталях, сложных переплетениях причин и следствий происходящих событий.

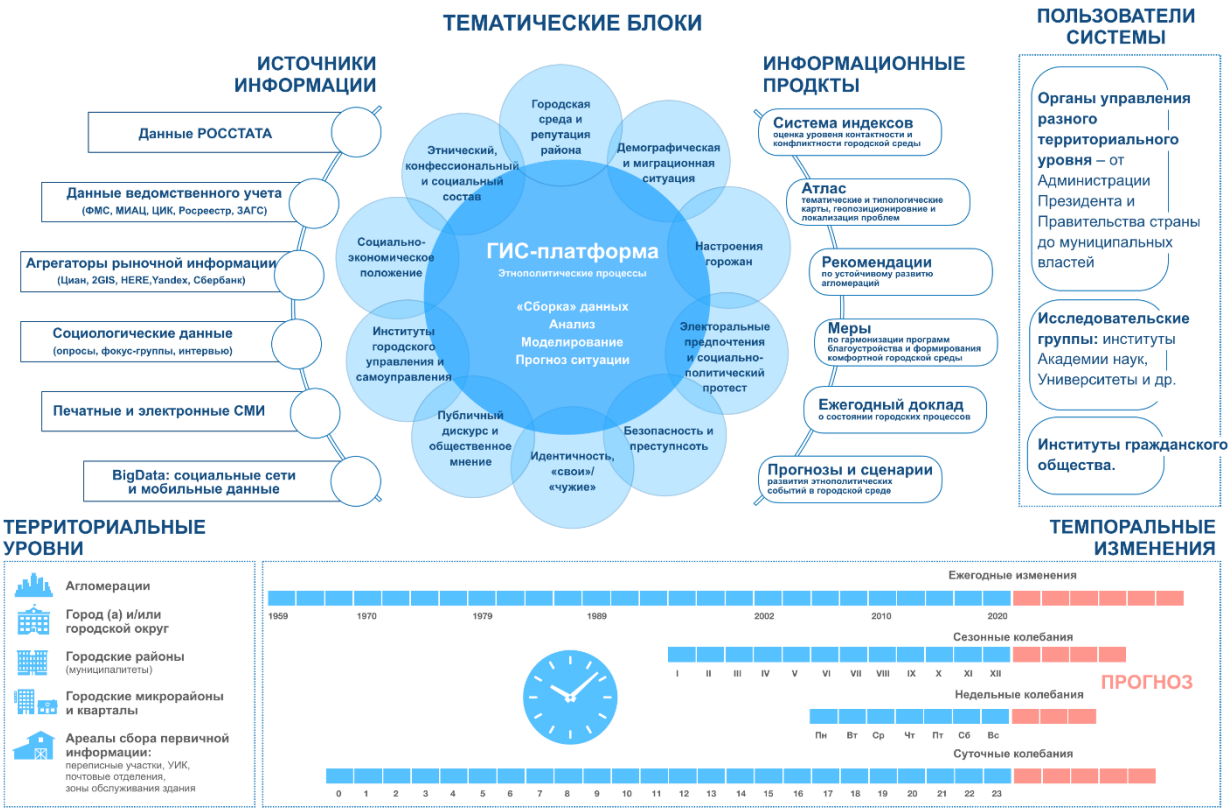


Рис.2. Архитектура геоинформационного мониторинга этнокультурных процессов в крупнейших городах

Fig. 2. The architecture of geographic information monitoring of ethnocultural processes in major cities

Многоэтажное здание мониторинга должно опираться на геоинформационную платформу (ГИС), которая обеспечивает интеграцию и территориальную привязку разнообразных данных об этнических, миграционных, экономических и общественно-политических процессах. Это позволяет не только накапливать и визуализировать данные, но и проводить сравнительный анализ состояния дел в разных районах (кварталах) города, а также в городе и пригороде или соседних регионах и стране. Сегодня на современные ГИС-платформы опираются все крупнейшие мониторинговые системы. Хороший пример — российская информационная система обеспечения градостроительной деятельности (ИСОГД), которая содержит не только геодезические и топографические материалы, но и базы социально-экономических данных, связанные с территориальным планированием разного уровня: Российская Федерация, субъекты РФ, муниципальные районы, городские и сельские поселения[1]. Той же логике следует и предлагаемая нами архитектура мониторинга этнокультурного разнообразия города (рис. 2). При этом чем более мелкими будут пространственные

[1] Градостроительный кодекс Российской Федерации, утверждённый Федеральным законом от 29.12.2004 г. № 190-ФЗ

ячейки сбора исходной информации, тем более точным и детальным будет результат проводимого анализа.

Не возникнет ли риск «утонуть» в большом объёме разнородных данных? Не превратится ли мониторинг этнокультурного разнообразия в анализ случайного набора разрозненных и ничего не объясняющих показателей?

Такой риск всегда есть, и примеров таких тоже немало, тем не менее он оправдан. Этнические факторы в городских межэтнических конфликтах являются социально-опосредованными и сильно зависят от политического контекста. Достаточно вспомнить беспорядки в Париже 2005 г. [*Schneider,* 2008], московском Западном Бирюлёво осенью 2013-го [*Верховский,* 2017] и американском Фергусоне в 2014-м [*Joseph*, 2016]. Можно привести и другие примеры. Все они подтверждают — негативное развитие событий можно было предотвратить, если бы наблюдения исследователей за внутригородской динамикой общественно-политических, демографических и социально-экономических процессов, а также настроениями людей и дискурсивными практиками принимались во внимание местными властями. По сути, умение работать с разными источниками информации и типами данных является страховкой от непросчитанных последствий принимаемых или непринимаемых решений. А проблему избыточности и разнородности исходных данных позволяют решить, во-первых, методы математической статистики, а, во-вторых, возможности ГИС.

Относительная сложность процедур математического моделирования, по сравнению с привычным анализом первичных данных, искупается целым рядом обретаемых преимуществ, таких как:

- редуцирование всего массива показателей до наиболее значимых переменных, отвечающих за изменчивость свойств объекта, исключение второстепенных и случайных вариаций в исходной системе данных;
- сопоставление параметров, измеряемых в разных величинах, статистических и социологических данных, количественных и качественных характеристик; выявление неочевидных связей между процессами, характеризующими разные стороны городской жизни;
- классификация районов (кварталов) города в зависимости от выбираемых типологических признаков, выявление зон сравнительного благополучия/неблагополучия, оценка уровня неоднородности городской среды и социально-пространственной сегрегации;
- сравнение особенностей пространственной вариации выбранных типологических критериев (индексов), уточнение локализации «зон неблагополучия», т.е. таких, где наблюдается рост потенциала конфликтности за счёт аккумуляции негативных характеристик городской среды и отсутствия компенсирующих их факторов и трендов;
- постепенное фокусирование задач мониторинга, обеспечивающее логичный переход от количественного анализа к методам качественных исследований, позволяющим дать содержательную интерпретацию результатов математического моделирования, проверять высказанные гипотезы и уточнять характер необходимых решений.

ГИС создают иные преимущества. Они не только позволяют территориально интегрировать, визуализировать и наглядно представлять результаты мониторинга, но и включают в анализ пространственные факторы. Важнейшие среди них:

- ***местоположение*** — данный фактор оказывает существенное влияние на функционирование разного рода рынков (труда, недвижимости, жилья, коммуникаций, выборов и пр.);
- ***соседство*** — территориальная близость/удалённость, сходство/различие структуры хозяйства и локальной истории;
- ***пространственная позиция*** — центральность/периферийность, пограничность, коммуникационная связанность и пр.

Математические модели и карты как аналитические образы позволяют «свёртывать» и систематизировать информацию, интегрируя сведения, полученные из разных источников — от переписи населения и официальной статистики до опросов социологов, газетных публикаций и текстовых сообщений твиттера. Продуктами мониторинга становится, во-первых, система индексов, верифицирующих различные гипотезы о конфликтности и контактности городской среды, и, во-вторых, аналитический атлас, позволяющий локализовать проблемные зоны, оценивать их масштаб и значимость. Например, сравнение карты межгрупповых столкновений и драк, фиксируемых в режиме реального времени, с индексом «горячих точек», рассчитанным на основе сочетания многих параметров, позволяет понять, в какой мере наблюдаемая картина является чем-то бóльшим, чем случайное событие. Привлечение других индексов, скажем, «этнической мозаичности», «недовольства населения» и «репутации районов» позволяет прогнозировать дальнейшее развитие ситуации и принимать решения, следуя принципу поддержания динамического равновесия между процессами управления и самоорганизации общества.

Проблемы данных и методические ограничения

Сложность структуры мониторинга (рис. 2), соответствующая сложности объекта наблюдений, делает его очень чувствительным к качеству исходных данных. Однако на сегодняшний день информация о населении городов скудна и разрозненна, собирается по слишком крупным ячейкам агрегации. Данные о пространственном поведении людей, которые генерируются сетями мобильной связи, слабо верифицируемы и плохо сопоставимы со статистическими показателями. Перепись населения не даёт адекватного представления о его этнокультурном составе и имущественном положении, а социологические опросы крайне редко учитывают внутригородскую дифференциацию жителей и различия районов. Это означает невозможность простого сведения уже имеющейся информации в единую систему и необходимость её формирования с базового уровня, определяя набор исходных показателей и учитывая аналитические ограничения каждого типа данных и исследовательских подходов.

В современной российской практике регулирования межэтнических взаимодействий в городах приоритет отдаётся гуманитарным подходам, опирающимся на культурную антропологию и этносоциологию, которые накопили большой и ценный опыт эмпирических исследований и с высокой степенью достоверности позволяют оценивать:

- выраженность групповых идентичностей (этнокультурных, национальных, социопрофессиональных, территориальных и иных) и их значимость для человека [*Abrams et al.*, 2005; *Дробижева,* 2017];
- уровень напряжённости межэтнических отношений, взаимной неприязни, обид и претензий [*Osgood et al.*, 1975];
- межкультурные дистанции и готовность к сотрудничеству [*Bogardus,* 1959; *Parrillo, Donoghue,* 2005].

Всё это очень важно и необходимо учитывать в управлении этнокультурном разнообразием города. Однако, как показывают примеры межэтнических столкновений в городах, которых достаточно накопилось за два прошедших десятилетия, перечисленные факторы имеют латентный характер и выплывают наружу только при наличии внешнего толчка, провоцирующего насилие. Такой срыв, как правило, обусловлен социально-экономическим, демографическим и политическим контекстом городской жизни, скоростью происходящих изменений, стечением неблагоприятных обстоятельств, накоплением проблем и противоречий в конкретном квартале или районе. Связь объективных показателей благополучия/неблагополучия населения и субъективных характеристик межгрупповых взаимодействий хорошо описывается теорией конфликтов. Поэтому социологическому и антропологическому зондированию межэтнических отношений должен предшествовать анализ социальной, экономической, демографической и политической ситуации в городах, на основе которого можно говорить об особенностях территориальной дифференциации городского

социума и неслучайности наблюдаемых пространственных различий. Без опоры на это «твёрдое» знание, социологические опросы и интервью остаются разрозненными исследованиями, слабо вписанными в общегородской контекст. Но, встроенные в общую систему, они позволяют разобраться в переплетениях причин и следствий.

Помимо статистических и социологических методов, которые уже давно вошли в управленческую практику, дополнить представление об этнополитической ситуации в городе позволяет институциональный анализ, ориентированный на выявление роли организационных структур и политических инструментов в управлении этнокультурным разнообразием. Исходными данными в этом случае являются принятые официальные документы разного территориального и административного уровня, декларации национально-культурных автономий, неформальные установки общин, землячеств и диаспор, а также инициативных гражданских групп и политических объединений. Этот аналитический блок также включает в себя информацию о локальном опыте межгрупповых взаимодействий, аккомодации меньшинств и мигрантов, частоте и востребованности контактов городских администраций с лидерами этнических диаспор, участии городов в общероссийских и международных программах. Особого внимания требует отслеживание дефектов деятельности сложившейся системы формальных и неформальных институтов: мониторинг проявлений насилия, практики дискриминации, нарушений прав и свобод человека, распространения «языка вражды» в публикациях масс-медиа и обыденном общении.

Существенным дополнением институционального анализа является систематическое наблюдение за флуктуациями публичного дискурса, отражающего и формирующего отношение общества к миграционным и этническим проблемам. Дискурсы, выходящие за пределы частной сферы и циркулирующие в обществе, рассматриваются нами как форма общественного мнения и социальная практика, одно из проявлений способности индивидов к созданию и поддержанию определённого типа социальной организации и порядка. Наблюдение за трансформацией публичного дискурса позволяет устанавливать изменения в структуре поведенческих мотиваций людей. Так, резкий рост публично выражаемого этнического негативизма в сочетании с ростом численности неприязненно воспринимаемых этнических групп — грозные предвестники назревающего конфликта. Недостатком дискурс-анализа как прогностического метода является его субъективность и зависимость от профессионализма исследователя. Частично решить эту проблему помогают технологии беспристрастного компьютерного анализа текстов, которые постепенно проникают из науки в практику и могут быть полезны для анализа межэтнических отношений.

Ещё одним перспективным направлением мониторинга является анализ контента социальных сетей — незримых и обезличенных акторов, плетущих ткань повседневных контактов миллионов людей и структурирующих социальную реальность, — с помощью технологий обработки «больших данных» (BigData). На сегодняшний день этот метод успешно используется для мониторинга транспортной мобильности и потребительской активности городского населения. Гораздо реже он применяется для анализа пространственных различий содержательной структуры социальных медиа. Не в последнюю очередь это связано с отсутствием каналов легального доступа к информации в силу особенностей администрирования сетевых медиа. Но есть и причины другого рода. Во-первых, тема города и «своего» района слабо представлена в потоке информации, генерируемой социальными сетями. Если такие сообщения всё же появляются на ленте, то в них преобладает негативный контент. Причем уровень негативизма явно коррелирует с погодными условиями и сложившимися стереотипами общественного мнения, маркирующими городские районы как «хорошие» или «плохие». Приходится констатировать: сетевые сообщения характеризуют в первую очередь их автора и его настроение, и в последнюю — город и район. Во-вторых, возможности автоматического контент-анализа сетевых СМИ весьма ограничены, такая работа требует значительных трудозатрат на сбор и систематизацию данных. Особый случай — Instagram и YouTube, где почти отсутствуют текстовые сообщения. Зато они наполнены

разнообразными визуальными и музыкальными образами, которые позволяют анализировать средовой контекст жизни людей и их вкусовые предпочтения как факторы, влияющие на мировоззрение и поведение человека. Это тонкие и трудоёмкие исследования, методика верификации которых ещё недостаточно разработана. В-третьих, аудитория разных социальных сетей сильно различается по своей половозрастной и социальной структуре. Например, в московском сегменте сети «ВКонтакте» доля молодежи превышает 60 % пользователей, а аудиторию «Одноклассников» составляют преимущественно женщины в возрасте 35–64 лет. В «Facebook» собираются люди старше 45 лет. Twitter — наиболее удобная сеть для сбора информации и анализа сообщений, но даже в Москве она имеет недостаточное количество подписчиков и является нерепрезентативной.

Итак, как и в случае концептуального обоснования мониторинга этнокультурного разнообразия города, мы сталкиваемся с отсутствием единого и единственного источника информации, который позволял бы надёжно прогнозировать развитие этнополитических процессов. Только совокупность разнородных данных и методов анализа превращает мониторинг в инструмент прогноза, территориального планирования и принятия текущих решений. Вопреки увлечению мобильными и спонтанно генерируемыми данными (современный город насыщен разнообразными датчиками, производящими невероятные объёмы информации о каждом своём обладателе — от человека до зданий и помещений), первую скрипку в мониторинге по-прежнему играют не они, а традиционные (of-line) подходы: статистические наблюдения, опросы, «face-to-face» общение, анализ долговременных социальных трендов — от демографических изменений до дискурсивных метаморфоз. Причина этого в каузальной, а не корреляционной природе социальных зависимостей, о чём уже упоминалось, в отличии мониторинга социальных процессов от мониторинга природных, детерминированных физическими факторами.

ВЫВОДЫ

В заключение хотелось бы подчеркнуть несколько важных положений, которые были высказаны в тексте статьи, но могли ускользнуть от внимания. Прежде всего, предлагаемая модель мониторинга не исходит из предположения об изначальной конфликтности межэтнических отношений в городах и этнокультурном разнообразии как источнике угроз. Напротив, она позволяет рассматривать город как контактную среду — самонастраивающуюся социальную реальность, пронизанную множеством связей и взаимодействий, которые поддаются как прямым, так и косвенным управленческим воздействиям.

Мы также исходили из институциональных принципов организации жизни социума, согласно которым ни один из агентов власти над обществом (неважно, формально признанных или неформальных) не обладает всеми возможностями контролировать социальные процессы. Однако формируемые ими институты оказывают существенное влияние на их ход: от расстановки сил в обществе и особенностей межгрупповых коммуникаций зависит многое — от характера межэтнических отношений до практики повседневной жизни. Поэтому чрезвычайно важно понимать мотивы, цели и механизмы действий разных участников городской жизни, оценивать их влиятельность, определять характер и каналы влияния. Добиться этого в полной мере позволяет использование междисциплинарного подхода и разнообразного методического инструментария. Однако существующий риск эклектичного соединения результатов разрозненных количественных и качественных исследований, обесценивающий результаты мониторинга, требует строго соблюдения принципа единства методологических установок, понимания того, что, как и для чего измеряется.

Важно также подчеркнуть значимость временной и пространственной составляющих мониторинга. В случае временной компоненты, в фокусе внимания должны быть наблюдения не только за изменениями в этнополитической сфере и неблагоприятными трендами, но и за скоростями происходящих сдвигов. Стремительность перемен сама по

себе является серьёзным вызовом для общества, не успевающего к ним адаптироваться. Возникающее запаздывание — катализатор конфликтных ситуаций.

Учёт пространственных факторов отвечает вызову иного рода: включение городской этнокультурной политики в более широкий административно-территориальный контекст — региональный и государственный, позволяет преодолевать издержки местной «самодеятельности» и самостийности, не подавляя при этом локальную инициативу. К сожалению, в сегодняшней российской реальности эта проблема решается почти исключительно с помощью механизмов усиления «вертикали власти». Взаимосвязь и взаимообусловленность политики разного территориального уровня трактуется как иерархическая подчинённость, а не взаимодействие разных субъектов, отличающихся не только своими управленческими компетенциями, но и целевыми установками, решаемыми задачами и используемым инструментарием. Следование логике подчинения и дублирование смыслов государственной этнокультурной политики на муниципальном уровне выхолащивает суть последней, превращая её в формальное предписание «для начальства». Предлагаемая модель геоинформационного мониторинга позволяет преодолеть проблему директивного уподобления политики одного территориального уровня политике другого и добиться их синтеза, а не слепого копирования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку Российскому научному фонду: проект РНФ № 15-18-00064 «Новые подходы и методы регулирования этнополитических отношений на территории крупнейших городских агломераций России», а также Институту географии РАН: ГЗ ИГ РАН «Проблемы и перспективы территориального развития России в условиях его неравномерности и глобальной нестабильности» № 0148-2019-0008, № АААА-А19-119022190170-1.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their gratitude for the financial support of the Russian Science Foundation, RSF project No 15-18-00064 “New approaches and methods of regulation of ethno-political relations on the territory of the largest urban agglomerations of Russia” and Institute of Geography, Russian Academy of Sciences: GZ IG RAS “Problems and prospects of territorial development of Russia in conditions of uneven and global instability” No 0148-2019-0008, No AAAA-A19-119022190170-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Болтански Л., Кьяпелло Э*. Новый дух капитализма. М.: Новое литературное обозрение, 2011. 976 с.
2. *Брубейкер Р*. Этничность без групп. М.: Издательский дом ВШЭ, 2012. 408 с.
3. *Варшавер Е.А., Рочева А.Л., Иванова Н*.С. Интеграция мигрантов на местном уровне: результаты научно-практического проекта. Социологические исследования, 2017. № 5. С. 110–117.
4. *Вендина О., Паин Э*. Многоэтничный город. М.: Сектор, 2018. 180 с.
5. *Верховский А*. Динамика преступлений ненависти и деятельности ультраправых групп и движений в России в 2010-е годы. Пути к миру и безопасности. Проблемы терроризма, насильственного экстремизма и радикализации (российские и американские подходы). Спецвыпуск. М.: ИМЭМО РАН, 2017. С. 116–124.
6. *Вишневский А.Г., Денисенко М.Б*. Миграции в глобальном контексте. Доклад на XVII Международной научной конференции по проблемам развития экономики и общества. М.: НИУ ВШЭ, 2016. 17 с.
7. *Гудков Л.Д*. Негативная идентичность. Статьи 1997−2002 годов. М.: Новое литературное обозрение, 2004. 816 с.

8. *Дробижева Л.М.* Гражданская идентичность как условие ослабления этнического негативизма. Мир России. Социология. Этнология, 2017. Т. 26. № 1. С. 7–31.
9. *Коллиер П.* Исход: как миграция изменяет наш мир. М.: Издательство Института Гайдара, 2016. 384 с.
10. Миграции и города мира: новые партнёрства для управления мобильными процессами. Глобальный доклад о миграции. М.: МОМ, 2016. 250 с.
11. *Мукомель В.И.* Ксенофобия: этнофобии и мигрантофобии принимающего населения. Социальные факторы межэтнической напряжённости в России. М.: ФНИСЦ РАН, 2017. С. 146–196.
12. *Рубл Б.* Городское разнообразие в эпоху масштабных миграций. Вестник Института Кеннана в России, 2012. № 21. С. 36–44.
13. «Свои» и «чужие»: толерантность, стереотипы, права. М.: Московская Хельсинкская группа, 2016. 116 с.
14. *Цапенко И.П.* Поиски новых подходов к социокультурной интеграции мигрантов. Демографическое обозрение, 2018. № 6. С. 125–149. DOI: 10.17323/demreview.v5i4.8665.
15. *Шнирельман В.А.* «Чистильщики московских улиц»: скинхеды, СМИ и общественное мнение. М.: Academia, 2010. 2-е изд. 164 с.
16. *Abrams D., Frings D., Randsley de Moura G.* Group identity and self-definition. The handbook of group research and practice. Thousand Oaks, CA: Sage Publications, 2005. P. 329–350. DOI: 10.4135/9781412990165.
17. *Ahn von M., Lupton R., Greenwood C., Wiggins D.* Languages, ethnicity, and education in London. London: Institute of Education, University of London. Department of Quantitative Social Studies. Working Paper, 2010. No 10−12. Электронный ресурс: https://www.researchgate.net/publication/46463035_Languages_Ethnicity_and_Education_in_London (дата обращения 18.03.2020).
18. *Allport G.* The nature of prejudices. Cambridge, MA: Addison Wesley, 1954. 576 p.
19. *Al Ramiah A., Miles H., Schmid K.* Social identity and intergroup conflict. Psychological Studies, 2011. V. 56. No 1. P. 44–52. DOI: 10.1007/s12646-011-0075-0.
20. *Andersen H.Sk.* Ethnic spatial segregation in european cities. Routledge, 2019. 240 p.
21. *Barry B.* Culture and equality. An egalitarian critique of multiculturalism. Cambridge, MA: Harvard University Press, 2001. 399 p.
22. *Billiet J., Meuleman B., Dewitte H.* The relation between ethnic threat and economic insecurity in times of economic crisis: analysis of European Social Survey data. Migration Studies, 2014. V. 2. No 1. P. 1–27. DOI: 10.1093/migration/mnu023.
23. *Binder J., Zagefka H., Brown R., Funke F.* Does contact reduce prejudice or does prejudice reduce contact? A longitudinal test of the contact hypothesis among majority and minority groups in three european countries. Journal of Personality and Social Psychology, 2009. V. 96. No 4. P. 843–856. DOI: 10.1037/a0013470.
24. *Blumer H.* Race prejudice as a sense of group position. Pacific Sociological Review, 1958. No 1. P. 3–7.
25. *Bobo L.* Group conflict, prejudice, and the paradox of contemporary racial attitudes. Eliminating Racism: Profiles in Controversy. New York: Plenum Press, 1988. P. 85–114.
26. *Bogardus E.S.* Social distance. Los Angeles, CA: University of Southern California Press, 1959. 104 p.
27. *Castles S.* Migration and minorities in Europe. Perspectives for the 1990s: Eleven hypotheses. Racism and Migration in Western Europe. Oxford: BERG, 1993. P. 17–34.
28. *Foner N., Duyvendak J.W., Kasinitz Ph.* Introduction: super-diversity in everyday life. Ethnic and Racial Studies. Spatial Issue: super-diversity in everyday life, 2019. V. 42. No 1. P. 1–16. DOI: 10.1080/01419870.2017.1406969.

29. *Forbes H.D.* Ethnic conflict and the contact hypothesis. Psychological dimensions to war and peace. The psychology of ethnic and cultural conflict. Westport, Connecticut: Praeger Publishers/Greenwood Publishing Group, 2004. P. 69–88.
30. *Glaser J.* Social context and inter-group political attitudes: Experiments in group conflict theory. British Journal of Political Science, 2003. V. 33. No 4. P. 607−620.
31. *Hewstone M., Lolliot S., Swart H., Myers E., Voci A., Al Ramiah A., Cairns E.* Intergroup contact and intergroup conflict. Peace and Conflict: Journal of Peace Psychology, 2014. V. 20. No 1. P. 39–53. DOI:10.1037/a0035582.
32. *Hogg M., Abrams D.* Social identifications: A social psychology of intergroup relations and group processes. London: Routledge, 1988. 288 p.
33. *Hogg M.A., Terry D., White K.M.* A tale of two theories: A critical comparison of identity theory with social identity theory. Social Psychology Quarterly, 1995. V. 58. No 4. P. 255–269. DOI:10.2307/2787127.
34. *Jakobson G., Buford J., Lewis L.* Situation management: Basic concepts and approaches. Information Fusion and Geographic Information Systems. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. P. 18–33.
35. *Jargowsky P.A.* The architecture of segregation: Civil unrest, the concentration of poverty, and public policy. The Century Foundation. Iss. Brief, 2015. Электронный ресурс: https://community-wealth.org/sites/clone.community-wealth.org/files/downloads/report-jargowsky.pdf (дата обращения 18.03.2020).
36. *Joseph G.* From Ferguson to Charlotte, why police protests turn into riots. CityLab, September 2016. Электронный ресурс: https://www.citylab.com/equity/2016/09/from-ferguson-to-charlotte-why-police-protests-turn-into-riots/500981/ (дата обращения 18.03.2020).
37. *Luhmann N.* Limits of steering. Theory, Culture & Society, 1997. V. 14. No 1. P. 41–57. DOI: 10.1177/026327697014001003.
38. *Meuleman B.* Perceived economic threat and anti-immigration attitudes: Effects of immigrant group size and economic conditions revsited. Cross-cultural analysis: methods and applications. London: Routledge, 2011. P. 281–310.
39. *Meuleman B., Davidov E., Billiet J.* Changing attitudes toward immigration in Europe, 2002–2007: A dynamic group conflict theory approach. Social Science Research, 2009. V. 38. No 2. P. 352–365. DOI: 10.1016/j.ssresearch.2008.09.006.
40. *Osgood Ch.E., May W.H., Miron M.S.* Cross-cultural universals of affective meaning. Urbana: University of Illinois Press, 1975. 520 p.
41. *Parrillo V.N., Donoghue C.* Updating the bogardus social distance studies: A new national survey. The Social Science Journal, 2005. V. 42. No 2. P. 257–271.
42. *Putnam R.D.* “E pluribus unum”: Diversity and community in the twenty-first century. The 2006 Johan Skytte prize lecture. Scandinavian Political Studies, 2007. V. 30. No 2. P.137–174.
43. *Pettigrew T.F., Tropp L.R.* How does intergroup contact reduce prejudice? Meta-analytic tests of three mediators. European Journal of Social Psychology, 2008. No 38. P. 922–934. DOI:10.1002/ejsp.504.
44. *Pettigrew T.F., Tropp L.R.* When groups meet: The dynamics of intergroup contact. Hove, East Sussex, UK: Psychology Press, 2011. 320 p.
45. *Price M., Benton-Short L.* Migration to the metropolis: the rise of immigrant gateway cities. NY: Syracuse University Press, 2008. 424 p.
46. *Quillian L.* Prejudice as a response to perceived group threat: Population composition and anti-immigrant and racial prejudice in Europe. American Sociological Review, 1995. V. 60. No 4. P. 586–611. DOI: 10.2307/2096296.
47. *Rustenbach E.* Sources of negative attitudes toward immigrants in Europe. A mullti-level analysis. International Migration Review, 2010. V. 44. No 1. P. 53−77. DOI: 10.1111/j.1747-7379.2009.00798.x.

48. *Schneider C*. Police power and race riots. Politics & Society, 2008. V. 36. No 1. P. 133–159. DOI: 10.1177/0032329208314802.
49. *Schneider J*. Demographic “megatrends” and their implications. Siirtolaisuus. Migration, 2018. No 3. P. 26–31.
50. *Svendsen B.A., Quist P*. Multilingual Scandinavia: New linguistic practices. Introduction. Multilingual Urban Scandinavia. Bristol, UK: Multilingual Matters, 2010. P. xiii–xxiii. DOI: https://doi.org/10.21832/9781847693143.
51. *Tajfel H., Turner J.C.* An integrative theory of intergroup conflict. The Social Psychology of Intergroup Relations. Monterey: Brooks-Cole, 1979. P. 33–47.
52. *Tribalat M.* Assimilation: la fin du modèle français. Paris: Toucan, 2013. 352 p.
53. *Tropp L.R.* Understanding and responding to intergroup conflict: Toward an integrated analysis. The Oxford Handbook of Intergroup Conflict. Oxford: Oxford University Press, 2012. P. 3–10.
54. *Tropp L.R., Pettigrew T.F*. Relationships between intergroup contact and prejudice among minority and majority status groups. Psychological Science, 2005. V. 16. P. 951−957. DOI: 10.1111/j.1467-9280.2005.01643.x.
55. *Vertovec S.* Super-diversity and its implications. Ethnic and Racial Studies, 2007. V. 30. No 6. P. 1024–1054. DOI:10.1080/01419870701599465.
56. *Vertovec S*. Talking around super-diversity. Ethnic and Racial Studies, 2019. V. 42. No 1. P. 125–139. DOI: 10.1080/01419870.2017.1406128.
57. *Zartman W.I.* Mediating conflicts of need, greed, and creed. Orbis, 2000. V. 44. No 2. P. 255–266. DOI: 10.1016/S0030-4387(00)00016-8.

REFERENCES

1. *Abrams D., Frings D., Randsley de Moura G.* Group identity and self-definition. The handbook of group research and practice. Thousand Oaks, CA: Sage Publications, 2005. P. 329–350. DOI: 10.4135/9781412990165.
2. *Ahn von M., Lupton R., Greenwood C., Wiggins D.* Languages, ethnicity, and education in London. London: Institute of Education, University of London. Department of Quantitative Social Studies. Working Paper, 2010. No 10−12. Web resource: https://www.researchgate.net/publication/46463035_Languages_Ethnicity_and_Education_in_London (accessed 18.03.2020).
3. *Allport G*. The nature of prejudices. Cambridge, MA: Addison Wesley, 1954. 576 p.
4. *Al Ramiah A., Miles H., Schmid K.* Social identity and intergroup conflict. Psychological Studies, 2011. V. 56. No 1. P. 44–52. DOI: 10.1007/s12646-011-0075-0.
5. *Andersen H.Sk*. Ethnic spatial segregation in european cities. Routledge, 2019. 240 p.
6. *Barry B.* Culture and equality. An egalitarian critique of multiculturalism. Cambridge, MA: Harvard University Press, 2001. 399 p.
7. *Billiet J., Meuleman B., Dewitte H*. The relation between ethnic threat and economic insecurity in times of economic crisis: analysis of European Social Survey data. Migration Studies, 2014. V. 2. No 1. P. 1–27. DOI: 10.1093/migration/mnu023.
8. *Binder J., Zagefka H., Brown R., Funke F*. Does contact reduce prejudice or does prejudice reduce contact? A longitudinal test of the contact hypothesis among majority and minority groups in three european countries. Journal of Personality and Social Psychology, 2009. V. 96. No 4. P. 843–856. DOI: 10.1037/a0013470.
9. *Blumer H*. Race prejudice as a sense of group position. Pacific Sociological Review, 1958. No 1. P. 3–7.
10. *Bobo L*. Group conflict, prejudice, and the paradox of contemporary racial attitudes. Eliminating Racism: Profiles in Controversy. New York: Plenum Press, 1988. P. 85–114.
11. *Bogardus E.S.* Social distance. Los Angeles, CA: University of Southern California Press, 1959. 104 p.

12. *Boltanski L., Chiapello E.* The new spirit of capitalism. Moscow: New Literary Review, 2011. 976 p. (in Russian).
13. *Brubaker R.* Ethnicity without groups. Moscow: Publishing House of the HSE, 2012. 408 p. (in Russian).
14. *Castles S.* Migration and minorities in Europe. Perspectives for the 1990s: Eleven hypotheses. Racism and Migration in Western Europe. Oxford: BERG, 1993. P. 17–34.
15. *Collier P.* Exodus: How migration changes our world. Moscow: Gaidar Institute Press, 2016. 384 p. (in Russian).
16. *Drobizheva L.M.* Civic identity as a condition for weakening ethnic negative stereotype. World of Russia. Sociology. Ethnology, 2017. V. 26. No 1. P. 7–31 (in Russian).
17. *Foner N., Duyvendak J.W., Kasinitz Ph.* Introduction: super-diversity in everyday life. Ethnic and Racial Studies. Spatial Issue: super-diversity in everyday life, 2019. V. 42. No 1. P. 1–16. DOI: 10.1080/01419870.2017.1406969.
18. *Forbes H.D.* Ethnic conflict and the contact hypothesis. Psychological dimensions to war and peace. The psychology of ethnic and cultural conflict. Westport, Connecticut: Praeger Publishers/Greenwood Publishing Group, 2004. P. 69–88.
19. *Glaser J.* Social context and inter-group political attitudes: Experiments in group conflict theory. British Journal of Political Science, 2003. V. 33. No 4. P. 607−620.
20. *Gudkov L.D.* Negative identity. The articles: 1997−2002. Moscow: New Literary Review, 2004. 816 p. (in Russian).
21. *Hewstone M., Lolliot S., Swart H., Myers E., Voci A., Al Ramiah A., Cairns E.* Intergroup contact and intergroup conflict. Peace and Conflict: Journal of Peace Psychology, 2014. V. 20. No 1. P. 39–53. DOI:10.1037/a0035582.
22. *Hogg M., Abrams D.* Social identifications: A social psychology of intergroup relations and group processes. London: Routledge, 1988. 288 p.
23. *Hogg M.A., Terry D., White K.M.* A tale of two theories: A critical comparison of identity theory with social identity theory. Social Psychology Quarterly, 1995. V. 58. No 4. P. 255–269. DOI:10.2307/2787127.
24. *Jakobson G., Buford J., Lewis L.* Situation management: Basic concepts and approaches. Information Fusion and Geographic Information Systems. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. P. 18–33.
25. *Jargowsky P.A.* The architecture of segregation: Civil unrest, the concentration of poverty, and public policy. The Century Foundation. Iss. Brief, 2015. Web resource: https://community-wealth.org/sites/clone.community-wealth.org/files/downloads/report-jargowsky.pdf (accessed 18.03.2020).
26. *Joseph G.* From Ferguson to Charlotte, why police protests turn into riots. CityLab, September 2016. Web resource: https://www.citylab.com/equity/2016/09/from-ferguson-to-charlotte-why-police-protests-turn-into-riots/500981/ (accessed 18.03.2020).
27. *Luhmann N.* Limits of steering. Theory, Culture & Society, 1997. V. 14. No 1. P. 41–57. DOI: 10.1177/026327697014001003.
28. *Meuleman B.* Perceived economic threat and anti-immigration attitudes: Effects of immigrant group size and economic conditions revsited. Cross-cultural analysis: methods and applications. London: Routledge, 2011. P. 281–310.
29. *Meuleman B., Davidov E., Billiet J.* Changing attitudes toward immigration in Europe, 2002–2007: A dynamic group conflict theory approach. Social Science Research, 2009. V. 38. No 2. P. 352–365. DOI: 10.1016/j.ssresearch.2008.09.006.
30. Migrations and cities of the world: New partnerships for managing mobile processes. Global Migration Report. Moscow: IOM, 2016. 250 p. (in Russian).
31. *Mukomel V.I.* Xenophobia: ethnophobia and migrant phobia of the host population. Social factors of interethnic tension in Russia. Moscow: FISIS RAS, 2017. P. 146–196 (in Russian).

32. *Osgood Ch.E., May W.H., Miron M.S.* Cross-cultural universals of affective meaning. Urbana: University of Illinois Press, 1975. 520 p.
33. “Own” and “Alien”: tolerance, stereotypes, and rights. Moscow: Moscow Helsinki Group, 2016. 116 p. (in Russian).
34. *Parrillo V.N., Donoghue C.* Updating the bogardus social distance studies: A new national survey. The Social Science Journal, 2005. V. 42. No 2. P. 257–271.
35. *Putnam R.D.* “E pluribus unum”: Diversity and community in the twenty-first century. The 2006 Johan Skytte prize lecture. Scandinavian Political Studies, 2007. V. 30. No 2. P.137–174.
36. *Pettigrew T.F., Tropp L.R.* How does intergroup contact reduce prejudice? Meta-analytic tests of three mediators. European Journal of Social Psychology, 2008. No 38. P. 922–934. DOI:10.1002/ejsp.504.
37. *Pettigrew T.F., Tropp L.R.* When groups meet: The dynamics of intergroup contact. Hove, East Sussex, UK: Psychology Press, 2011. 320 p.
38. *Price M., Benton-Short L.* Migration to the metropolis: the rise of immigrant gateway cities. NY: Syracuse University Press, 2008. 424 p.
39. *Quillian L.* Prejudice as a response to perceived group threat: Population composition and anti-immigrant and racial prejudice in Europe. American Sociological Review, 1995. V. 60. No 4. P. 586–611. DOI: 10.2307/2096296.
40. *Ruble B.* Urban diversity in the era of large-scale migrations. Bulletin of the Kennan Institute in Russia, 2012. No 21. P. 36–44 (in Russian).
41. *Rustenbach E.* Sources of negative attitudes toward immigrants in Europe. A mullti-level analysis. International Migration Review, 2010. V. 44. No 1. P. 53−77. DOI: 10.1111/j.1747-7379.2009.00798.x.
42. *Schneider C.* Police power and race riots. Politics & Society, 2008. V. 36. No 1. P. 133–159. DOI: 10.1177/0032329208314802.
43. *Schneider J.* Demographic “megatrends” and their implications. Siirtolaisuus. Migration, 2018. No 3. P. 26–31.
44. *Shnirelman V.A.* “Cleaners of Moscow streets”: skinheads, mass-media and public opinion. Moscow: Academy, 2010. 2nd edition. 164 p. (in Russian).
45. *Svendsen B.A., Quist P.* Multilingual Scandinavia: New linguistic practices. Introduction. Multilingual Urban Scandinavia. Bristol, UK: Multilingual Matters, 2010. P. xiii–xxiii. DOI: https://doi.org/10.21832/9781847693143.
46. *Tajfel H., Turner J.C.* An integrative theory of intergroup conflict. The Social Psychology of Intergroup Relations. Monterey: Brooks-Cole, 1979. P. 33–47.
47. *Tribalat M.* Assimilation: la fin du modèle français. Paris: Toucan, 2013. 352 p. (in French).
48. *Tropp L.R.* Understanding and responding to intergroup conflict: Toward an integrated analysis. The Oxford Handbook of Intergroup Conflict. Oxford: Oxford University Press, 2012. P. 3–10.
49. *Tropp L.R., Pettigrew T.F.* Relationships between intergroup contact and prejudice among minority and majority status groups. Psychological Science, 2005. V. 16. P. 951−957. DOI: 10.1111/j.1467-9280.2005.01643.x.
50. *Tsapenko I.P.* The search for new approaches to the sociocultural integration of migrants. Demographic Review, 2018.No 6. P. 125−149. DOI: 10.17323/demreview.v5i4.8665 (in Russian).
51. *Varshaver E.A., Rocheva A.L., Ivanova N.S.* Integration of migrants at the local level: results of a scientific and practical project. Sociological Research, 2017. No 5. P. 110–117 (in Russian).
52. *Vendina O.I., Pain E.A.* Multiethnic city. Moscow: Sector, 2018. 180 p. (in Russian).
53. *Verkhovsky A.* Dynamics of hate crimes and the activities of ultra-right-wing groups and movements in Russia in the 2010s. The paths to peace and security. Problems of terrorism, violent extremism and radicalization (Russian and American approaches). Special issue. Moscow: IMEMO RAS, 2017. P. 116–124 (in Russian).

54. *Vertovec S.* Super-diversity and its implications. Ethnic and Racial Studies, 2007. V. 30. No 6. P. 1024–1054. DOI:10.1080/01419870701599465.
55. *Vertovec S*. Talking around super-diversity. Ethnic and Racial Studies, 2019. V. 42. No 1. P. 125–139. DOI: 10.1080/01419870.2017.1406128.
56. *Vishnevsky A.G., Denisenko M.B.* Migration in a global context. Report at the XVII International Scientific Conference on the Development of Economics and Society. Moscow: National Research University HSE, 2016. 17 p. (in Russian).
57. *Zartman W.I.* Mediating conflicts of need, greed, and creed. Orbis, 2000. V. 44. No 2. P. 255–266. DOI: 10.1016/S0030-4387(00)00016-8.

УДК: 912: 004.9 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-41-53**

Н.Г. Ивлиева[1], В.Ф. Манухов[2], А.В. Алферина[3]

КАРТОГРАФО-ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЧВЕННЫХ И АГРОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ОТДЕЛЬНОГО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ)

АННОТАЦИЯ

Изучение почв имеет немаловажное значение для сельскохозяйственных предприятий, т.к. основная роль в обеспечении продуктивности земледелия принадлежит им. В настоящее время активно используют геоинформационно-картографическое обеспечение почвенного и геохимического исследования территории. Целью данной работы являлось создание картографической базы данных почв для отдельного сельскохозяйственного предприятия. Актуальность разработки картографической базы данных (КБД) почв земель отдельного сельскохозяйственного предприятия связана с необходимостью комплексного учёта всех агрохимических и экологических факторов, важных для устойчивой продуктивности земледелия, мониторинга плодородия почв земель хозяйства.

Основным источником тематических данных служили материалы агрохимического обследования почв сельскохозяйственных угодий. Кроме того, использовались планы землепользования и размещения сельскохозяйственных культур хозяйства, топографическая карта и спутниковые снимки. ГИС-средой служил программный продукт ArcGIS 10. Он предоставляет возможность работы с базами геоданных, а также набор инструментов для автоматизированного картографирования, проведения пространственного анализа и математико-картографического моделирования.

В результате выполнения работы была спроектирована структура КБД, сформирован набор пространственных данных ГИС, разработано содержание, компоновка и оформление тематических карт отдельного сельскохозяйственного предприятия. Упорядоченная структура КБД позволяет легко и просто работать с данными, проводить необходимый пространственный анализ.

Использование современных методов геоинформационного и математико-картографического моделирования позволило создать более подробное геоинформационно-картографическое обеспечение исследования почв территории. На основе современных ГИС-технологий в целях улучшения восприятия и анализа информации при построении картографических моделей применялись бесступенчатые шкалы, строились условные поверхности и т.д. Для создания типологических синтетических характеристик и дальнейшего отображения их на карте использовались методы многомерного математико-статистического анализа. Построена типологическая почвенно-геохимическая карта, на которой показана дифференциация изучаемых обрабатываемых участков по комплексу агрохимических показателей. Для целей дальнейших исследований была построена подробная цифровая модель рельефа изучаемой территории.

Созданная картографическая база данных уже используется при проведении исследований по оптимизации управления земельными ресурсами с применением ГИС-технологий, агроэкологической оценке пахотных земель, рациональному использованию сельских территорий и др.

---

[1] Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва, ул. Большевистская, д. 68, Саранск, 430005, Россия; *e-mail*: **gkg_mrsu@mail.ru**
[2] Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва, ул. Большевистская, д. 68, Саранск, 430005, Россия; *e-mail*: **gkg_mrsu@mail.ru**
[3] Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва, ул. Большевистская, д. 68, Саранск, 430005, Россия; *e-mail*: **alferina.96@mail.ru**

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГИС-технологии, картографическая база данных, почва, агрохимические показатели

Natalia G. Ivlieva[1], **Vladimir F. Manukhov**[2], **Anastasia V. Alferina**[3]

CARTOGRAPHY-GEOINFORMATION SUPPORT OF SOIL AND AGROCHEMICAL RESEARCHES (ON THE EXAMPLE OF A SEPARATE AGRICULTURAL ENTERPRISE)

ABSTRACT

The study of land soils is of no small importance for agricultural enterprises, since the main role in ensuring the productivity of agriculture belongs to the soil. Currently, they are actively using geoinformation-cartographic support of soil and geochemical research of the territory. The aim of this work was to create a cartographic database of soils for a separate agricultural enterprise. The relevance of the development of a cartographic database (CDB) of the soils of the lands of an individual agricultural enterprise is associated with the need to comprehensively take into account all agrochemical and environmental factors important for sustainable agricultural productivity, and monitor soil fertility of the farm.

The main source of thematic data was materials from an agrochemical survey of agricultural soils. In addition, land use and farm location plans, a topographic map, and satellite imagery were used. The GIS environment was the ArcGIS 10 software product. It provides the ability to work with geodatabases, as well as a set of tools for automated mapping, spatial analysis, and mathematical-cartographic modeling.

As a result of the work, the CDB structure was designed, a set of spatial GIS data was generated, the content, layout and design of thematic maps of a separate agricultural enterprise were developed. The ordered structure of the CDB makes it easy and simple to work with data and carry out the necessary spatial analysis.

The use of modern methods of geographic information and mathematical cartographic modeling allowed us to create a more detailed geographic information and cartographic support for the study of soil in the territory. On the basis of modern GIS technologies, in order to improve the perception and analysis of information when constructing cartographic models, stepless scales were used, conditional surfaces were built, etc. To create typological synthetic characteristics and further display them on a map, methods of multivariate mathematical-statistical analysis were used. A typological soil-geochemical map is constructed, which shows the differentiation of the studied cultivated areas according to a complex of agrochemical indicators. For the purposes of further research, a detailed digital relief model of the study area was built.

The cartographic database is already used in research on optimizing land management using GIS technologies, agroecological assessment of arable land, rational use of rural territories, etc.

KEYWORDS: GIS-technologies, cartographic database, soil, agrochemical indicators

---

[1] N.P. Ogarev National Research Mordovia State University, Bolshevistskaya str., 68, 4300005, Saransk, Russia; *e-mail*: **gkg_mrsu@mail.ru**
[2] N.P. Ogarev National Research Mordovia State University, Bolshevistskaya str., 68, 4300005, Saransk, Russia; *e-mail*: **gkg_mrsu@mail.ru**
[3] N.P. Ogarev National Research Mordovia State University, Bolshevistskaya str., 68, 4300005, Saransk, Russia; *e-mail*: **alferina.96@mail.ru**

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность разработки картографической базы данных почв земель отдельного сельскохозяйственного предприятия связана с необходимостью комплексного учёта всех агрохимических и экологических факторов, важных для устойчивой продуктивности земледелия, мониторинга плодородия почв земель хозяйства. Тематическое картографирование по материалам почвенных и агрохимических полевых обследований играет важную роль для дальнейших исследований. В них активно используются геоинформационные технологии. Программное обеспечение ГИС предоставляет возможность выполнения автоматизированного создания картографических произведений, проведения пространственного анализа и математико-картографического моделирования.

Современная картография претерпела значительные модификации. Самое главное проявление изменений заключается в том, что раньше карты рассматривались только как графические модели (изображения, иллюстрации), сейчас карты — это ещё и данные. В настоящее время развивается электронное тематическое картографирование, базирующееся на создании объектно-ориентированных тематических баз пространственных данных, связанных в первую очередь с назначением карты, а не масштабом картографирования [*Лурье,* 2016].

Почвенное и почвенно-геохимическое картографирование является достаточно развитой областью, оно проводится как для целей оптимизации управления почвенными ресурсами для устойчивого развития сельского хозяйства, так и для географических и геоэкологических исследований.

В настоящее время методы геоинформационного моделирования и обработки данных дистанционного зондирования Земли находят широкое применение в сельском хозяйстве. Целью данного исследования явилось создание картографической базы данных для почвенного и геохимического исследований почв сельскохозяйственного предприятия ООО «Агросоюз — Красное Сельцо» Рузаевского района Республики Мордовия. Оно расположено в лесостепной ландшафтной зоне с умеренно-континентальным климатом, характеризующимся сравнительно холодной зимой и умеренно жарким летом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве исходных материалов использовались планы землепользования и размещения сельскохозяйственных культур. Для уточнения границ полей применялись спутниковые снимки и публичная кадастровая карта. Дополнительные пространственные данные сняты с топографической карты масштаба 1: 25 000. Основным источником тематических данных послужили материалы агрохимического обследования почв сельскохозяйственных угодий ООО «Агросоюз — Красное сельцо». В паспортной ведомости сельскохозяйственных угодий приводятся средневзвешенные данные за 2014 г. по содержанию элементов питания по каждому отдельно обрабатываемому участку, а также агрохимическая характеристика почв по видам угодий. Также руководством хозяйства были предоставлены сведения об урожайности зерновых культур и площади посевных участков за 2015–2017 гг. Площадь сельскохозяйственных угодий хозяйства — 4 266 га.

В работе применялись следующие методы исследования — геоинформационный, многомерный математико-статистический анализ, математико-картографическое моделирование, приёмы карто- и морфометрии.

ГИС-средой служил программный продукт ArcGIS 10. Он предоставляет возможность работы с базами геоданных, а также набор инструментов для автоматизированного картографирования. ГИС ArcGIS можно использовать и для обработки данных дистанционного зондирования Земли. В ArcGIS был сформирован необходимый набор пространственных данных. Составление тематических карт осуществлялось на основе предоставляемых программным обеспечением возможностей картографической визуализации атрибутивных данных. Методы картографической визуализации геопространственных данных

подробно рассмотрены в работе [*Kraak, Ormeling,* 2010]. ГИС-пакеты программ предоставляют некоторый универсальный набор функций для построения тематических карт. При проектировании и построении картографического изображения средствами ГИС основное внимание должно быть сосредоточено не на выразительном красочном оформлении карты, а на согласовании содержательного аспекта картографируемого показателя с его графическим отображением с обязательной увязкой с тем или иным способом картографического изображения и возможностями его реализации в ГИС-пакете [*Манухов, Ивлиева,* 2015]. От этого зависит практическая ценность создаваемой карты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате выполнения работы была сформирована КБД почв обследуемого хозяйства, в которую вошли 4 блока [*Алферина, Ивлиева,* 2018].

Первый блок включает базовые векторные карты: общегеографическую, сельскохозяйственные угодья (рис. 1а), картосхему участков полей севооборотов.

Во второй блок входят карты, характеризующие почвы и их геохимические свойства. Типы почв земель хозяйства отображены способом качественного фона в соответствии со стандартной классификацией (рис. 1б). Для данной территории наиболее характерно сочетание выщелоченных и оподзоленных чернозёмов и комплекса серых лесных почв. В состав этого блока включена серия аналитических почвенно-геохимических карт, показывающих содержание отдельных химических веществ и элементов в почвах, составленных способом картограмм. Градации значений определялись в соответствии с принятыми классификациями. Например, по содержанию обменного калия почвы подразделялись на следующие группы: низкое (менее 80 мг/кг), среднее (81–120 мг/кг), повышенное (121–170 мг/кг), высокое (171–250 мг/кг), очень высокое (более 250 мг/кг). Для наглядного представления степени развития показателя на карте использовались цветовые шкалы с возрастающей насыщенностью тона. Были составлены карты кислотности почв, содержания в почвах обменного калия и подвижного фосфора, процентного содержания гумуса и др. Все аналитические карты имеют одинаковый масштаб и схожую компоновку. Их тематическая индивидуальность передана через оформление.

Третий блок составляют дополнительные данные: карты урожайности зерновых культур по отдельным годам, а также карты углов наклона и экспозиции склонов.

Прочие картографические материалы (план внутрихозяйственного землепользования, кадастровая карта, растровые копии топографической карты) и спутниковые снимки образуют четвёртый блок КБД. На рис. 2 показана часть структуры разработанной картографической базы данных, представленная непосредственно в ГИС-среде. Упорядоченная структура КБД позволяет легко и просто работать с данными, проводить необходимый пространственный анализ.

Созданная КБД уже используется при проведении исследований по оптимизации управления земельными ресурсами с применением ГИС-технологий, агроэкологической оценке пахотных земель, рациональному использованию сельских территорий и др. В целях обеспечения дальнейших почвенных и агрохимических исследований было решено дополнить разработанную КБД новыми картографическими изображениями, построенными различными методами геоинформационного картографирования и математико-картографического моделирования.

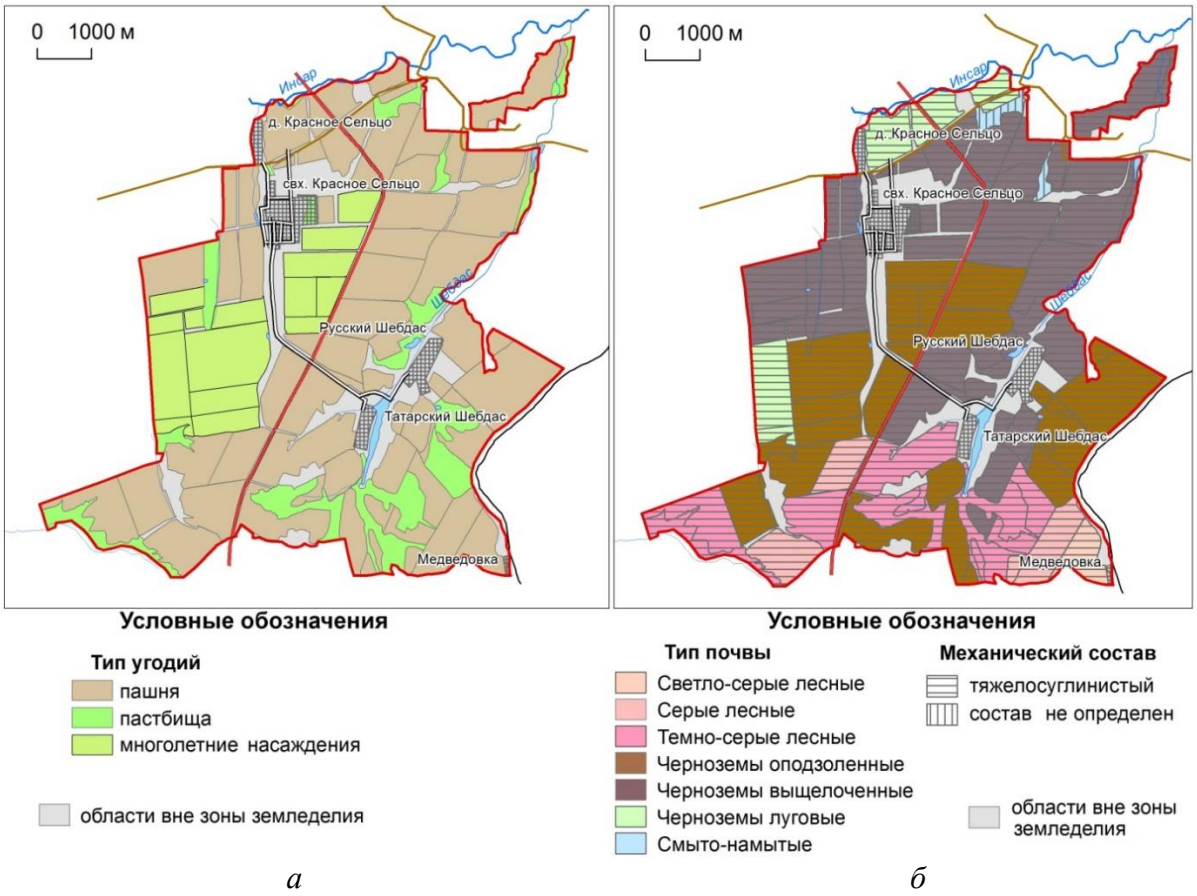
Созданные ранее тематические карты показывают осреднённые по каждому отдельно обрабатываемому участку значения показателей. В соответствии с действующим на тот момент ГОСТ 28168-89, при агрохимическом обследовании почв на пашне, улучшенных сенокосах и пастбищах смешанный образец составлялся из 20, в садах из 16 проб, взятых по осевой линии элементарного участка. Каждый почвенный образец характеризует участок пашни площадью 15 га. Построенные карты не показывают различий в интенсивности явлений внутри изучаемых территориальных единиц. Ступенчатая шкала скрывает и

неоднородность распространения явлений по участкам, попавшим в один класс. Общее количество исследованных участков — 94, поэтому имело смысл передать более подробную картину распределения значений показателей.

На основе современных ГИС-технологий в целях улучшения восприятия и анализа информации несложно видоизменять форму её показа: можно использовать непрерывные (бесступенчатые) шкалы, создавать трёхмерные блок-диаграммы, строить условные поверхности, анаморфированные изображения и т.д.

Методы геоинформационного моделирования позволяют строить картограммы в непрерывных шкалах, когда насыщенность цвета (интенсивность штриховки) ставится в точное соответствие величине картографируемого показателя. В целях получения такого картографического изображения в ГИС-пакете ArcGIS полигональный слой участков был преобразован в растровую форму. Используя тип «растяжка» визуализации растровых данных, мы построили картограммы, передающие распределение значений показателей в непрерывных шкалах (рис. 3).

Для построения условных поверхностей распределения содержания отдельных веществ и химических элементов в почвах использовалась интерполяция по точкам. Был осуществлён переход от полигонов (участков) к точкам; к точке центроида полигона и приурочивался смешанный образец проб почв на участке, что, по сути, отвечает методике полевого обследования. Затем, используя методы, встроенные в набор инструментов Spatial Analyst, проводили интерполяцию.



а *б*

Рис. 1. Характеристика исследуемой территории:
а) по видам сельскохозяйственных угодий; б) по типу и механическому составу почв
Fig. 1. Characteristics of study territory:
a) by type of agricultural land; b) by type and mechanical composition of soils

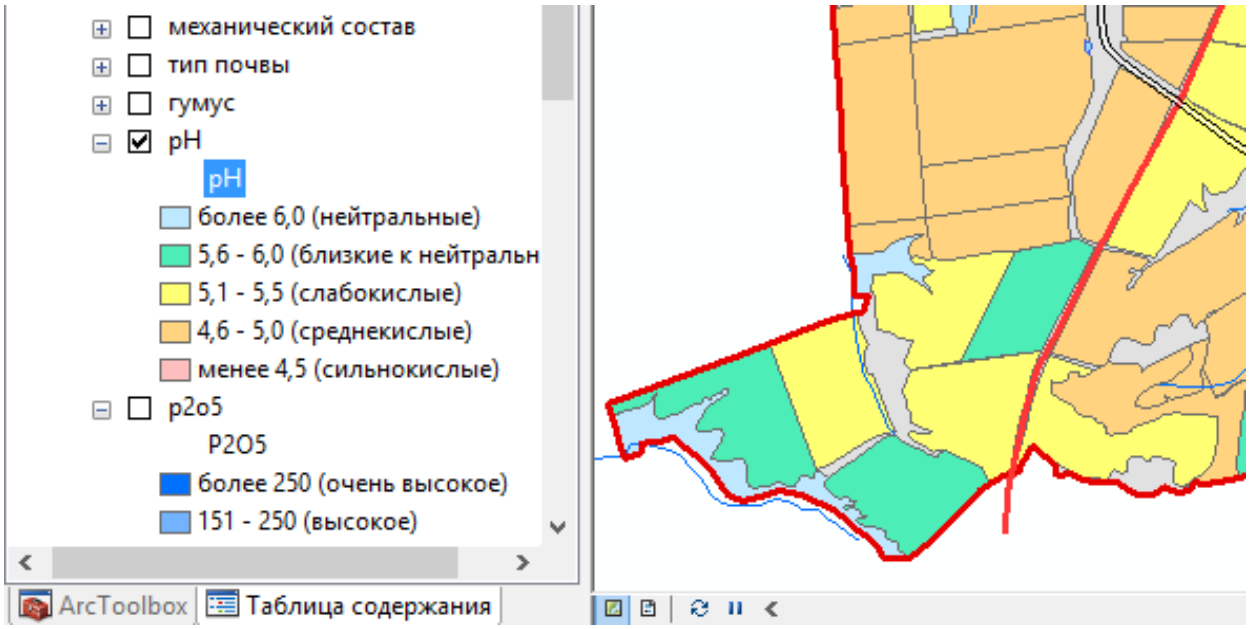


Рис. 2. Фрагмент структуры слоёв картографической базы данных в ГИС-пакете ArcGIS
Fig. 2. Fragment of structure of the cartographic database layers in the ArcGIS GIS package

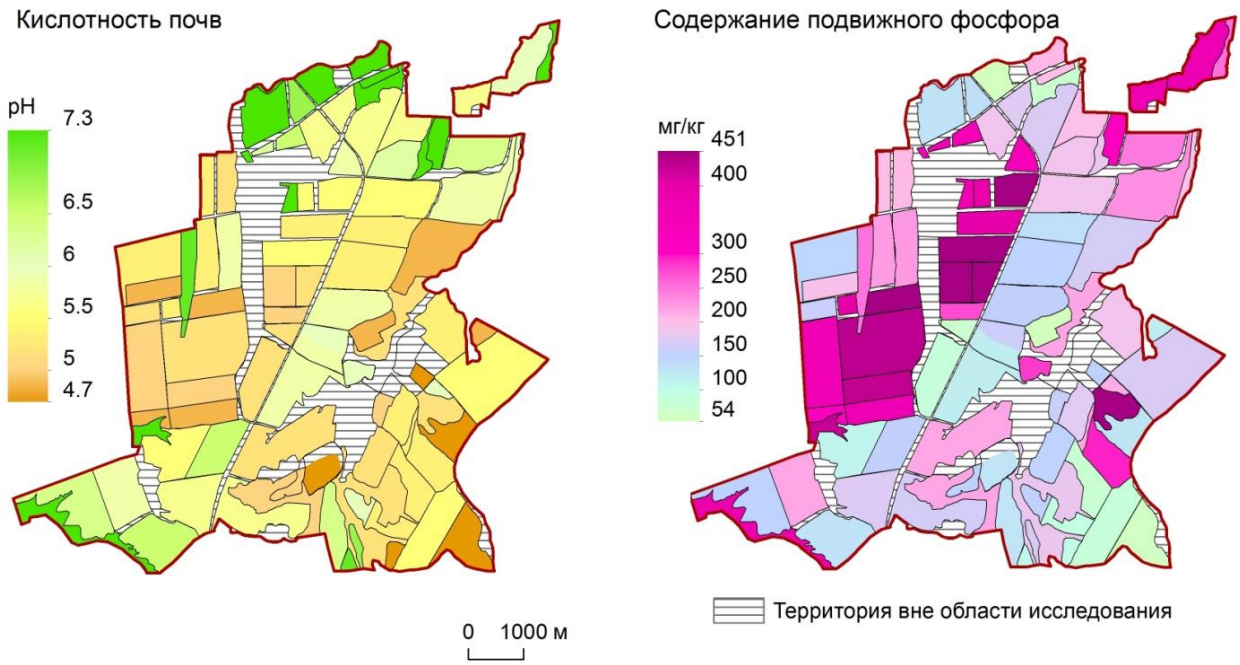


Рис. 3. Картограммы в бесступенчатой шкале
Fig. 3. Choropleth maps in stepless scale base

Построенные условные поверхности распределения содержания отдельных макро- и микроэлементов в почвах могут применяться для оценки взаимосвязей пространственных характеристик, например, урожайности зерновых и содержания того или иного элемента в почвах. Корреляционные модели взаимосвязей явлений несложно построить, пользуясь только встроенными в ГИС функциями. Как известно, коэффициент корреляции примерно равен косинусу угла α между направлениями градиентов двух сравниваемых

статистических поверхностей r = cos α. Углы между направлениями градиентов есть углы между направлениями экспозиций склонов условных поверхностей, вычисления которых реализованы практически в каждой растровой ГИС (или в пакете программ, создающих цифровые модели рельефа). В них также реализована возможность сложения, вычитания поверхностей и т.п. Поэтому, если уже построены цифровые модели поверхностей, то далее решение задачи не представляет трудности. Достаточно вычислить разность значений экспозиции двух сравниваемых поверхностей и найти косинус этой разности, т.е. угла между градиентами, как правило, выраженного в радианах.

Географический подход к изучению явлений предполагает их территориальную изменчивость и её изучение с помощью методов классификации. Для создания типологических синтетических характеристик и дальнейшего отображения их на карте использовались методы многомерного математико-статистического анализа.

В данной работе каждая территориальная единица (участок поля) характеризовалась набором из 13 исходных показателей:

X1 — кислотность (pH);
X2 — подвижный фосфор P_2O_5 (мг/кг);
X3 — обменный калий K_2O (мг/кг);
X4 — сера (мг/кг);
X5 — гумус (%);
X6 — гидролитическая кислотность Hr (мг · экв/100 г);
X7 — насыщенность основаниями V (%);
X8 — бор (мг/кг);
X9 — медь (мг/кг);
X10 — молибден (мг/кг);
X11 — цинк (мг/кг);
X12 — обменный кальций (мг · экв/100 г);
X13 — обменный магний (мг · экв/100 г).

Чтобы оценить степень влияния всего комплекса показателей, на их основе был реализован алгоритм компонентного анализа. Анализ матрицы нагрузок главных компонент на показатели (табл. 1) выявил, что первая компонента обобщает 5 показателей: pH, гидролитическую кислотность, насыщенность основаниями и в значительной степени содержание обменного кальция и органических веществ. На неё приходится максимум дисперсии (более 26 %). Вторая компонента ассоциируется с содержанием микроэлементов в почве: цинка, бора, в некоторой степени молибдена, а третья — с содержанием обменного магния и серы. Заметим, что четвёртая компонента характеризует обеспеченность почв важными элементами питания растений: подвижным фосфором и обменным калием. В совокупности 4 компоненты охватывают в сумме более 68 % дисперсии, а уже восемь первых компонент — более 92 % (табл. 2). Поэтому можно утверждать, что 8 главных компонент в достаточной мере характеризуют весь набор показателей и могут использоваться в дальнейших расчётах вместо исходной системы показателей.

Пространственное варьирование значений первых четырёх главных компонент (Z1, Z2, Z3, Z4) на занятой пашней территории ООО «Агросоюз — Красное сельцо» изображено на рис. 4, красные тона показывают их высокие значения, зелёные или синие — низкие.

Использование первых 8 ортогонализированных характеристик вместо 13 исходных показателей в определённой мере исключает случайную составляющую вариации исходных показателей и приводит их систему к ортогональному виду. Второе положение является необходимым для возможности использования многомерных математических алгоритмов, базирующихся на использовании евклидовых расстояний и удобных для целей дифференциации всех полей хозяйства на выделы (кластеры), включающие участки с достаточно однородными величинами исходных показателей [*Тикунов*, 1997].

Табл. 1. Матрица нагрузок главных компонент
Table 1. Principal component loadings matrix

Исходные показатели	Нагрузка главных компонент							
	1	2	3	4	5	6	7	8
pH	-0,849	0,056	0,086	-0,072	-0,275	0,053	-0,241	0,199
P_2O_5	-0,187	-0,387	0,015	-0,778	-0,051	0,023	0,232	-0,188
K_2O	0,041	-0,453	-0,020	-0,742	0,140	-0,089	-0,275	0,128
Сера	-0,232	0,482	-0,649	-0,193	0,129	0,145	0,244	-0,295
Гумус	-0,626	-0,054	-0,373	0,266	0,079	-0,415	-0,277	-0,241
Hr	0,802	-0,095	-0,497	-0,023	-0,152	-0,121	-0,180	0,008
V	-0,904	-0,013	0,267	0,095	0,152	0,125	0,199	-0,021
B	-0,443	0,698	-0,151	-0,223	0,132	0,262	-0,122	0,161
Cu	-0,142	0,222	0,001	-0,098	-0,930	0,082	-0,069	-0,131
Mo	0,162	0,610	0,055	-0,166	-0,142	-0,535	0,429	0,235
Zn	0,171	0,821	-0,132	-0,215	0,171	0,018	-0,278	0,070
Ca	-0,688	-0,312	-0,357	-0,014	-0,007	-0,385	0,028	0,144
Mg	-0,049	-0,446	-0,694	0,169	-0,106	0,328	0,208	0,305

Табл. 2. Собственные значения и вклад главных компонент в суммарную дисперсию
Table 2. Eigenvalues and the contribution of the principal components to the total variance

Собственные значения	Вклад в суммарную дисперсию, %	Накопленная дисперсия, %
3,411	26,24	26,2
2,481	19,08	45,3
1,539	11,84	57,2
1,440	11,08	68,2
1,111	8,54	76,8
0,853	6,56	83,3
0,721	5,54	88,9
0,454	3,50	92,4

Для дифференциации изучаемой территории по комплексу агрохимических показателей, ортогонализированному с помощью метода главных компонент, применялся кластерный анализ — метод «k средних». Было проведено многовариантное математико-картографическое моделирование. Картографическое представление результатов одного из вариантов изображено на рис. 5, где участки полей поделены на 5 кластеров с достаточно однородными значениями исходных данных. Легендой для данной карты служат средние значения исходных показателей, рассчитанные по каждому кластеру, представленные в виде профильных диаграмм. При этом они, чтобы были соизмеримы и сопоставимы, нормированы по средним значениям соответствующих характеристик по всему хозяйству. Тем самым значения более единицы выше среднего по хозяйству, а менее единицы — ниже среднего. Средние значения агрохимических показателей по кластерам даны в табл. 3. Таким образом, на типологической почвенно-геохимической карте показана дифференциация изучаемых обрабатываемых участков по комплексу агрохимических показателей. Диаграммы дают нужную информацию для подбора вида вносимых удобрений и их количества.

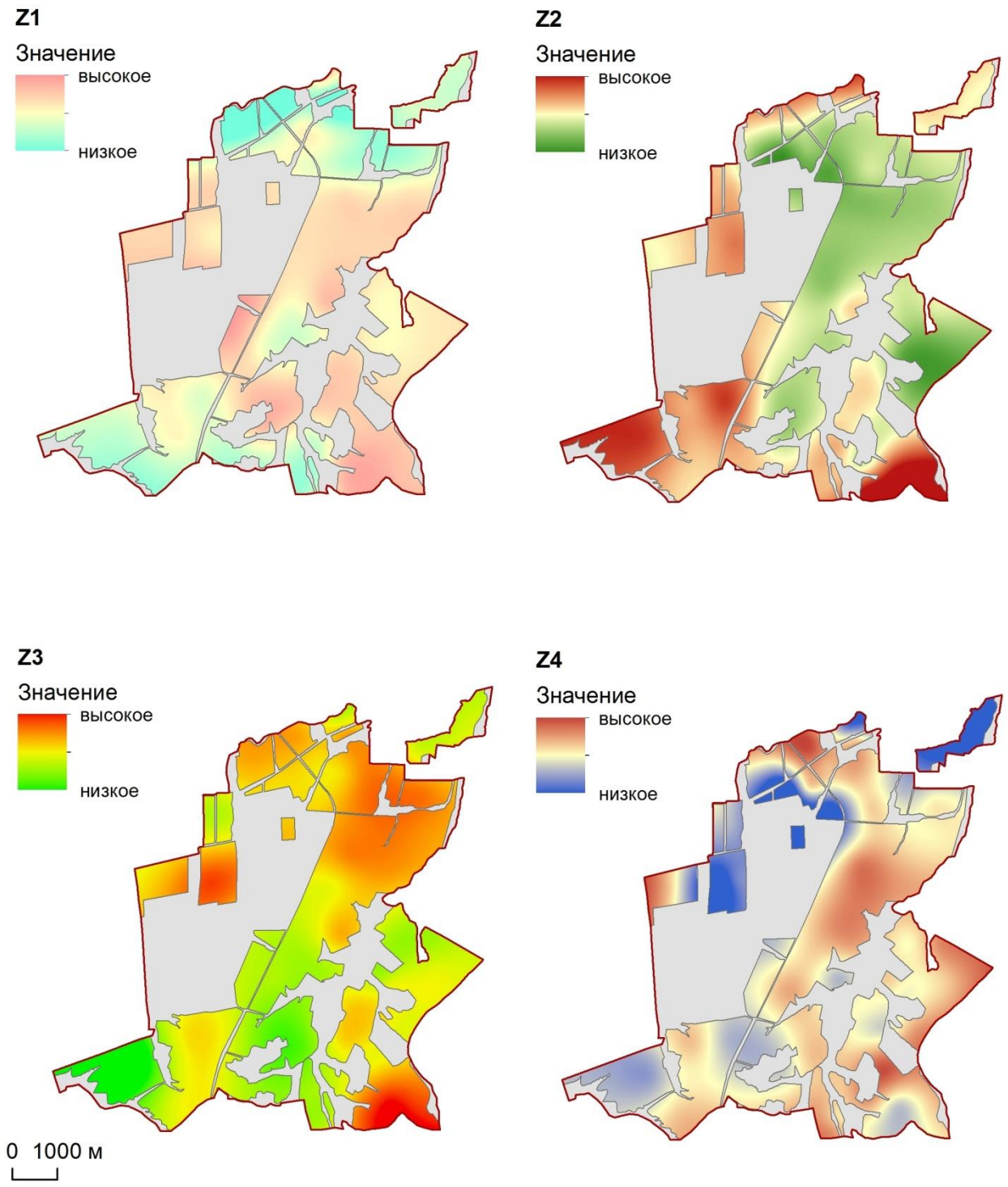


Рис. 4. Варьирование главных компонент на исследуемой территории
Fig. 4. Variation of the principal component scores in the study area

Следовательно, методы математико-картографического моделирования позволяют совместно исследовать целый набор показателей и на их основе произвести группировку отдельных почвенных участков в выделы (кластеры) примерно с одинаковыми агрохимическими условиями, требующими внесения тех или иных доз и сочетаний удобрений.

Одним из важнейших факторов развития природных процессов и их влияния на агроландшафты, определяющим локальные особенности распределения воды, солнечной радиации, энергии склоновых процессов, служит рельеф территории [*Глотов,* 2013]. Поэтому

для целей дальнейших исследований была построена подробная цифровая модель рельефа изучаемой территории (рис. 6). С целью создания гидрологически корректной модели рельефа применялась интерполяция с учётом векторных данных о водотоках [*Hutchinson*, 1989], алгоритм которой реализован в ArcGIS. Гидрографическая сеть на исследуемой территории представлена мелкими ручьями, протекающими по днищам балок и оврагов, впадающими в р. Инсар и её приток руч. Шебдас. Территория сельскохозяйственного предприятия располагается на равнинных водоразделах и пологих склонах различных экспозиций; при этом более возвышенные участки склонов занимают серые лесные почвы и оподзоленные чернозёмы, а нижние части — выщелоченные чернозёмы и лугово-чернозёмные почвы.

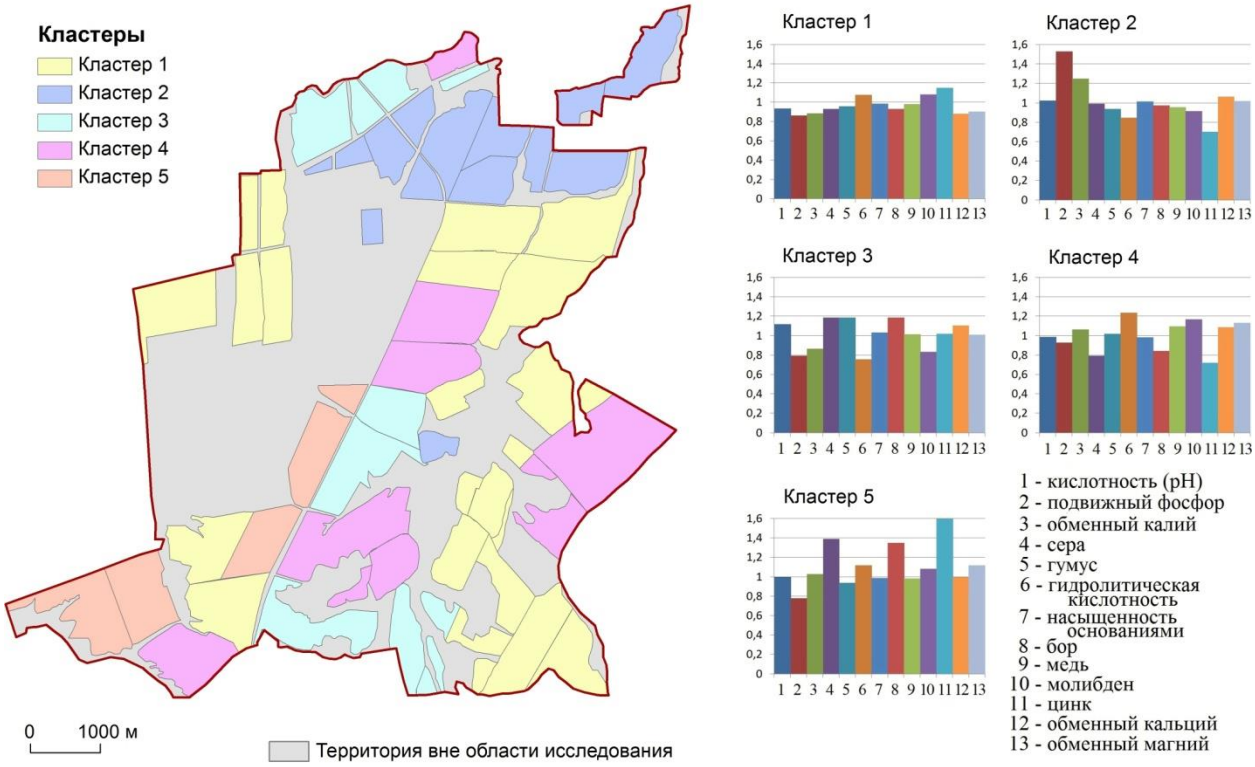


Рис. 5. Дифференциация участков по комплексу агрохимических показателей
Fig. 5. Differentiation of cultivated areas by set of agrochemical indicators

На основе ЦМР с использованием стандартных функций модуля Spatial Analyst ГИС-пакета ArcGIS строились производные характеристики — углы наклона, экспозиция склонов, кривизна поверхности. Экспозиция определяет направление потока. Уклон характеризует скорость потока вниз по склону. Значение профильной кривизны указывает на ускорение или замедление потока, что влияет на эрозию. Кроме того, на основе растра суммарного стока и углов наклона был рассчитан топографический индекс влажности (Topographic Wetness Index, TWI) [*Gessler et al.*, 1995], позволяющий оценить особенности эрозионных процессов с учётом гидрологических ресурсов для их развития (чем больше удельная водосборная площадь, тем выше вероятность развития эрозии [*Глотов*, 2013]), выделить участки потенциального переувлажнения. Следует заметить, что существуют различные алгоритмы вычисления площади водосбора по цифровым моделям рельефа, например, на основе построения линий тока [*Кошель, Энтин*, 2017].

Использование геоморфометрического анализа предоставляет возможность рассчитать количественные показатели плоскостной и линейной эрозии.

Табл. 3. Средние значения агрохимических показателей для выделенных кластеров
Table 3. The average values of agrochemical indicators for the selected clusters

Показатели	Номера кластеров					Общее среднее
	1	2	3	4	5	
Кислотность (pH)	5,04	5,51	6,02	5,3	5,38	5,38
Подвижный фосфор (мг/кг)	134	238,4	123,4	144,6	121	155,7
Обменный калий (мг/кг)	163,7	231,9	160,3	196,9	190,4	185,3
Сера (мг/кг)	2,37	2,53	3,02	2,02	3,54	2,55
Гумус (%)	7,14	7	8,85	7,62	7	7,47
Гидролитическая кислотность (мг·экв/100 г)	3,94	3,1	2,77	4,53	4,1	3,66
Насыщенность основаниями (%)	90,44	93,16	94,51	89,91	90,5	91,66
Бор (мг/кг)	1,06	1,11	1,35	0,96	1,54	1,14
Медь (мг/кг)	5,62	5,47	5,8	6,26	5,62	5,72
Молибден (мг/кг)	0,13	0,11	0,1	0,14	0,13	0,12
Цинк (мг/кг)	0,62	0,38	0,55	0,39	0,88	0,54
Обменный кальций (мг·экв/100 г)	17,66	21,4	22,14	21,79	20	20,08
Обменный магний (мг·экв/100 г)	3,92	4,43	4,39	4,92	4,86	4,34

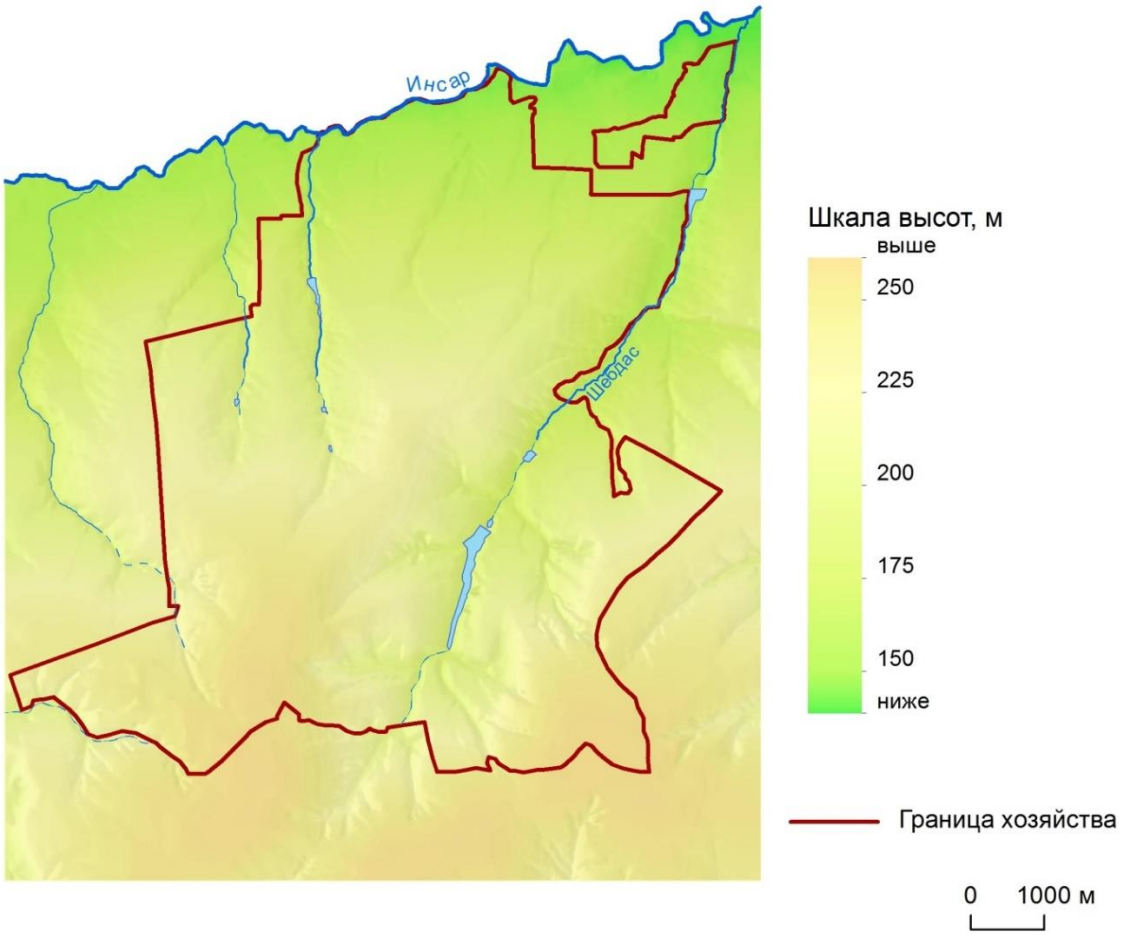


Рис. 6. Изображение рельефа местности
Fig. 6. Terrain image

Методами геоинформационного анализа и моделирования в ГИС-среде ArcGIS можно выполнить агроэкологическую оценку земель. Схема проведения такого оценивания на примере отдельного фермерского хозяйства при проектировании адаптивно-ландшафтных систем земледелия, например, дана в работе [*Смирнова и др.*, 2011].

ВЫВОДЫ

В результате проведённой работы создано картографо-геоинформационное обеспечение почвенных и агрохимических исследований территории сельскохозяйственного предприятия ООО «Агросоюз — Красное Сельцо», помогающее специалистам получить оперативный доступ к необходимой информации. Но оно не является полностью и окончательно сформированным. Возможно её наполнение тематическими картами, создаваемыми на основе новых данных методами геоинформационного картографирования и пространственного анализа и моделирования. КБД делает возможным осуществление комплексного учёта всех агрохимических и экологических факторов при мониторинге земель хозяйства.

Обобщая выполненные исследования, можно сделать вывод, что применение геоинформационного и математико-картографического моделирования для создания базы данных электронных карт почв территории отдельного сельскохозяйственного предприятия является вполне эффективным. Составленные карты наглядно показывают пространственное варьирование значений различных характеристик почв. Классификация участков полей на кластеры, включающие участки с достаточно однородными величинами агрохимических показателей, с представлением полученных результатов на карте может быть использована в практике работы агрономов, а также в дальнейших исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алферина А.В., Ивлиева Н.Г.* О создании картографической базы данных почв отдельного сельскохозяйственного предприятия. Структура, динамика и функционирование природно-социально-производственных систем: наука и практика. Межвузовский сборник научных трудов. Саранск: Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва, 2018. С. 82–86.

2. *Глотов А.А.* Применение данных о рельефе для эффективного использования сельскохозяйственных земель. Геопрофи, 2013. № 4. С. 20–22.

3. *Кошель С.М., Энтин А.Л.* Вычисление площади водосбора по цифровым моделям рельефа на основе построения линий тока. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2017. № 3. С. 42–50.

4. *Лурье И. К.* Университетская школа географической картографии: традиции и инновации. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка, 2016. Т. 60. № 5. С. 37–41.

5. *Манухов В.Ф., Ивлиева Н.Г.* О построении картографических изображений средствами ГИС-пакетов. Педагогическая информатика, 2015. № 1. С. 55–63.

6. *Смирнова Л.Г., Нарожняя А.Г., Кривоконь Ю.Л., Петрякова А.А.* Применение геоинформационных систем для агроэкогической оценки земель при проектировании адаптивно-ландшафтных систем земледелия. Достижения науки и техники АПК, 2011. № 11. С. 11–14.

7. *Тикунов В.С.* Моделирование в картографии. М.: Издательство Московского университета, 1997. 405 с.

8. *Gessler P.E., Moore I.D., McKenzie N.J., Ryan P.J.* Soil-landscape modeling and spatial prediction of soil attributes. International Journal of GIS, 1995. No 9 (4). P. 421–432.

9. *Hutchinson M.F.* A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. Journal of Hydrology, 1989. V. 106. No 3–4. P. 211–232.

10. *Kraak M.-J., Ormeling F.* Cartography: visualization of geospatial data. 3rd edition. Harlow, England: Pearson Education Limited, 2010. 249 p.

REFERENCES

1. *Alferina A.V., Ivlieva N.G.* On creation of the cartographic database of soils of a separate agricultural organization. The structure, dynamics and functioning of natural-social-production systems: science and practice. An inter-university collection of scientific papers. Saransk: N.P. Ogarev Mordovia State University, 2018. P. 82–86 (in Russian).
2. *Gessler P.E., Moore I.D., McKenzie N.J., Ryan P.J.* Soil-landscape modeling and spatial prediction of soil attributes. International Journal of GIS, 1995. No 9 (4). P. 421–432.
3. *Glotov A.A.* The elevation data application for the efficient use of agricultural land. Geoprofi, 2013. No 3. P. 20–22 (in Russian).
4. *Hutchinson M.F.* A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. Journal of Hydrology, 1989. V. 106. No 3–4. P. 211–232.
5. *Kraak M.-J., Ormeling F.* Cartography: visualization of geospatial data. 3rd edition. Harlow, England: Pearson Education Limited, 2010. 249 p.
6. *Koshel S.M., Entin A.L.* Catchment area derivation from gridded digital elevation models using the flowline-tracing approach. Herald of Moscow University. Series 5. Geography, 2017. No 3. P. 42–50 (in Russian).
7. *Lurie I.* The university school of geographic cartography: tradition and innovation. Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying, 2016. V. 60 (5). P. 37–41 (in Russian).
8. *Manukhov V.F., Ivlieva N.G.* Creation of cartographic images GIS packages means. Pedagogical Informatics, 2015. No 1. P. 55–63 (in Russian).
9. *Smirnova L.G., Narazhnaja A.G., Krivokon' Yu.L., Petryakova A.A.* Application of geoinformation systems for agroecological assessment of land with adaptive landscape farming system designing. Achievements of Science and Technology of AIC, 2011. No 11. P. 11–14 (in Russian).
10. *Tikunov V.S.* Modelling in cartography. Moscow: Moscow University Press, 1997. 405 p. (in Russian).

УДК: 631.6:528.9 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-54-65**

А.Г. Нарожняя[1], Ю.Г. Чендев[2]

ИЗУЧЕНИЕ СОВРЕМЕННОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЛОС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС И ДДЗ

АННОТАЦИЯ

Векторизации карт землепользования масштаба 1: 10 000 1955–1956 гг., 1980–1981 гг. съёмки, визуальное дешифрирование космических снимков высокого разрешения современного периода (2017 г.), а также экстраполяция этих данных позволили установить, что на территории Белгородской области протяжённость лесных полос с 1950-х гг. по 2017 г. увеличилась в 2 р. — с 14 600 км до 29 600 км. При этом, по сравнению с 1950-ми гг., в 1980-е гг. более чем в 3 р. увеличилась длина противоэрозионных лесных полос и на 9 % уменьшилась длина полезащитных. В среднем на территории Белгородской области около 0,96 км на 1000 км лесополос, высаженных до 1955 г., ежегодно выбывает из оборота. Скорость выпадения лесных полос, высаженных в период 1950–1980-е гг. — 0,23 км/год×1000 км. Около 0,13 км/год×1000 км лесонасаждений теряет целостность древостоя, и лесополосы становятся фрагментированными. Причинами сокращения лесных полос является их старение, отсутствие систематического ухода, уничтожение при увеличении площади населённых пунктов. Визуальное дешифрирование космических снимков позволило определить нарушенные участки лесных полос, в которых отмечена изреженность (фрагментированность) древостоя, их длина составляет 1 464 км. На 46 % площади пашни, относящейся к склонам свыше 2°, в 1950–1980-х гг. было создано 10 300 км полезащитных лесных полос, из которых около 50 % отклоняются от направления горизонталей более чем на 30°, что приводит к размывам почвы и образованию промоин, а затем оврагов. Контурных лесных полос на пашне обнаружено лишь 8,7 % от общей длины полезащитных. Согласно дополнительно проведённым расчётам, для 35 % полезащитных лесных полос, расположенных относительно горизонталей правильно, потенциальная величина смыва почвы превышает допустимые значения в среднем на 41 %, т.е. необходимо создание дополнительных лесных полос выше по склону на пахотных угодьях. Выявлена обратная связь между протяжённостью нарушенных и выбывших лесных полос и значениями гидротермического коэффициента (ГТК) (r = -0,44): в более засушливых климатических условиях Белгородской области жизнестойкость лесополос снижается. На южных склонах свыше 4° сокращение протяжённости лесных полос при изменении ГТК происходит быстрее, чем на склонах других экспозиций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: лесные полосы, пространственно-временная динамика лесополос, экологическое состояние лесополос, космические снимки высокого пространственного разрешения, ГИС

---

[1] Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Институт наук о Земле, ул. Победы, д. 85, 308015, Белгород, Россия; *e-mail:* **narozhnyaya_a@bsu.edu.ru**

[2] Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Институт наук о Земле, ул. Победы, д. 85, 308015, Белгород, Россия; *e-mail:* **chendev@ bsu.edu.ru**

Anastasiya G. Narozhnyaya[1], **Yurii G. Chendev**[2]

THE STUDY OF THE MODERN ECOLOGICAL STATE OF SHELTERBELTS USING GIS AND REMOTE SENSING DATA

ABSTRACT

Digitization of maps of land-use (scale 1: 10 000) 1955–1956, 1980–1981s years of surveying, visual interpretation of satellite images of the modern period of high resolution (2017), as well as extrapolation of these data, allowed us to establish that on the territory of the Belgorod oblast the length of shelterbelts from the 1950s to 2017 increased 2 times — from 14 600 km to 29 600 km. At the same time, in comparison with the 1950s, in the 1980s, the length of anti-erosion shelterbelts increased more than 3 times and the length of protective shelterbelts decreased by 9 %. On average, on the territory of the Belgorod region, about 0.96 km per 1000 km of shelterbelts before 1955, annually retires from circulation. The rate of loss of shelterbelts in the period 1950–1980s — 0.23 km / year×1000 km. About 0.13 km/year×1000 km of shelterbelts loses the integrity of the stand and shelterbelts become fragmented. The reasons for the reduction of shelterbelts is their aging, lack of systematic care, destruction with an increase in the area of settlements. Visual interpretation of space images allowed identifying the disturbed sites of shelterbelts in which the rarefaction (fragmentation) of forest stand is marked. 693 800 ha of arable land of the region belongs to slopes over 2°. On them in the 1950–1980s the 10 300 km of protective shelterbelts were created, out of which about 50 % deviate from the horizontal direction by more than 30°, which leads to soil erosion and the formation of scours, and then — gullies. Only 8.7 % of the contour shelterbelts on arable land from the total length of protective shelterbelts were determined. According to additional calculations, for 35 % of protective shelterbelts located relative to the horizontal lines correctly, the potential amount of soil flushing exceeds the permissible values by an average of 41 %, i.e. it is necessary to create additional shelterbelts higher up the slope on arable land. The inverse relationship between the length of disturbed and abandoned shelterbelts and the values of the hydrothermal coefficient (HTC) (r = -0.44) is revealed: in more arid climatic conditions of the Belgorod oblast the viability of shelterbelts decreases. On southern slopes above 4° reduction of length of shelterbelts at change of HTC occurs faster, than on slopes of other aspect.

KEYWORDS: shelterbelts, spatial-temporal dynamics of shelterbelts, ecological condition of shelterbelts, space images of high spatial resolution, GIS

ВВЕДЕНИЕ

Агроэкологический кризис степного земледелия, имевший место в начале 1890-х гг., поднял проблему устойчивости степного землепользования. В.В. Докучаев и его ученики в 1890-х гг. заложили научную основу степных лесомелиораций [*Кулик,* 2000; *Ерусалимский, Рожков*, 2017].

В 1930-е гг. в истории России были высажены значительные площади лесных полос, бóльшая часть которых была уничтожена во время Великой Отечественной войны. Российский опыт агролесомелиорации получил широкое международное признание в практике защиты почв от ветровой и водной эрозии, примером чему служит почвоохранное лесоразведение на востоке Великих равнин США после катастрофических пыльных бурь, произошедших в 1930-х гг. [Possibilities..., 1935; The great plains..., 1958].

[1] Belgorod State National Research University, Institute of Earth Sciences, Pobedy str., 85, 308015, Belgorod, Russia; *e-mail:* **narozhnyaya_a@bsu.edu.r;**

[2] Belgorod State National Research University, Institute of Earth Sciences, Pobedy str., 85, 308015, Belgorod, Russia; *e-mail:* **chendev@ bsu.edu.ru**

В 1948 г. было принято постановление ЦК ВКП(б) и Совета Министров СССР «О плане полезащитных лесонасаждений, внедрении травопольных севооборотов, строительстве прудов и водоёмов для обеспечения высоких и устойчивых урожаев в степных и лесостепных районах европейской части СССР», которое положило начало реализации ряда государственных программ по агролесомелиорации на территории России и др. союзных республик. К началу 80-х гг. XX в. в России свыше 2 000 хозяйств имели завершённые системы лесомелиорации; общая площадь полезащитных полос составляла более 1,2 млн га [*Дронов и др.*, 1984].

Возраст большинства лесных полос в настоящее время достигает 50–65 лет. Они в процессе своего функционирования оказывают существенное влияние на экологическое и качественное состояние почв и, как следствие, на урожайность культур, гидрологические процессы [*Трегубов*, 1978; *Чендев и др.*, 2015; *Барабанов*, 2016]. Многие лесополосы нуждаются в реконструкции в связи со старением древостоя и рядом неблагоприятных факторов их произрастания. Поэтому для совершенствования практики рационального землепользования и внедрения передовых почвосберегающих технологий (включающих технологии агролесомелиораций) необходимо изучение их современного экологического состояния.

В качестве территории исследования выбран староосвоенный аграрный регион России — Белгородская область, которая, помимо государственных программ, на современном этапе реализует и собственные программы по увеличению и сохранению лесных насаждений: «Развитие водного и лесного хозяйства Белгородской области, охрана окружающей среды на 2014–2020 годы»[1], областной проект «Зелёная столица»[2]; «Развитие сельского хозяйства и рыбоводства в Белгородской области»[3].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основная часть Белгородской области расположена в зоне лесостепи, а юго-восточная часть — в степной зоне юга Среднерусской возвышенности. В целом территория области имеет слабовыраженные уклоны на запад – юго-запад и восток – юго-восток. Среди современных экзогенных рельефообразующих процессов на территории области распространены эрозия, оползневые и техногенные процессы [*Петина, Гайворонская,* 2005]. Более 63,7 % территории относится к склонам с крутизной свыше 2°, из них 46 % (694,4 тыс. га) относится к пашне [*Нарожняя, Буряк*, 2016].

Эродированность почв пашни распространена неравномерно, возрастая с запада, северо-запада на восток, юго-восток с 25 до 50 % [*Спесивый, Лисецкий*, 2014]. Площадь эродированных земель к 2009 г. составила 59,7 % общей площади региона [*Лисецкий, Марциневская*, 2009]. На площади более 8 % изучаемой территории потенциальный модуль смыва превышает 5 т/га [*Буряк и др.*, 2016].

Земельные ресурсы области общей площадью 27,1 км^2 характеризуются значительной долей сельскохозяйственных угодий (78,6 % общей территории области, из которых 77,1 % занимает пашня)[4]. Лесами заняты 219 400 га (8,1 %), лесными насаждениями, не

---

[1] Об утверждении государственной программы Белгородской области «Развитие водного и лесного хозяйства Белгородской области от 16.12.2013 № 517-пп, охрана окружающей среды»: постановление правительства Белгородской области. Электронный ресурс: http://docs.cntd.ru/document/469027751 (дата обращения 29.11.2019)

[2] О концепции областного проекта «Зелёная столица»: распоряжение правительства Белгородской области от 25.01.2010 № 35-рп. Электронный ресурс: http://docs.cntd.ru/document/428670861 (дата обращения 29.11.2019)

[3] Об утверждении государственной программы Белгородской области «Развитие сельского хозяйства и рыбоводства в Белгородской области»: постановление правительства Белгородской области от 28.10.2013 № 439-пп. Электронный ресурс: http://docs.cntd.ru/document/412303790 (дата обращения 29.11.2019)

[4] Доклад о состоянии и использовании земель в Белгородской области за 2018 г. Росреестр. Белгород, 2019. 87 с. Электронный ресурс: https://rosreestr.ru/site/open-service/statistika-i-analitika/obzory-otchety-doklady-o-

входящими в лесной фонд — 90 500 га (3,3 %), что для территории лесостепи является недостаточным. По мнению авторов [*Лозовой,* 2003; *Баранов*, 2012], для условий лесостепи общая лесистость должна составлять от 13 до 25 %.

В настоящем исследовании были использованы инструменты программного комплекса ArcGIS 10.2.2.

На подготовительном этапе исследования были отобраны 1 425 планшета карт землепользований м-ба 1: 10 000, 942 из которых относятся к 1955–1956 гг. съёмки; остальные 483 планшета были обновлены в 1980–1981 гг. (рис. 1а). В качестве современных данных использованы космические снимки DigitalGlobe 2014–2017 гг. с пространственным разрешением 1 м и выше, расположенные в открытом доступе и подгружаемые с использованием ArcGIS Server. Космические снимки покрывают всю территорию Белгородской области. Карты были привязаны к космическим снимкам с использованием системы координат проекции WGS 1984 UTM Zone 37N.

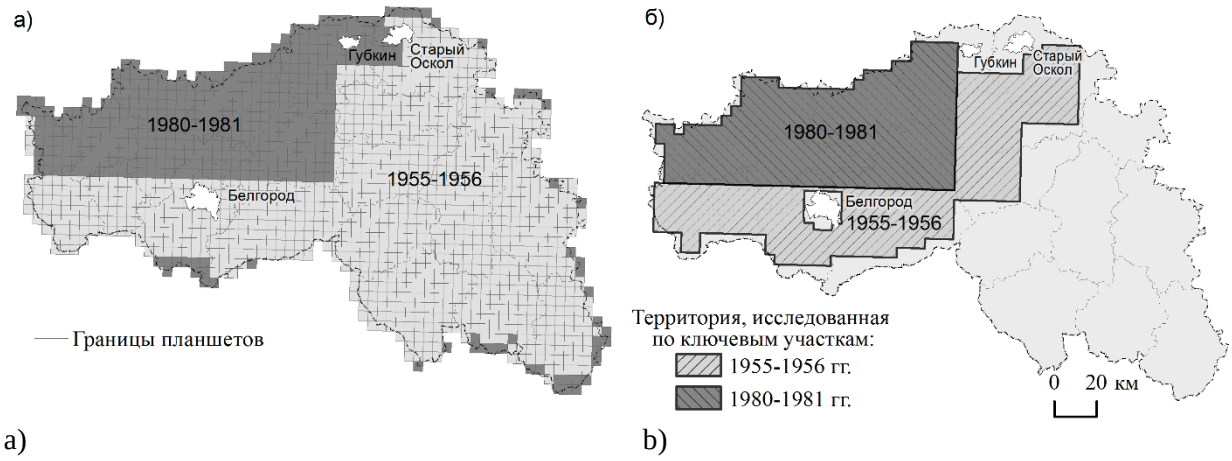


Рис. 1. Использование топографических карт м-ба 1:10 000 в исследовании:
а) периоды составления планшетов;
б) территория исследования для анализа пространственно-временной динамики лесополос
Fig. 1. Use of topographic maps of scale 1: 10 000 in the study:
a) scheduling periods;
b) territory of the studied for the analysis of spatio-temporal dynamics of shelterbelts

Поскольку для территории всей области не удалось собрать ретроспективные картографические материалы на один год, были проведены исследования на реперных ключевых участках (рис. 1б), которые включали 324 планшета 1955–1956 гг. (далее 1955 г.) обследования и 324 смежных планшета 1980–1981 гг. (далее 1980 г.) обследования. Из анализа были исключены территории крупных городов. Полученные данные о густоте лесных полос в XX в. были экстраполированы на территорию всей области.

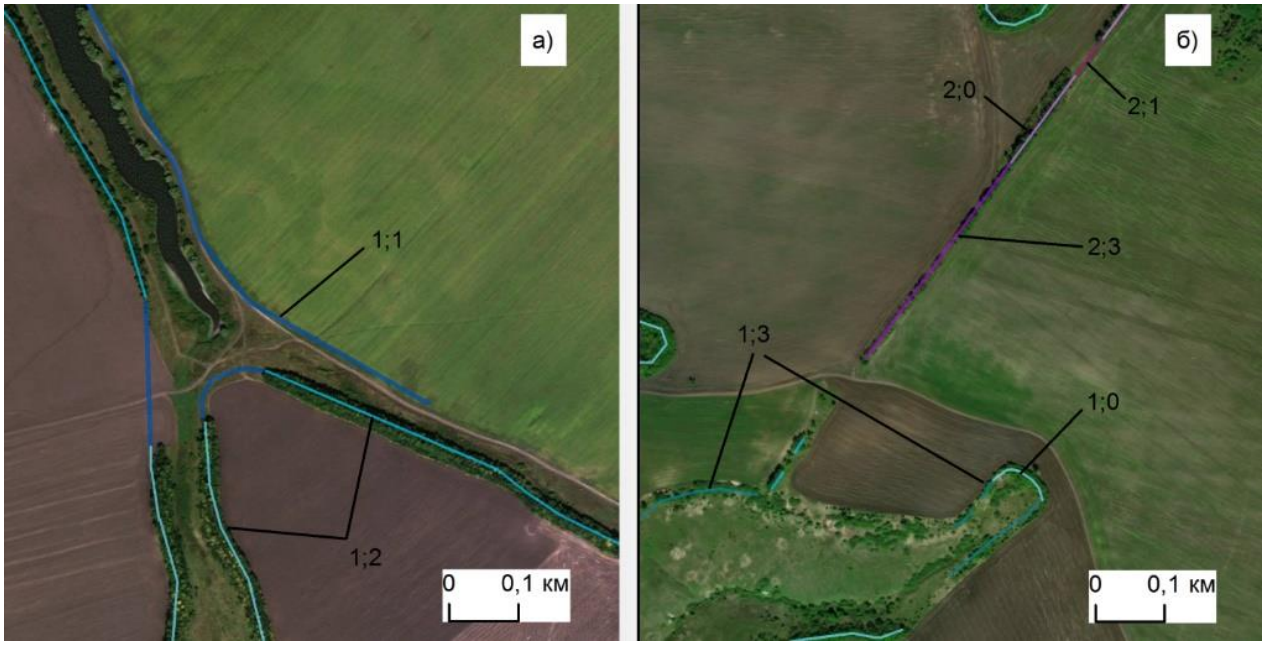
Для создания картосхемы современного состояния лесополос на первом этапе была произведена векторизация лесных полос по картам землепользования м-ба 1: 10 000 с их разделением на противоэрозионные, полезащитные и придорожные.

На втором этапе эти данные были актуализированы методом визуального дешифрирования космических снимков. При обновлении карт было выявлено, что за

deyatelnosti-v-sfere-zemleustroystva-i-monitoringa-zemel/doklady-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-v-belgorodskoy-oblasti/ (дата обращения 06.02.2020)

рассматриваемые периоды некоторые лесные полосы полностью выбыли из оборота (рис. 2а), а часть из них имеет нарушенный, фрагментированный древостой (рис. 2б).

Всем участкам были присвоены соответствующие индексы; при этом лесные полосы, выделенные по картам, подвергались специальной обработке для присвоения выбывшим или нарушенным участкам лесополос атрибутивной информации (рис. 2).



a) b)

Рис. 2. Актуализация карт лесных полос (фрагмент):
а) 1;1 — противоэрозионная выбывшая лесная полоса;
1;2 — противоэрозионная новая лесная полоса;
б) 1;0 — сохранившаяся противоэрозионная лесная полоса;
1;3 — нарушенная противоэрозионная лесная полоса;
2;0 — сохранившаяся полезащитная лесная полоса;
2;1 — выбывшая полезащитная лесная полоса;
2;3 – нарушенная полезащитная лесная полоса с фрагментированным древостоем
Fig. 2. Updating of maps of shelterbelts (fragment):
a) 1;1 — the antierosion left shelterbelts;
1;2 — the antierosion new shelterbelts;
b) 1;0 — the remained antierosion shelterbelts;
1;3 — the broken antierosion shelterbelts;
2;0 — the remained protective shelterbelts;
2;1 — the left protective shelterbelts;
2; 3 — disturbed protective shelterbelts with fragmented forest stand

Для построения карты густоты лесных полос был использован инструмент «плотность линий» с радиусом поиска 2,5 км, равным двум средним расстояниям между выбывшими лесополосами. Цифровая модель рельефа и построенные морфометрические карты по данной модели были рассчитаны на основе топографической карты м-ба 1: 100 000, оцифрованной нами ранее [*Нарожняя, Буряк*, 2016]. Для совокупного анализа тематических растров и динамики лесополос применялись инструменты «зональной статистики», «пространственной статистики», «анализ» и др.

Для создания интегральной картосхемы экологического состояния лесополос был произведён оверлей слоёв, построенных для существующих выбывших и нарушенных

(фрагментированных) лесополос современной густоты. Для этого гриды густоты были переклассифицированы и конвектированы в векторные данные.

Отдельным этапом проведённых исследований были работы по выявлению соответствия между наблюдающимся процессом деградации лесополос и климатическими особенностями различных участков изучаемой территории. Для этого нами были установлены корреляционные связи между густотой лесных полос в муниципальном образовании и средним значением ГТК в нём. А также оценена зависимость густоты выпавших лесополос от ГТК по экспозициям склонов крутизной больше 4°.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время средняя густота всех лесных полос на территории Белгородской области — 1,1 км/км^2 (рис. 3), а участки с густотой менее 0,5 км/км^2 чаще приурочены к территориям, которые заняты лесами или населёнными пунктами.

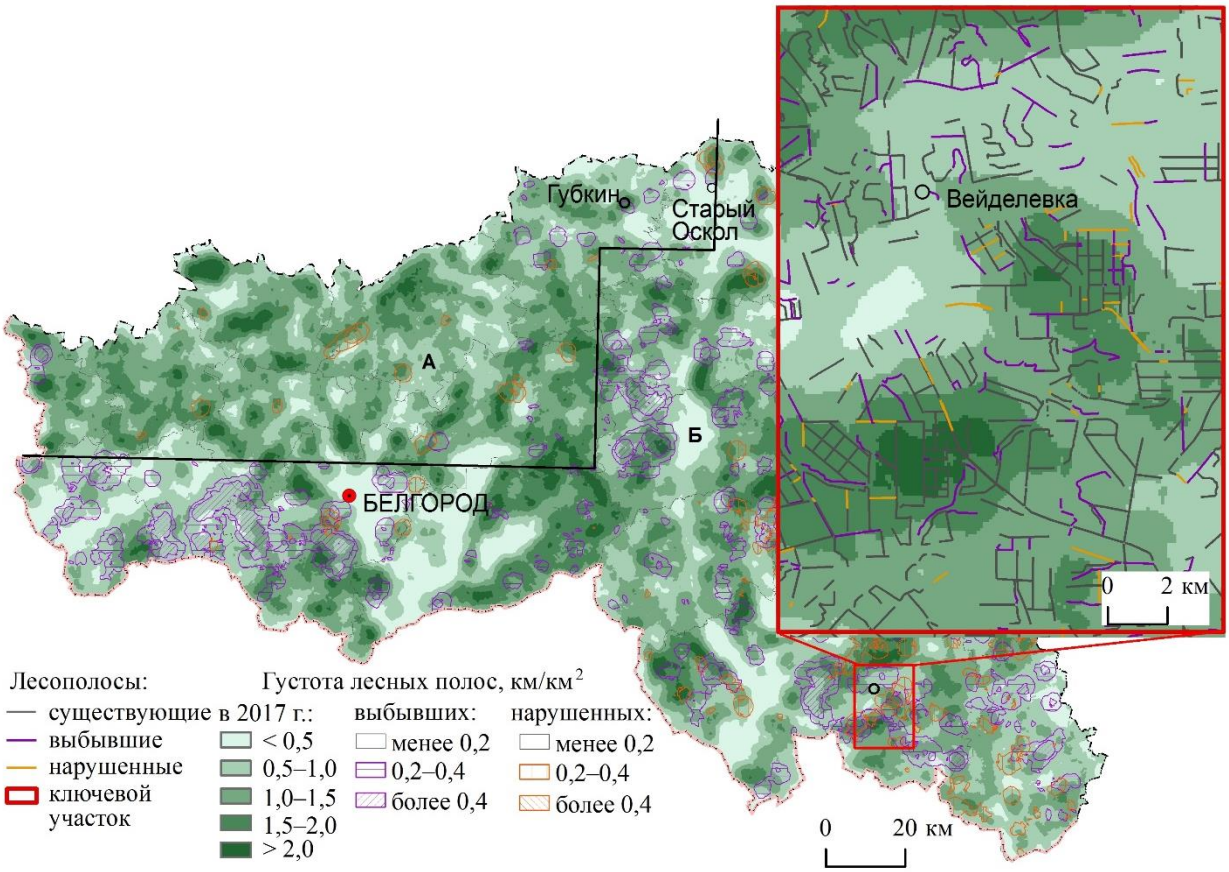


Рис. 3. Современное экологическое состояние лесных полос на территории Белгородской области: А) 1980–2017 гг., Б) 1955–2017 гг.
Fig. 3. Modern ecological condition of shelterbelts on the territory of Belgorod region: A) 1980–2017 years, B) 1955–2017 years)

Как видно из рис. 3 на территории, где использованы планшеты 1981 г. обновления (рис. 3А), значительно меньше выбывших и нарушенных лесополос, чем на остальной территории (рис. 3Б). Заметно выше количество выбывших лесных полос в Белгородском районе, где лесопосадки были уничтожены при планировке новых жилых массивов.

Для реперных ключевых участков, отображённых на рис. 1б, нами были установлены длины лесных полос и их густота для пространственно сопряжённых и идентичных по площади территорий на картах разных лет (табл. 1).

Табл. 1. Густота лесных полос на реперных ключевых участках Белгородской области по разновременным материалам, км/км^2
Table 1. Density of shelterbelts on reference key sites of the Belgorod region on materials of different times, km/km^2

Тип лесополос	1955 г.	2017 г. (по территории 1955 г.)	Разность ст. 3 – ст. 2	1980 г.	2017 г. (по территории 1980 г.)	Разность ст. 6 – ст. 5	Разность ст. 5 – ст. 2
1	2	3	4	5	6	7	8
Противо-эрозионные	0,18	0,51	+0,33	0,56	0,69	+0,13	+0,38
Полезащитные	0,22	0,29	+0,07	0,20	0,29	+0,09	-0,02
Придорожные	0,13	0,17	+0,04	0,20	0,24	+0,04	+0,07
Итого	**0,54**	**0,97**	**+0,43**	**0,96**	**1,22**	**+0,26**	**+0,43**

Как видно из табл. 1, на изучаемой территории к 1980 г. в 3 р. увеличилась густота противоэрозионных лесных полос, на 9 % уменьшилась густота полезащитных насаждений, на 54 % возросла густота придорожных лесных полос.

Экстраполяция установленных изменений на всю территорию Белгородской области дала вполне удовлетворительные результаты (табл. 2). Об этом, в частности, свидетельствует близкая величина процентного состава всех изучаемых категорий лесополос по состоянию на 2017 г.

Табл. 2. Длина лесополос на территории Белгородской области в разные периоды, км
Table 2. Length of shelterbelts in the Belgorod region in different periods, km

Тип лесополос	Длина, экстраполированная на основе соответствий по данным табл. 1					Фактическая длина в 2017 г. / % от всей длины
	1955 г.	1980 г.	2017 г. по 1955 г. / % от всей длины	2017 г. по 1980 г. / % от всей длины	Средняя 2017 г.	
Противо-эрозионные	4 880	15 183	13 828 / 53	18 708 / 57	16 268 / 55	14 467 / 49
Полезащитные	5 965	5 423	7 863 / 30	7 863 / 24	7 863 / 26	10 276 / 35
Придорожные	3 525	5 423	4 609 / 18	6 507 / 20	5 558 / 19	4 816 / 16
Итого	**14 641**	**26 029**	**26 300 / 100**	**33 078 / 100**	**29 689 / 100**	**29 559 / 100**

Различия длин лесополос в 2017 г., экстраполированных на всю территорию Белгородской области по разным участкам, могут быть связаны с региональными различиями, а также с более высоким темпами выбывания лесополос 1955 г. Как видно из данных табл. 2, в 1980 г. длина противоэрозионных и придорожных лесных полос могла быть выше современной на 4,7 % и 11,2 %, соответственно. С 1955 по 1980 гг. (табл. 2) на территории Белгородской области особое внимание уделялось созданию противоэрозионных лесных полос, а позднее — полезащитных.

Экстраполяция результатов на всю территорию области показала, что общая протяжённость лесных полос с 1955 по 2017 гг. возросла с 14,6 до 29,6 тыс. км. При этом увеличение густоты лесных полос особенно интенсивно происходило в интервале времени с 1960-х по 1970-е гг.

Следует отметить, что 9,1 % лесополос, посаженных во второй половине XX в., в начале XXI в. в той или иной степени оказались нарушенными, ещё 15,6 % полностью выбыли, из них более половины приходится на полезащитные лесные полосы и 25,7 % — на противоэрозионные (рис. 4).

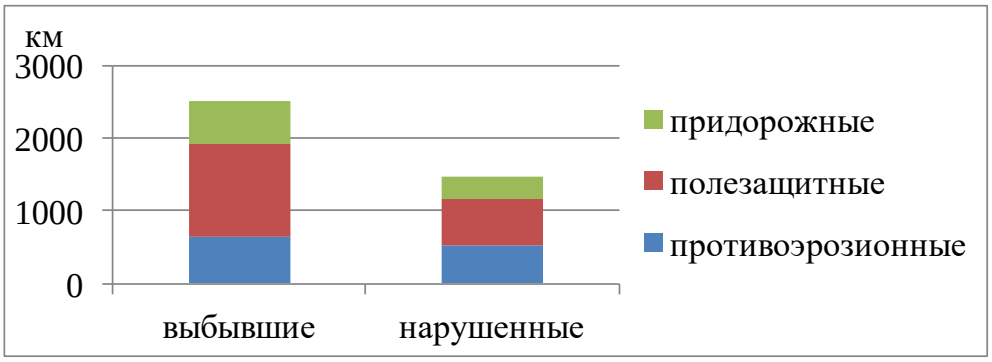


Рис. 4. Длины выбывших и нарушенных лесных полос в настоящее время
Fig. 4. The length of departures and disturbed shelterbelts of the bands currently

В целом деградации в большей степени оказались подвержены старовозрастные лесополосы, на что со всей очевидностью указывает схема 3Б — с бóльшим временным интервалом между периодами съёмок по сравнению со схемой 3А. Вытянуты выбывшие лесонасаждения в среднем для территории области с запада на восток, что может быть связано с общим направлением склонов области.

В среднем на территории Белгородской области около 0,96 км на 1000 км лесополос, высаженных до 1955 г., ежегодно выбывает из оборота. Скорость выпадения более молодых лесонасаждений, высаженных в период 1950–1980-е гг. — 0,23 км/год×1000 км. Около 0,13 км/год×1000 км лесонасаждений теряет целостность древостоя, и лесополосы становятся фрагментированными. Чаще всего причиной сокращения полезащитных лесных полос является их старение при отсутствии систематического ухода. Другая немаловажная причина — сведение при увеличении площади населённых пунктов.

Согласно совокупному анализу современной спутниковой информации и карты крутизны склонов, противоэрозионные лесные полосы в среднем расположены на склонах с крутизной 5,1±2,9°, полезащитные — 2,3±1,7°, придорожные — 1,6±1,5°.

Как показал анализ крупномасштабных карт, при устройстве лесных полос на пашне в середине XX в. на территории области отдавали предпочтение лесным полосам на плакорах, которые располагали прямолинейно. Так, на пашне с крутизной склона свыше 2° в 1950-е гг. располагалось лесных полос в 1,4 р. меньше, а в 1980-е гг. — в 2,5 р. меньше, чем на плакорах (табл. 3).

На современном этапе сохранилось преобладание полезащитных лесных полос на плакорах (см. табл. 3). Между тем 46,5 % лесных полос в агроландшафтах относится к склоновым землям, они требуют контурного размещения поперёк склонов, при ориентировании лесополос вдоль горизонталей. Однако около половины из них отклоняются от горизонталей более чем на 30°, что создаёт предпосылки для развития эрозионных процессов. В ряде случаев на космических снимках были обнаружены размывы вблизи неправильно расположенных лесополос (рис. 5).

Табл. 3. Длина полезащитных лесных полос на склонах, км
Table 3. Length of protective shelterbelts on slopes, km

Территория	Годы съёмок				Итого на территории области в разные периоды	
	1955*	2017	1980*	2017	1955–1980 гг.	2017
Склоны до 2°	2519	4065	1017	1428	3536	5493
Склоны более 2°	1771	4112	398	671	2169	4783
Итого	4290	8177	1415	2099	5705	10276

* см. территорию на рис. 3

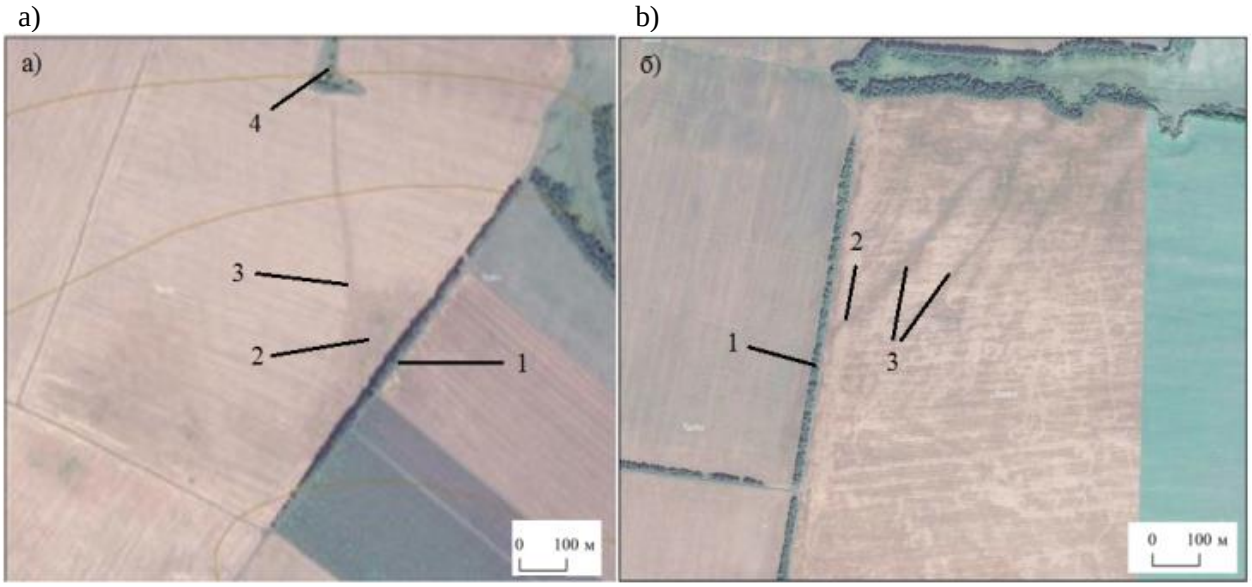


Рис. 5. Неблагоприятное влияние неправильно заложенных лесных полос:
а) 1 — лесная полоса с отклонением от горизонталей 40°, 2 — зона размыва почвы,
3 — формирование промоины, 4 — ложбина;
б) 1 — лесная полоса с отклонением от горизонтали 80°, 2 — зона размыва почвы,
3 — формирование промоин (пояснение в тексте)
Fig. 5. The adverse impact of incorrectly laid shelterbelts:
a) 1 — shelterbelts deviation from the contour 40°, 2 — zone soil erosion,
3 — formation of gullies; 4 — trough;
b) 1 — shelterbelts deviation from horizontal 80°, 2 — zone soil erosion,
3 — formation of gullies (explanation in the text)

Как видно из рис. 5, в центральной части лесной полосы в результате концентрации стока образуется размыв почвы, при усилении которого хорошо выделяется промоина, которая ниже по склону трансформируется в ложбину. В другом случае (рис. 5б) образовалась не одна промоина, а система микроручейковой сети промоин.

Для лесополос, расположенных на склонах относительно горизонталей правильно, нами рассчитан потенциальный смыв почв. Было установлено, что в 35 % случаев смыв на них превышает допустимые значения в среднем на 41 % (от 6 до 70 %). Это говорит о недостаточности лесных полос, больших расстояниях между ними, неверном определении местоположения первой по склону лесной полосы.

Пространственный анализ рис. 3 показывает, что количество выбывших и нарушенных лесополос увеличивается с севера на юг области, поэтому было выдвинута гипотеза о влиянии климатических особенностей территории на этот процесс. В результате расчётов было установлено, что изменение густоты выбывших и нарушенных противоэрозионных и полезащитных лесополос обратно пропорционально (r = -0,44) среднему значению ГТК (за 1955–2017 гг.) по муниципальным образованиям Белгородской области (рис. 6).

При уменьшении ГТК больше всего сокращается длина полезащитных лесных полос (рис. 6а). Для придорожных лесных полос выявлена слабая связь (r = -0,15). Таким образом, количество выбывших и нарушенных лесных полос увеличивается с севера и северо-запада на юг и юго-восток в соответствии с понижением значений ГТК.

Совокупный анализ карты крутизны склонов и лесных полос показывает, что противоэрозионные лесополосы чаще выбывают из оборота на склонах крутизной 4,7°, а полезащитные — на склонах с крутизной 2,2°. Влияния экспозиции склонов на нарушение целостности древостоя лесных полос не выявлено. Но при визуальном анализе картосхем было

замечено, что на покатых склонах южной экспозиции чаще встречается более выразительная изреженность древостоя. Поэтому был проведён анализ влияния экспозиции склонов крутизной свыше 4° на выпадение лесополос в зависимости от ГТК. Оказалось, что на изменение густоты придорожных лесных полос изменение значений ГТК и экспозиция склонов не оказывают влияния (r = -0,03). Вместе с тем густота выбывших противоэрозионных и полезащитных лесных полос на склонах разных экспозиций коррелирует со значениями ГТК ($r_{ср}$ = -0.473) (рис. 7).

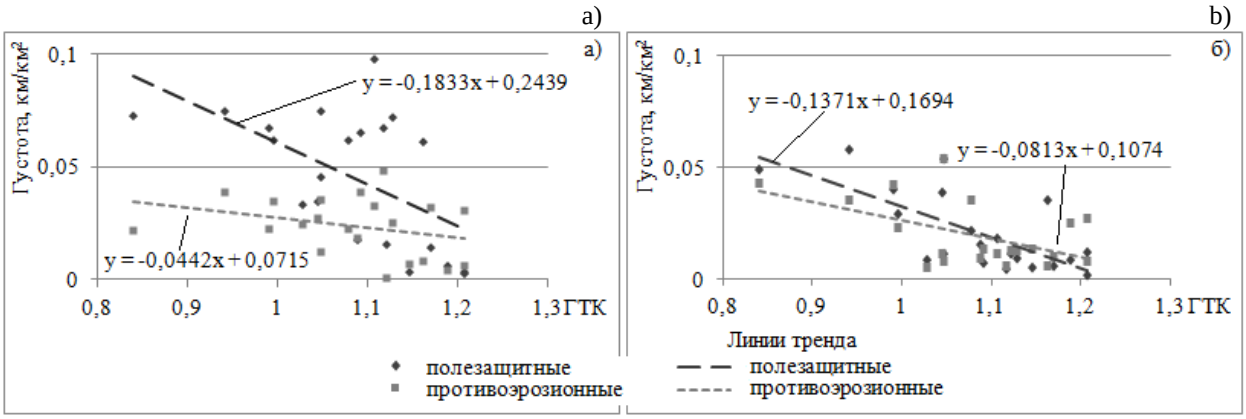


Рис. 6. Зависимость протяжённости лесных полос от значений ГТК в муниципальных образованиях Белгородской области: а) полностью выбывших лесополос; б) нарушенных лесополос

Fig. 6. The dependence of the length of shelterbelts on the values of the HTC in the municipalities of the Belgorod region: a) completely eliminated shelterbelts; b) disturbed shelterbelts

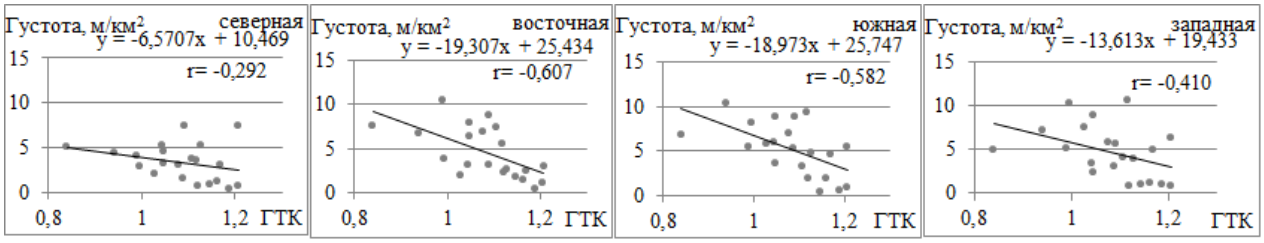


Рис. 7. Зависимость длины выпавших лесополос от ГТК по экспозициям склонов крутизной больше 4°

Fig. 7. The dependence of the length of the fallen shelterbelts from the HTC on the aspect of slopes with a steepness greater than 4°

Как видно из представленных на рис. 7 уравнений, наибольшие скорости сокращения длин лесополос при повышении значений ГТК наблюдаются на склонах южных экспозиций, а наименьшие — на склонах северных экспозиций.

ВЫВОДЫ

Протяжённость лесных полос на территории Белгородской области с середины XX в. по настоящее время увеличилась в 2 р., однако 2525 км лесных полос, существовавших в прошлом веке, выбыли из оборота, ещё 1470 км имеют нарушенный (фрагментированный) древостой. Необходимо отметить, что около четверти прямолинейных лесных полос на пашне необходимо заменить на контурные. Деградация лесных полос сильнее проявляется в засушливых районах Белгородской области, особенно

на южных покатых слонах, заметно изрезанных долинно-балочной сетью, в связи с чем необходим тщательный подбор видового состава лесных насаждений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 19-17-00056.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by The Russian Science Foundation, grant No 19-17-00056.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барабанов А.Т.* Преобразование гидрологического режима агроландшафтов защитными лесными насаждениями. Живые и биокосные системы, 2016. № 16. С. 67–74.
2. *Баранов В.А.* Оптимизация агролесоландшафтов юго-востока Европейской России (к 120-летию Докучаевской экспедиции). Исследования в области естественных наук, 2012. № 9. Электронный ресурс: http://science.snauka.ru/2012/09/1538 (дата обращения 07.02.2019).
3. *Буряк Ж.А., Нарожняя А.Г., Павлюк Я.В.* Пространственно-временное моделирование водной эрозии почв средствами ГИС-технологий и оценка её влияния на состояние малых рек в сложных геоморфологических условиях Центрально-Чернозёмного региона. Белгород: БелГУ, 2016. 39 с.
4. *Дронов О.Н., Мурзин А.П., Фёдоров А.Б.* Великая степь. М.: Политиздат, 1984. 352 с.
5. *Ерусалимский В.И., Рожков В.А.* Многофункциональная роль защитных лесных насаждений. Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева, 2017. № 88. С. 121–137.
6. *Кулик К.Н.* Агролесомелиорация аридной зоны России. Вековой опыт и перспективы агролесомелиорации аридных ландшафтов на юге РФ: материалы Российской научно-практической конференции (к 50-летию Ачикулакской НИЛОС). Волгоград: РАСХН, Всероссийский НИИ агролесомелиорации, 2000. С. 13–14.
7. *Лисецкий Ф.Н., Марциневская Л.В.* Оценка развития линейной эрозии и эродированности почв по результатам аэрофотосъёмки. Землеустройство, кадастр и мониторинг земель, 2009. № 10 (58). С. 39–43.
8. *Лозовой А.Д.* Состояние и перспективы развития. Оптимальная лесистость как биоиндикатор эколого-экономического положения в регионе. Лесной комплекс. Брянск, 2003. Электронный ресурс: science-bsea.bgita.ru/2003/leskomp_2003/lozovoy.htm (дата обращения 05.11.2019).
9. *Нарожняя А.Г., Буряк Ж.А.* Морфометрический анализ цифровых моделей рельефа Белгородской области. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки, 2016. № 25 (246). Вып. 37. С. 169–178.
10. *Петина В.И., Гайворонская Н.И.* Эколого-геоморфологический анализ экзоморфогенеза территории Белгородской области. Проблемы региональной экологии, 2005. № 6. С. 62–69.
11. *Спесивый О.В., Лисецкий Ф.Н.* Оценка интенсивности и нормирование эрозионных потерь почвы в Центрально-Чернозёмном районе на основе бассейнового подхода. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки, 2014. Т. 27. № 10 (181). С. 125–132.
12. *Трегубов П.С.* Ветровая эрозия почв и меры борьбы с ней на Северном Кавказе. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 1978. 167 с.
13. *Чендев Ю.Г., Соэр Т.Д., Геннадиев А.Н., Новых Л.Л., Петин А.Н., Петина В.И., Заздравных Е.А., Буррас С.Л.* Накопление органического углерода в чернозёмах (моллисолях) под полезащитными лесными насаждениями в России и США. Почвоведение, 2015. № 1. С. 49–60.
14. Possibilities of shelterbelt planting in the plain region. Prepared under the direction of the Lake States forest experiment station. United States Forest service. Washington:

United States Government printing office, 1935. 201 p.
15. *Read R.A.* The Great Plains shelterbelt in 1954 (A re-evaluation of field windbreaks planted between 1935 and 1942 and a suggested research program). Lincoln, Nebraska: University of Nebraska, College of Agriculture, Agricultural Experiment Station, 1958. 125 p.

REFERENCES

1. *Barabanov A.T.* Transformation of the hydrological regime of agricultural lands, protective forest plantations. Living and biocos systems (Zhivye i biokosnye sistemy), 2016. No 16. P. 67–74 (in Russian, abs English).
2. *Baranov V.A.* Optimization of agro-forest landscapes of the South-East of European Russia (to the 120th anniversary of the Dokuchaev expedition). Research in the Natural Sciences, 2012. Web resource: http://science.snauka.ru/2012/09/1538 (accessed 07.02.2019) (in Russian).
3. *Buryak Zh.A., Narozhnyaya A.G., Pavlyuk Ya.V.* Spatial-temporal modeling of water erosion of soils by means of GIS technologies and assessment of its impact on the condition of small rivers in difficult geomorphological conditions of the central chernozem region. Belgorod: Belgorod State University, 2016. 39 p. (in Russian).
4. *Chendev Yu.G., Soer T.D., Gennadiev A.N., Novyh L.L., Petin A.N., Petina V.I., Zazdravnyh E.A., Burras S.L.* Accumulation of organic carbon in chernozems (mollisols) under protective forest plantations in Russia and the USA. Eurasian Soil Science, 2015. No 1. P. 49–60 (in Russian).
5. *Dronov O.N., Murzin A.P., Fedorov A.B.* Great steppe. Moscow: Politizdat, 1984. 352 p. (in Russian).
6. *Erusalimskij V.I., Rozhkov V.A.* Multifunctional role of protective forest plantations. Dokuchaev Soil Bulletin, 2017. No 88. P. 121–137 (in Russian).
7. *Kulik K.N.* Agroforestry of arid zone of Russia. Century experience and prospects of agroforestry of arid landscapes in the South of the Russian Federation: Proceedings of the Russian scientific and practical conference (to the 50th anniversary of Achikulak Scientific Research Forest Agricultural Station). Volgograd, 2000. P. 13–14 (in Russian).
8. *Lisetsky F.N., Marcinevskaya L.V.* Assessment of the development of linear erosion and soil erosion by the results of aerial photography. Land management, cadastre and land monitoring, 2009. No 10 (58). P. 39–43 (in Russian).
9. *Lozovoj A.D.* State and prospects of development. Optimal forest cover as a bioindicator of ecological and economic situation in the region. Forest complex. Bryansk, 2003. Web resource: science-bsea.bgita.ru/2003/leskomp_2003/lozovoy.htm (accessed 05.11.2019) (in Russian).
10. *Narozhnyaya A.G., Buryak ZH.A.* Morphometric analysis of digital elevation models of the Belgorod region. Belgorod State University Scientific Bulletin. Series: Natural sciences, 2016. No 25 (246). Iss. 37. P. 169−178 (in Russian).
11. *Petina V.I., Gayvoronskaya N.I.* Ecological-geomorphological analysis of ecomorphogenesis the territory of the Belgorod region. Regional Environmental Issues, 2005. No 6. P. 62–69 (in Russian).
12. Possibilities of shelterbelt planting in the plain region. Prepared under the direction of the Lake States forest experiment station. United States Forest service. Washington: United States Government printing office, 1935. 201 p.
13. *Read R.A.* The Great Plains shelterbelt in 1954 (A re-evaluation of field windbreaks planted between 1935 and 1942 and a suggested research program). Lincoln, Nebraska: University of Nebraska, College of Agriculture, Agricultural Experiment Station, 1958. 125 p.
14. *Spesivyi O.V. Lisetsky F.N.* Assessing the intensity and regulation of erosion soil loss in the Central Black Earth region based on the basin approach. Belgorod State University Scientific Bulletin. Series: Natural sciences, 2014. V. 27. No 10 (181). P. 125–132 (in Russian).
15. *Tregubov P.S.* Wind erosion of soils and measures to combat it in the North Caucasus. Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute, 1978. 167 p. (in Russian).

УДК: 528.946: 631.445.1 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-66-78**

Г.В. Ахметова[1], П.Н. Токарев[2]

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ БОЛОТНЫХ ПОЧВ ПРИ ОБНОВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОННОЙ ПОЧВЕННОЙ КАРТЫ КАРЕЛИИ

АННОТАЦИЯ

Рассмотрен вопрос обновления устаревшей информации на региональных электронных почвенных картах. В процессе перевода почвенной карты Карелии (ПКК) в векторный вариант возникли затруднения при определении классификационной принадлежности большей части контуров болотных почв. В связи с этим была проведена методологическая работа по корректировке и модернизации электронной версии ПКК. Для актуализации и обновления информации при помощи современных геоинформационных технологий были предложены способы идентификации массивов болотных почв. Содержательная часть ПКК изменялась на основе имеющейся информации на тематических картах, космических снимках, современных данных о рельефе и гидрографии территории. На начальном этапе проводили корреляцию легенд исходной карты с дополнительными картографическими материалами. Уточнённые данные вносили в атрибутивную базу почвенных данных, автоматически связанную с контурами почв. В процессе работы был выявлен ряд трудностей, препятствующих определению типологической принадлежности болотных почв, для решения которых были выработаны различные методологические подходы. Добавлен новый блок «Болотные переходно-низинные торфяные» в легенду обновляемой карты, т.к. информация о типологии болотных почв была пополнена за прошедшее с момента создания оригинальной ПКК время. В результате проведённых манипуляций количество неопределённых контуров на электронной ПКК существенно сократилась — с 83,7 до 7,2 %. Таким образом, проделанная работа позволила актуализировать существующую информацию о болотных почвах, имеющихся на ПКК. Вместе с тем установлено, что возникает необходимость изменить контурную часть некоторых крупных болотных массивов на следующем этапе работы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: болотные почвы и массивы, цифровые карты, геоинформационные системы, ГИС-технологии, бумажные и электронные версии карт

---

[1] Институт леса КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, д. 11, 185910, Петрозаводск, Россия;
e-mail: **akhmetova@krc.karelia.ru**
[2] Институт биологии КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, д, 11, 185910, Петрозаводск, Россия

Gulnara V. Akhmetova[1], **Pavel N. Tokarev**[2]

GIS TECHNOLOGY APPLICATION FOR IDENTIFICATION OF PEAT BOG SOILS FOR UPDATING THE DIGITAL SOIL MAP OF KARELIA

ABSTRACT

Updating of information in digital regional soil maps is addressed. The conversion of the soil map of Karelia (SMK) into vector format encountered the problem of properly placing a majority of peat bog soil contours into the existing classification. Therefore, methodological studies were carried out to enable rectification and updating of the SMK digital version. A procedure for identification of peat bog soil massifs was suggested for the purpose of updating the information using modern GIS technology. Corrections were made to the map contents relying on the information available in thematic maps, satellite images, up-to-date relief and hydrographic data. The first step was to establish correlations between legends in the initial map and further cartographic materials. The updated data were fed into the attributive database of soils, which is automatically linked to soil contours. In the process, some hindrances to the typological identification of wetland soils were revealed, and various methodological solutions to deal with them were worked out. The new block of "meso-eutrophic peat bog soils" was added to the legend of the map, since information about the typology of wetland soils has been expanded since the making of the original SMK. As a result of the effort, the number of unidentified mire contours in the digital SMK was reduced from 83.7 to 7.2%. Data regarding the peat bog soils present in SMK were thus updated. That said, the contours of some large mire massifs will have to be modified at the next stage of the work.

KEYWORDS: peat bog soils and mire massifs, digital maps, geographical information systems, GIS technology, paper and digital versions of maps

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в практике научных исследований активно используются электронные носители информации и геоинформационные технологии [*Герасимова и др*., 2010; *Симакова и др*., 2012; Цифровая…, 2012; *Grunwald et al*., 2011; *Hartemink, Sonneveld*, 2013; *Lagacherie et al*., 2006]. Возможности электронных карт очень широки [Цифровая..., 2012; *Minasny, McBratney*, 2015], тем не менее информация, содержащаяся в архивных картографических материалах, не утратила своего значения [*Королюк, Овечкин,* 2010; *Yang et al*., 2011; *Kempen et al*., 2015]. Работы по переводу картографических источников в цифровой вариант и создание электронных версий карт в настоящее время весьма актуальны из-за ветхого состояния старых бумажных карт и ограниченной возможности их использования [*Савин, Овечкин,* 2014; *Симакова и др*., 2012; Цифровая…, 2012; *Savin et al*., 2019; *Kempen*, 2011].

В 1950-х гг. под руководством О.М. Михайловской была создана самая подробная на настоящее время почвенная карта Карелии (ПКК) м-ба 1: 500 000; в оригинальном варианте карта состоит из 6-ти листов [*Михайловская*, 1951]. Карта имела и имеет большое научное и практическое значение и использовалась для создания тематических почвенных карт. Тем не менее она не была издана и имеется в единственном экземпляре в фонде лаборатории лесного почвоведения Института леса КарНЦ РАН. В связи с этим сотрудниками лаборатории в 2010–2012 гг. была составлена её первая электронная

[1] Forest Research Institute of KarRC RAS, Pushkinskaya str., 11, 185910, Petrozavodsk, Russia;
e-mail: **akhmetova@krc.karelia.ru**
[2] Institute of Biology Institute KarRC RAS, Pushkinskaya str., 11, 185910, Petrozavodsk, Russia

версия. Работа выполнена на единообразной картографической основе цифровой карты Карелии ГП «Аэрогеодезия» [Каталог…, 2001]. В итоге проведённых работ был составлен векторный слой «Почвы Карелии», состоящий из 19 345 полигонов, которые соответствуют почвенным контурам с автоматически связанной таблицей атрибутивной информации [*Ахметова, Бахмет,* 2013].

Перевод в электронный формат ПКК позволяет с помощью ГИС-технологий проводить сопряжённый анализ с другими картографическими материалами и современными космическими снимками с целью её обновления [*Королюк, Овечкин,* 2010; *Савин, Овечкин*, 2014; *Yang et al.*, 2011; *Kempen et al.*, 2015]. В процессе анализа созданной электронной ПКК встал вопрос о необходимости актуализации её тематической информации для более точного отражения современного состояния почвенного покрова.

Особую важность имеет обновление информации о болотных почвах региона, где болота и заболоченные земли занимают около 30 % территории, а в отдельных приморских районах — 70–80 % [Болотные экосистемы…, 2006]. С середины XX в. сотрудниками лаборатории болотных экосистем Института биологии КарНЦ РАН были проведены масштабные исследования болотных массивов [*Антипин, Токарев*, 1991; *Елина, Кузнецов,* 2006; Структура растительности…, 1983; Торфяные месторождения…, 1979; *Юрковская*, 1988]. В настоящее временя создана геоинформационная система (ГИС) «Болота Карелии» [*Токарев*, 2005; *Токарев, Антипин*, 2016], которая содержит в электронном виде серию карт и «бесценную коллекцию» дешифровочных планшетов на всю территорию Карелии, какой «нет не только в нашей стране, но и в каком-либо регионе мира, сравниваемым по площади с Карелией» [*Юрковская, Елина*, 2005, с. 4].

Таким образом, целью данной статьи явилась разработка подходов к идентификации болотных почв для актуализации электронной почвенной карты Карелии м-ба 1: 500 000 на основе современных геоинформационных технологий и её обновление с помощью разработанного алгоритма.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На первой версии электронной ПКК легенда состояла из 12 разделов почв и 33 почвенных разностей, различающихся по генезису и антропогенному использованию [*Ахметов, Бахмет*, 2013]. В процессе создания электронной версии ПКК при переводе атрибутивной информации с основы бумажной карты в электронную таблицу карты была выявлена проблема идентификации типов болотных почв. В большинстве случаев было затруднительно или невозможно устанавливать различия в оттенках голубого и зеленовато-голубого цветов, которые были использованы для показа различных типов болотных почв. Кроме того, в некоторых местах бумажной карты из-за её ветхого состояния цвета почвенных контуров были искажены.

На рис. 1 представлено обзорное изображение почвенной карты Карелии до проведения работ по идентификации болотных почв. Из-за мелкого масштаба контуры некоторых почвенных типов, близких по квалификационной принадлежности, были объединены. Также не показаны некоторые почвы, которые занимают незначительные площади.

Визуально хорошо прослеживается, что болотные почвы распространены по всей территории республики; количество их контуров очень велико — 11 286 из 19 345 всех контуров ПКК. В связи с возникшими сложностями при идентификации контуров почв, большая часть (96 %) контуров болотных почв была отнесена к блоку «Болотные неопределённые» [*Ахметова, Токарев*, 2015], т.е. подавляющее большинство болотных контуров не имели чёткой типологической принадлежности (табл. 1).

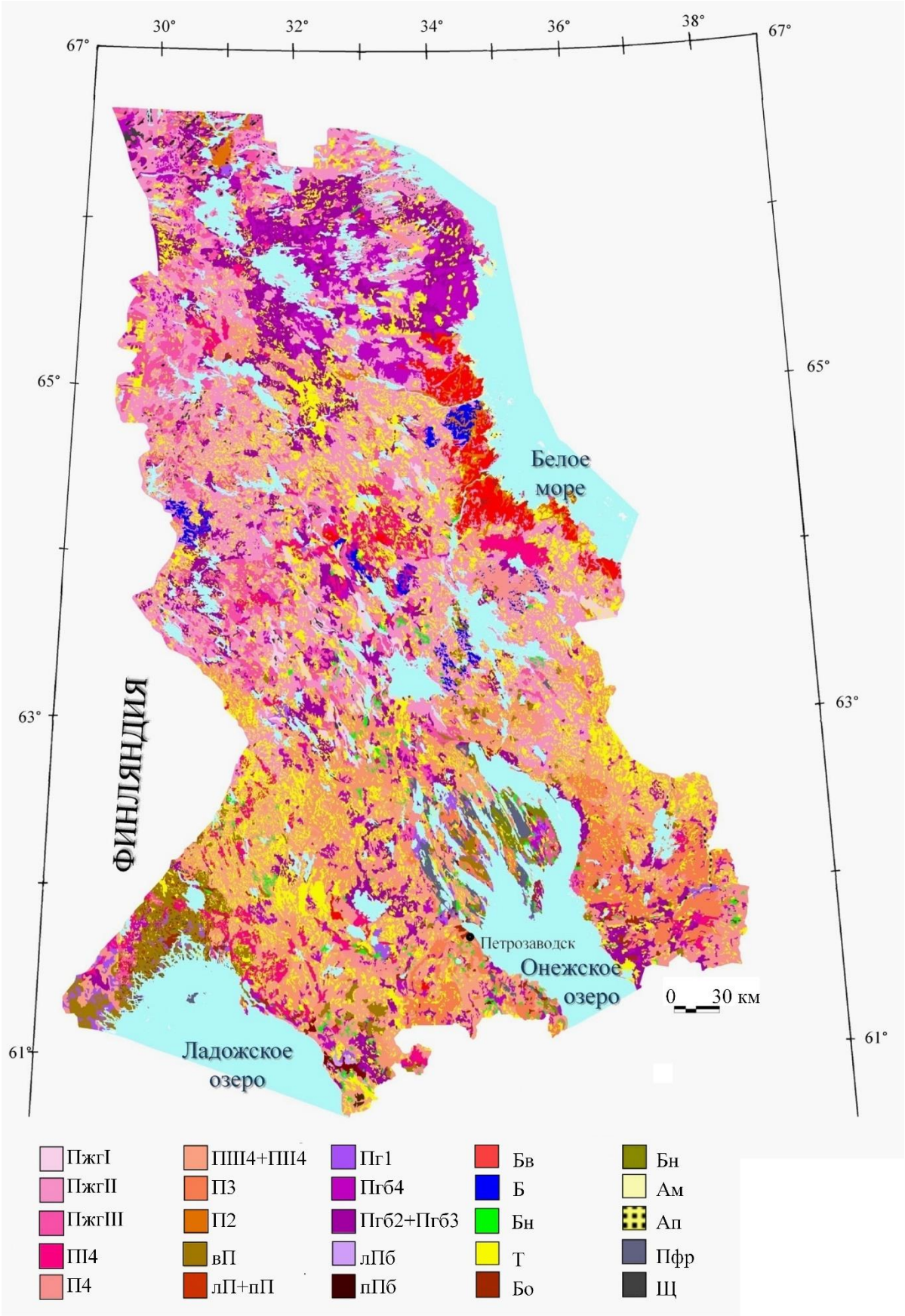


Рис. 1. Почвенная карта Карелии до проведения работ по идентификации болотных почв
Fig. 1. Soil map of Karelia before the peat bog soils identification effort

Расшифровка сокращений в легенде

ПжгIII	Подзолы иллювиально-железистые гумусовые среднемощные — мощность горизонта А2 более 5 см (содержание гумуса от 1 до 2–3 %)
ПжгII	Подзолы иллювиально-железистые гумусовые среднемощные языковатые
ПжгI	Подзолы иллювиально-железистые гумусовые маломощные языковатые — мощность А2 менее 5 см
ПIII4	Подзолы среднемощные — мощность А2 более 5 см
ПII4	Подзолы среднемощные языковатые
ПI4	Подзолы маломощные — мощность А2 менее 5 см
П4	Подзолы маломощные языковатые
П3	Сильно-подзолистые почвы
П2	Средне-подзолистые почвы
П1	Сильно-подзолистые почвы (со слабовыраженным дерновым процессом)
вП	Подзолистые вторично лесные бывшие освоенные и видоизменённые
лП	Подзолистые залужённые почвы
пП	Подзолистые пахотные почвы
Пгб4	Торфянистые и торфяные подзолы глеевые иллювиально-многогумусовые
Пгб3	Торфянистые подзолы глееватые иллювиально-железисто-гумусовые иногда ортзандровые
Пгб2	Торфянистые подзолы глееватые иллювиально-железисто-гумусовые ортзандровые
лПб	Подзолисто-болотные залужённые
пПб	Подзолисто-болотные пахотные
Бв	Болотные верховые торфяные
Б	Болотные переходные и смешанные торфяные
Бн	Болотные низинно-переходные и низинные торфяно-перегнойные
Т	Болотные неопределённые
Бо	Болотные осушенные
Д	Дерновые неоподзоленные темноцветные (на шунгитах)
пД	Дерновые темноцветные неоподзоленные (на шунгитах) пахотные
зД	Дерновые темноцветные неоподзоленные (на шунгитах) залужённые
Ам	Аллювиальные маршевые
Ап	Аллювиальные пойменные
Пфр	Фрагментарные подзолы с близким подстиланием пород
Щ	Торфянисто-перегнойно-щебёнчатые неоподзоленные на выходах кристаллических пород
Гт	Горно-тундровые примитивные
Гжгп	Горные подзолы иллювиально-железисто-гумусовые

В процессе работы были использованы оцифрованные картографические материалы упомянутой ранее ГИС «Болота Карелии»:

- региональные торфяные карты [Карта торфяного фонда…, 1957; Карта торфяных месторождений…, 1980];
- карта растительности болот Карельской АССР [1968];
- планшеты дешифровки болотной растительности по аэрофотоснимкам и ряд геоботанических описаний болот при наземных исследованиях с использованием материалов дистанционного зондирования Земли по методике Е.А. Галкиной [1964];
- топографические карты масштаба 1: 200 000;
- цифровые космические снимки Landsat 7.

Все работы по идентификации проводились в оболочке программного продукта MapInfo 8.5 с выборкой почвенных контуров из разделов «Болотные почвы» и «Болотные почвы, видоизменённые с.х. культурой». Процесс идентификации проводился с использованием метода последовательного наложения тематических слоёв: выборку болотных почв ПКК на вышеобозначенные слои ГИС «Болота Карелии». Уточнённую информацию вносили в атрибутивную базу почвенных данных, автоматически связанную с контурами почв.

Табл. 1. Болотные почвы на первом варианте электронной ППК
Table 1. Bog peat soils in the first version of the digital soil map of Karelia

Болотные почвы	Количество контуров		Площадь	
	шт.	%	км^2	%
Болотные верховые торфяные	38	0,3	2 804	9,3
Болотные переходные и смешанные торфяные	139	1,2	1 137	3,8
Болотные низинно-переходные и низинные торфяно-перегнойные	275	2,4	940	3,1
Болотные неопределённые	10 827	96	25 113	83,7
Болотные осушенные	7	0,1	41	0,1
Всего	**11 286**	**100**	**30 033**	**100**

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Модернизация и корректировка карты проводилась последовательно; была выработана следующая схема. На начальном этапе работы использовалась информация электронной версии Карты торфяных месторождений Карельской АССР (КТМ) [1980]. На данной карте имеется информация о типологической характеристике 4 713 торфяных месторождений общей площадью 26 000 км^2. Легенда торфяной карты включает следующие типы болотных массивов: «Верховой», «Переходный или смешанный», «Низинный» и «Неопределенный»; в основу их выделения положены одноимённые типы торфяной залежи. Для корректного использования данных этой карты при идентификации болотных почв на ПКК была проведена корреляция легенд указанных карт (табл. 2); характер водно-минерального питания по КТМ совпадает с типом болотной почвы на ПКК.

В итоге проведённых работ на данном этапе была определена типологическая принадлежность большей части неопределённых контуров болотных почв. Тем не менее значительное количество контуров, распространённых в основном в северной, западной (вдоль государственной границы) и центрально-восточной частях Карелии остались без информации.

Табл. 2. Корреляция легенд почвенной карты Карелии и карты торфяного фонда
Table 2. Correlation between the legends of the soil map and the map of peat reserves

Блоки типов болотных почв по легенде ПКК	Занимаемая площадь, %	Тип торфяных месторождений по легенде КТФ	Занимаемая площадь, %
Болотные верховые торфяные	9,3	Верховой	22,4
Болотные переходные и смешанные торфяные	3,8	Переходный или смешанный	35,7
Болотные низинно-переходные и низинные торфяно-перегнойные	3,1	Низинный	11,7
Болотные неопределённые	83,7	Неопределённый	30,6

На следующем этапе работы использовались сведения Карты растительности болот Карельской АССР м-ба 1: 600 000 (КРБ), легенда которой впоследствии была обновлена Т.К. Юрковской [*Юрковская, Елина*, 2009]. Основной единицей в легенде КРБ являются типы болотных массивов, которые выделялись по преобладающему типу растительности и её распределению в экологическом ряду от центра к окраинам. Электронная версия данной карты, составленная с использованием контуров болот топографических карт м-ба

1: 200 000, содержит 13 674 контуров, общая площадь которых составляет 19 300 км^2 [*Токарев, Антипин*, 2016].

Проведена корреляция легенд карт ППК и КРБ (табл. 3). К блоку почв «Болотные верховые торфяные» отнесены три типа болотных массивов дистрофного и олиготрофного типов питания. Блок «Болотные переходные и смешанные торфяные» соответствуют 4 типам болот с преимущественно мезоолиготрофным и мезотрофным типами питания. Блок «Болотные низинно-переходные и низинные торфяно-перегнойные» соотнесён с осоковыми и лесными болотами с евтрофным и евтрофно-мезотрофным типами питания.

В процессе работы было решено добавить новый блок болотных почв в легенду обновляемой ПКК с названием «Болотные переходно-низинные торфяные». В данную категорию, в соответствии с КРБ, внесены доминирующие на севере региона евтрофно-мезотрофные грядово-мочажинные и грядово-озерковые в центре болотные массивы типа аапа. На севере Карелии широко распространены аапа-болота с низинным торфом; данные болотные массивы не могут относиться ни к блоку «Болотные переходные и смешанные торфяные», ни к блоку «Болотные низинно-переходные и низинные торфяно-перегнойные». Выделение отдельно болотных почв переходно-низинного типа связано с тем, что они являются своеобразными природными образованиями, их торфяная залежь может относиться к низинной и переходной.

Табл. 3. Корреляция легенд почвенной карты Карелии и карты растительности болот
Table 3. Correlation between the legends of the soil map and the map of mire vegetation

ПКК, типы болотных почв	**Номер и типы болотных массивов по КРБ с изменениями [*Юрковская, Елина*, 2005]**
Болотные верховые торфяные	1. Кустарничково-лишайниковые дистрофные со вторичными озерками и денудированными мочажинами в центре (южноприбеломорский тип)
	2. Сфагновые с олиготрофным грядово-мочажинным комплексом в центре и кустарничково-травяно-сфагновой облесённой или безлесной периферией
	3. Сосново-кустарничково-сфагновые или кустарничково-сфагновые олиготрофные и мезоолиготрофные
Болотные переходные и смешанные торфяные	4. Пушицево-сфагновые мезоолиготрофные с очень разреженной сосной по краю
	5. Осоково-сфагновые мезотрофные с редкой берёзой и сосной
	6. Сфагновые с мезоолиготрофным грядово-мочажинным центром и кустарничково-пушицево-сфагновой периферией
	7. Травяно-моховые (травяно-гипновые, молиниево-осоково- или шейхцериево-сфагновые) в центре с облесённой периферией, преимущественно мезотрофные
Болотные переходно-низинные торфяные	8. Евтрофно-мезотрофные грядово-мочажинные и грядово-озерковые в центре (гряды — сфагновые, мочажины травяные или гипновые) с сосново-кустарничково-травяно-сфагновой периферией (тип аапа)
Болотные низинно-переходные и низинные торфяно-перегнойные	9. Крупно- или мелкоосоковые евтрофные, иногда с гипновым или слабо развитым сфагновым покровом
	10. Лесные евтрофные и мезотрофные, преимущественно сосновые с примесью берёзы и ели, иногда берёзовые или еловые
Болотные осушенные	11. Осушенные для добычи торфа болотные массивы
Болотные неопределённые	12. Неустановленного типа

Для выявления современного состояния болотных почв Карелии привлечены материалы дистанционного зондирования — космические снимки, на которых чётко видны тёмные линии мелиоративных каналов на фоне более светлых участков болот [*Токарев,* 2005]. Данная информация способствовала более эффективной идентификации болот, которые были подвергнуты мелиорационным работам; было выявлено более 1 000 контуров осушенных болотных почв общей площадью 4 296 км^2.

В отдельных случаях для определения типов болотных массивов при отсутствии информации на картах КТМ и КРБ использовалась информация, имеющаяся на планшетах дешифровки растительности болот по аэрофотоснимкам, и сами аэрофотоснимки.

Процессу идентификации контуров болотных почв препятствовал ряд проблем, для преодоления которых были выработаны определённые методические приёмы:

1. При наложении слоя болотных почв ПКК на слои «Торфяные месторождения» ГИС «Болота Карелии» некоторые контуры болотных почв располагаются на месте распространения двух и более полигонов, относящихся к различным типам болот. Согласно принципу генерализации для идентификации подобных «спорных» контуров использовалось название преобладающего по площади типа болотного массива.

2. В случаях, когда в границы контура ПКК попадали полигоны разных типов болотных массивов примерно в равных долях, почвенный полигон делился на соответствующие им части.

3. На севере Карелии в приграничной зоне на картах ГИС «Болота Карелии» выявлено наличие небольших по площади (1–2 км^2) болотных массивов, которые на ПКК не были нанесены. Решено внести в атрибутивную базу данных ПКК в строку «Сопутствующие комплексы» распространённой в данном месте почвы сведения о включениях в их состав комплексов болотных почв.

4. При наложении контуров болотных почв ПКК на космоснимки и топографические карты выяснилось, что значительное количество (878 шт.) небольших по площади полигонов попали на незаболоченные территории. В этих случаях объект удалялся из болотных почв и переводился в блок «Почвы, выведённые из болотного фонда». Впоследствии данные контуры соединялись с контурами прилегающих почв.

5. Некоторое количество контуров (134 шт.) при наложении на гидрографическую основу совпали по конфигурации и местоположению с водными объектами (озёрами, реками). Данные объекты элиминировались из почвенных блоков и временно переведены в блок «Водные объекты».

В результате проведённых действий большая часть неопределённых контуров были идентифицированы и переведены в блоки: «Болотные верховые торфяные», «Болотные переходные и смешанные торфяные», «Болотные переходно-низинные торфяные», «Болотные низинные торфяно-перегнойные» и «Болотные осушенные» (табл. 4). Вместе с тем остались неопределёнными 2 026 контуров с общей площадью 2 148 км^2. В основном это объекты, имеющие площадь менее 1 км^2 и, как правило, расположенные в приграничной территории Карелии, где болотные почвы и торфяно-болотный фонд недостаточно изучены.

Табл. 4. Болотные почвы на почвенной карте Карелии после работ по их идентификации
Table 4. Wetland soils on the soil map of Karelia after their identification effort

Болотные почвы	**Количество контуров**		**Площадь**	
	шт.	**%**	**км^2**	**%**
Болотные верховые торфяные	2 719	23,6	9 639	32,2
Болотные переходные и смешанные торфяные	1 899	16,5	6 380	21,3
Болотные переходно-низинные торфяные	2 590	22,4	6 212	20,8
Болотные низинные торфяно-перегнойные	105	0,9	284	1,0
Болотные неопределённые	2 026	17,6	2 148	7,2
Болотные осушенные	1 190	10,3	4 296	14,4
Почвы, выведённые из блоков болотных почв	878	7,6	797	2,7
«Водные объекты»	134	1,2	134	0,4
Всего	**11 541**	**100**	**29 890**	**100**

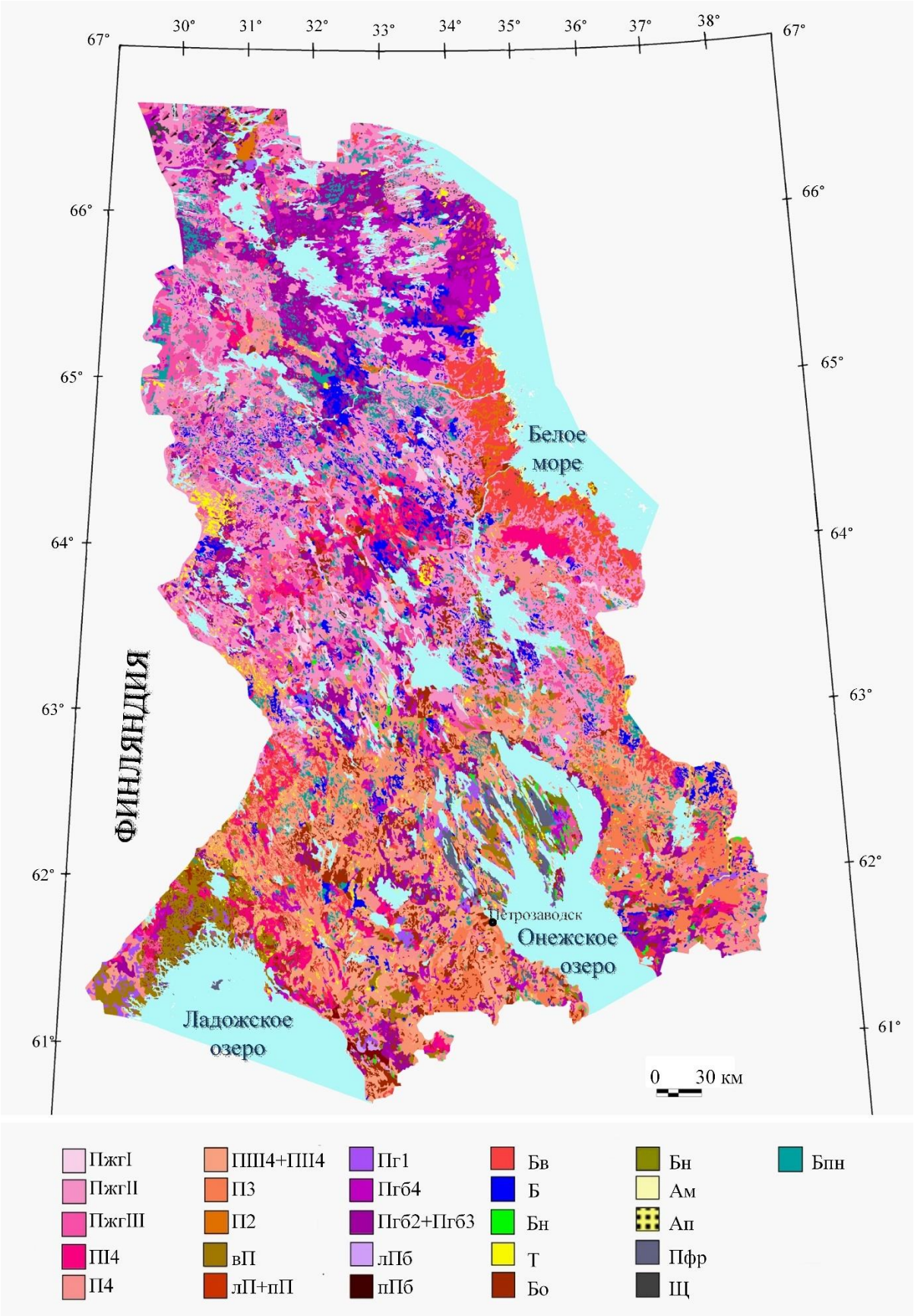


Рис. 2. Почвенная карта Карелии после работ по идентификации болотных почв
Fig. 2. Soil map of Karelia after the identification of wetland soils

На основе актуализированных данных построена новая картосхема почв Карелии (рис. 2), которая наглядно демонстрирует внесённые изменения.

Согласно ей, в северной части Карелии преобладают болотные переходно-низинные торфяные почвы типа аапа. Центральная часть республики характеризуется разнообразием типов болотных почв. В районе побережья Белого моря широко распространены почвы верховых болот. Болотные низинные торфяно-перегнойные почвы занимают небольшие территории и в основном распространены в южной части республики и на Заонежском полуострове.

ВЫВОДЫ

Представлен подход идентификации типологической принадлежности болотных почв на электронных почвенных картах, основанный на применении ГИС-технологий. В результате проведённых работ площадь неопределённых болотных контуров на почвенной карте Карелии м-ба 1: 500 000 сократилась с 83,7 до 7,2 %. На данном этапе работы главное внимание уделялось актуализации информации о типах болотных почв в базе атрибутивных данных электронной карты. Вместе с тем в процессе работы было установлено, что возникает необходимость изменить некоторые контуры болотных почв на следующем этапе обновлении ПКК.

БЛАГОДАРНОСТИ

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания Института леса КарНЦ РАН.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out under state order to the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Forest Research Institute of KRC RAS).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антипин В.К., Токарев П.Н.* Охраняемые болота Карелии. Петрозаводск: КарНЦ АН СССР, 1991. 46 с.
2. *Ахметова Г.В., Бахмет О.Н.* Цифровая версия почвенной карты Карелии масштаба 1: 500 000. Разнообразие лесных почв и биоразнообразие лесов. Сборник материалов V Всерос. науч. конф. по лесному почвоведению с междунар. участием. Пущино: ИФХиБПП РАН, 2013. С. 27–29.
3. *Ахметова Г.В., Токарев П.Н.* Использование ГИС «Болота Карелии» для коррекции и обновления электронной почвенной карты региона. Болота Северной Европы: разнообразие, динамика и рациональное использование. Международный симпозиум (Петрозаводск, 2–5 сентября 2015 г.). Тезисы докладов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 12.
4. Болотные экосистемы севера Европы: разнообразие, динамика, углеродный баланс, ресурсы и охрана. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 396 с.
5. *Галкина Е.А.* Методы использования аэрофотоснимков для типизации и картирования болотных массивов. Болота и заболоченные земли Карелии. Петрозаводск: Карельское книжное издательство, 1964. С. 5–33.
6. *Герасимова М.И., Гаврилова И.П., Богданова М.Д.* Мелкомасштабное почвенное картографирование. М.: Географический факультет МГУ, 2010. 119 с.
7. *Елина Г.А., Кузнецов О.Л.* История и современное состояние исследования болот Карелии (55 лет лаборатории болотных экосистем). Болотные экосистемы севера Европы: разнообразие, динамика, углеродный баланс, ресурсы и охрана. Петрозаводск: Институт биологии КарНЦ РАН, 2006. С. 11–34.
8. Карта растительности болот Карельской АССР. Рукопись. Фонды Института биологии КарНЦ РАН. Петрозаводск, 1968. 2 л.

9. Карта торфяного фонда Карельской АССР. М-б 1: 600 000. М., 1957. 1 л.
10. Карта торфяных месторождений Карельской АССР. М-б 1: 500 000. М., 1980. 4 л.
11. Каталог озёр и рек Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 290 с.
12. *Королюк Т.В., Овечкин С.В.* Подходы к модернизации государственной почвенной карты России на основе методов цифровой картографии. Почвоведение, 2010. № 5. С. 527–537.
13. *Михайловская О.Н.* Обзорная почвенная карта КФССР для Всесоюзной сельскохозяйственной выставки. Научная сессия, посвященная итогам научно-исследовательских работ Филиала за 1946−1950 гг. Петрозаводск: Карело-Финский филиал Академии наук СССР, 1951. С. 25.
14. *Савин И.Ю., Овечкин С.В.* Об обновлении среднемасштабных почвенных карт. Почвоведение, 2014. № 10. С. 1184–1192. DOI: 10.7868/S0032180X14100128.
15. *Симакова М.С., Рухович Д.И., Королёва П.В., Вильчевская Е.В., Калинина Н.В.* Цифровая версия государственной почвенной карты масштаба 1:1 млн, проблемы и решения. Почвоведение, 2012. № 4, С. 387–397.
16. Структура растительности и ресурсы болот Карелии. Петрозаводск: КНЦ РАН, 1983. 178 с.
17. *Токарев П.Н.* Разработка методики дешифрирования на космоснимках основных типов болотных участков Карелии с использованием материалов наземных и дистанционных исследований на основе ГИС-технологий. Труды Карельского научного центра РАН, 2005. Вып. 8. С. 65–78.
18. *Токарев П.Н., Антипин В.К.* Геоинформационная система «Болота Карелии». Роль науки в решении проблем региона и страны: фундаментальные и прикладные исследования. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвящённой 70-летию КарНЦ РАН (г. Петрозаводск, 24–27 мая 2016 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. С. 216–217.
19. Торфяные месторождения Карельской АССР. М., 1979. 636 с.
20. *Федорец Н.Г., Морозова Р.М., Синькевич С.М., Загуральская Л.М.* Оценка продуктивности лесных почв Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. 195 с.
21. Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 2012. 350 с.
22. *Юрковская Т.К.* География и картография растительности болот европейской России и сопредельных территорий. СПб.: Ботанический институт имени В.Л. Комарова РАН, 1992. 255 с.
23. *Юрковская Т.К.* Картографирование болотных систем. Геоботаническое картографирование. Л.: АН СССР, Ботанический институт имени В.Л. Комарова, 1988. С. 13–28.
24. *Юрковская Т.К., Елина Г.А.* Восстановленная растительность Карелии на геоботанической и палеокартах. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2009. 136 с.
25. *Юрковская Т.К., Елина Г.А.* Картографический анализ болот Северо-Востока Карелии. Биоразнообразие, динамика и ресурсы болотных экосистем Восточной Фенноскандии. Труды Карельского научного центра Российской академии наук, 2005. Вып. 8. С. 6–14.
26. *Grunwald S., Thompson J.A., Boettinger J.L.* Digital soilmapping and modeling at continental scales: Finding solutions for global issues. Soil Science Society of America Journal, 2011. V. 75. Iss. 4. P. 1201–1213. DOI: 10.2136/sssaj2011.0025.
27. *Hartemink A.E., Sonneveld M.P.W.* Soil maps of the Netherlands. Geoderma, 2013. V. 204−205. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.03.022.
28. *Kempen B.* Updating soil information with digital soil mapping. PhD thesis. Wageningen: Wageningen University, 2011.
29. *Kempen B., Brus D.J., de Vries F.* Operationalizing digital soil mapping for nationwide updating of the 1: 50 000 soil map of the Netherlands. Geoderma, 2015. No. 241–242. P. 313–329. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.11.030.

30. *Lagacherie P., McBratney A., Voltz M.* Digital soil mapping: An introductory perspective. Elsevier, 2006. V. 31. P. 12–28.
31. *Minasny B., McBratney A.B.* Digital soil mapping: A brief history and some lessons. Geoderma, 2015. V. 184. P. 301–311. DOI: 10.1016/B978-0-12-386941-8.00021-6.
32. *Savin I.Yu., Zhogolev A.V., Prudnikova E.Yu.* Modern trends and problems of soil mapping. Eurasian Soil Science, 2019. V. 52. P. 471–480. DOI: 10.1134/S1064229319050107.
33. *Yang L., Jiao Y., Fahmy S., Zhu A., Hann S., Burt J.E., Qi F.* Updating conventional soil maps through digital soil mapping. Soil Science Society of America Journal, 2011. V. 75. No 3. P. 1044–1053. DOI:10.2136/sssaj2010.0002.

REFERENCES

1. *Akhmetova G.V., Bakhmet O.N.* Digital version of soil map of Karelia, scale 1: 500 000. Soil diversity and biodiversity in the middle-taiga ecosystem. Proceedings of IV All-Russian conference devoted forest soil science. Pushchino: Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of RAS, 2013. P. 27–29 (in Russian).
2. *Akhmetova G.V., Tokarev P.N.* Applying of GIS “Mires of Karelia” for updating electronic soil map. Mires of northern Europe: biodiversity, dynamics, management (Russia, Petrozavodsk, September 2–5, 2015). Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. P. 12 (in Russian).
3. *Antipin V.K., Tokarev P.N.* Reserved mires of Karelia. Petrozavodsk: KarRC of the USSR Academy of Sciences, 1991. 46 p. (in Russian).
4. Catalog of Karelian lakes and rivers. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2001. 290 p. (in Russian).
5. Digital soil mapping: theoretical and experimental studies. Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute, 2012. 350 p. (in Russian).
6. *Elina G.A., Kuznetsov O.L.* History and current state of Karelian mires research. Mires ecosystem of northern Europe: diversity, dynamics, carbon balance, resources, protection. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2006. P. 11–34 (in Russian).
7. *Fedorets N.G., Morozova R.M., Sin’kevich S.M., Zagural’skaya L.M.* Productivity assessment of forest soils of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2000. 195 p. (in Russian).
8. *Galkina E.A.* Methods of applying aerosatelite images for mire typification and mapping. Mires and wetlands of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1964. P. 5–33 (in Russian).
9. *Gerasimova M.I., Gavrilova I.P., Bogdanova M.D.* Small scale soil mapping: study guide. Moscow: Faculty of Geography of MSU, 2010. 119 p. (in Russian).
10. *Grunwald S., Thompson J.A., Boettinger J.L.* Digital soilmapping and modeling at continental scales: Finding solutions for global issues. Soil Science Society of America Journal, 2011. V. 75. Iss. 4. P. 1201–1213. DOI: 10.2136/sssaj2011.0025.
11. *Hartemink A.E., Sonneveld M.P.W.* Soil maps of the Netherlands. Geoderma, 2013. V. 204–205. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.03.022.
12. *Kempen B.* Updating soil information with digital soil mapping. PhD thesis. Wageningen: Wageningen University, 2011.
13. *Kempen B., Brus D.J., de Vries F.* Operationalizing digital soil mapping for nationwide updating of the1: 50 000 soil map of the Netherlands. Geoderma, 2015. No 241–242. P. 313–329. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.11.030.
14. *Korolyuk T.V., Ovechkin S.V.* Approaches of updating of Russian State Soil Map on basis of digital mapping. Eurasian Soil Science, 2010. No 5. P. 527–537 (in Russian).
15. *Lagacherie P., McBratney A., Voltz M.* Digital soil mapping: An introductory perspective. Elsevier, 2006. V. 31. P. 12–28.
16. *Mikhailovskaya O.N.* Overview soil map of Karelian ASSR for nationwide agriculture exhibition. Scientific session devoted to scientific-research results of Karelian research branch. Petrozavodsk: Karelian-Finnish branch of the USSR Academy of Sciences, 1951. P. 25 (in Russian).
17. *Minasny B., McBratney A.B.* Digital soil mapping: A brief history and some lessons. Geoderma, 2015. V. 184. P. 301–311. DOI: 10.1016/B978-0-12-386941-8.00021-6.

18. Mires ecosystems of the North of Europe: diversity, dynamics, carbon balance, resources and conservation. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2006. 396 p. (in Russian).
19. Mires vegetation map of Karelia. Manuscript. Fond of Institute of Biology of KarSC RAS. Petrozavodsk, 1968. 2 sh. (in Russian).
20. Peat deposits of Karelian ASSR. Moscow, 1979. 636 p. (in Russian).
21. Peat deposits map of Karelian ASSR. Scale 1: 500 000. Moscow, 1980. 4 sh. (in Russian).
22. Peat fond map of Karelian ASSR. Moscow, 1957. 1 sh. (in Russian).
23. *Savin I.Yu., Ovechkin S.V.* On the updating of medium-scale soil maps. Eurasian soil science, 2014. No 10. P. 1184–1192 (in Russian).
24. *Savin I.Yu., Zhogolev A.V., Prudnikova E.Yu.* Modern trends and problems of soil mapping. Eurasian Soil Science, 2019. V. 52. P. 471–480. DOI: 10.1134/S1064229319050107.
25. *Simakova M.S., Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Vil'chevskaya E.V., Kalinina N.V.* Digitized version of the State Soil Map on a scale of 1: 1 mn: problems and solutions. Eurasian Soil Science, 2012. No 4. P. 387–397 (in Russian).
26. Structure of vegetation and resources of Karelian mires. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1983. 178 p. (in Russian).
27. *Tokarev P.N.* The development of methods for designation of main mire types from space images with using data of land surface and distant sampling based on GIS-technologies. Transactions of the Karelian Research Centre of RAS, 2005. Iss. 8. P. 65–78 (in Russian).
28. *Tokarev P.N., Antipin V.K.* GIS "Mires of Karelia". Role of science in solution of problems of region and state: fundamental and applied investigations. Proceedings of All-Russian conference, devoted to 70th anniversary of KarRC of RAS. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2016. P. 216–217 (in Russian).
29. *Yang L., Jiao Y., Fahmy S., Zhu A., Hann S., Burt J.E., Qi F.* Updating conventional soil maps through digital soil mapping. Soil Science Society of America Journal, 2011. V. 75. No 3. P. 1044–1053. DOI:10.2136/sssaj2010.0002.
30. *Yurkovskaya T.K.* Geography and mapping of mire vegetation of European Russia and neighbouring territories. Saint-Petersburg: Komarov Botanical Institute of RAS, 1992. 256 p. (in Russian).
31. *Yurkovskaya T.K.* Mapping of mire systems. Geobotanical mapping. Leningrad: USSR Academy of Sciences, Komarov Botanical Institute, 1988. P. 13–28 (in Russian).
32. *Yurkovskaya T.K., Elina G.A.* Mapping analysis of mires of North-East of Karelia. Biodiversity, dynamic and resources of mires ecosystems of Eastern Fennoscandia. Transactions of the Karelian Research Centre of RAS, 2005. Iss. 8. P. 6–14 (in Russian).
33. *Yurkovskaya T.K., Elina G.A.* Recovering vegetation of Karelia on geobotanical and paleo maps. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2009. 136 p. (in Russian).

УДК: 528:004 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-79-94**

А.Н. Панин[1] В.М. Эшроков[2], Р.К. Махмудов[3], Н.В. Верозуб[4]

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ АГЛОМЕРАЦИИ КАВКАЗСКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД: ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПЛАНИРОВОЧНЫЕ АСПЕКТЫ

АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты исследования формирования и развития функционально-планировочной структуры городской агломерации Кавказских Минеральных Вод, как составной части системы расселения Ставропольского края и Северо-Кавказского федерального округа. Теоретически авторы опираются на концепцию единой системы расселения и опорного каркаса как сочетания узловых и линейных элементов, выражающих основные черты территориальной организации региона. В работе использованы различные источники количественной и качественной информации по Ставропольскому краю в целом, региону Кавказских Минеральных Вод и отдельных муниципальных образований: результаты социологических опросов населения, данные переписи, сведения о текущем социально-экономическом и демографическом положении территории, материалы государственной и ведомственной статистики, документы территориального планирования и градостроительного проектирования, собственные наблюдения и результаты «полевых» исследований территории. На основе этих данных дана общая характеристика агломерации КМВ, выполнен анализ пространственной организации расселения, определены современные тенденции её развития. Одним из результатов исследования является геоинформационная модель агломерации, в которой установлены её границы и состав, рассчитан коэффициент развитости, выполнен демографический прогноз по агломерации в целом и по отдельным муниципальным образованиям. Основой модели пространственной организации территории послужил планировочный каркас региона, включающий социальный, экономический, экологический, транспортный каркасы. Территория агломерации, несмотря на высокий уровень сформированности, отличается существенными контрастами, что позволяет выделить в её пределах разные зоны по уровню градостроительного освоения и роли в агломерации. С помощью методов геоинформационного картографирования созданы карты границ агломерации и транспортной доступности её ядер, перспективная структурно-планировочная модель региона КМВ. Авторы приходят к выводу, что проектные решения по развитию территорий в составе агломерации КМВ, приведённые в документах территориального планирования и градостроительного проектирования муниципальных образований, должны основываться на главной функции региона — эколого-курортной, которая даёт ему статус региона федерального значения. Следовательно, мероприятия, закреплённые в документах территориального планирования каждого муниципалитета, должны быть взаимосвязаны (как в плане иерархической соподчинённости, так и в общем контексте агломерационного развития территории) для устойчивого развития муниципальных образований и всей агломерации, сохранения окружающей среды и объектов культурного наследия.

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail:* **alex_panin@mail.ru**
[2] Северо-Кавказский федеральный университет, ул. Пушкина, д. 1, 355009, Ставрополь, Россия; *e-mail:* **eshrokov@mail.ru**
[3] Северо-Кавказский федеральный университет, ул. Пушкина, д. 1, 355009, Ставрополь, Россия; *e-mail:* **rakimkam@mail.ru**
[4] Северо-Кавказский федеральный университет, ул. Пушкина, д. 1, 355009, Ставрополь, Россия; *e-mail:* **verozub_95@mail.ru**

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Кавказские Минеральные Воды, городская агломерация, геоинформационные системы, градостроительство, пространственное развитие

Alexander N. Panin[1]**, Vitaliy M. Eshrokov**[2]**, Rakim K. Makhmudov**[3]**, Natalya V. Verozub**[4]

GEOINFORMATION ANALYSIS OF AGGLOMERATION OF THE CAUCASIAN MINERAL WATERS: ARCHITECTURAL AND FUNCTIONAL PLANNING ASPECTS

ABSTRACT

The article presents the results of research on the formation and development of the functional and planning structure of the urban agglomeration of the Caucasian Mineral Waters, as an integral part of the settlement system of the Stavropol territory and the North Caucasus Federal district. Theoretically, the authors rely on the concept of a single settlement system and a reference frame as a combination of nodal and linear elements that Express the main features of the territorial organization of the region. The paper uses various sources of quantitative and qualitative information on the Stavropol territory as a whole, the region of Caucasian Mineral Waters and individual municipalities: results of sociological surveys of the population, census data, information about the current socio-economic and demographic situation of the territory, materials of state and departmental statistics, documents of territorial planning and urban planning, own observations and results of "field" studies of the territory. Based on these data, a General characteristic of the CMS agglomeration is given, the spatial organization of settlement is analyzed, and current trends in its development are determined. One of the results of the study is a geographic information model of the agglomeration, which sets its boundaries and composition, calculates the coefficient of development, and makes a demographic forecast for the agglomeration as a whole and for individual municipalities. The model of spatial organization of the territory was based on the planning framework of the region, including social, economic, environmental, and transport frameworks. The territory of the agglomeration, despite its high level of formation, differs in significant contrasts, which makes it possible to distinguish different zones within it by the level of urban development and the role in the agglomeration. Using the methods of geoinformation mapping, maps of the agglomeration boundaries and transport accessibility of its cores were created, as well as a perspective structural and planning model of the CMS region. The authors come to the conclusion that the design decisions for the development of territories within the CMS agglomeration, given in the documents of territorial planning and urban planning of municipalities, should be based on the main function of the region — ecological and resort, which gives it the status of a region of Federal significance. Therefore, the measures set out in the territorial planning documents of each municipality must be interconnected (both in terms of hierarchical subordination and in the General context of agglomeration development of the territory) for the sustainable development of municipalities and the entire agglomeration, the preservation of the environment and cultural heritage.

KEYWORDS: Caucasian Mineral Waters, urban agglomeration, geoinformation systems, urban planning, spatial development

---

[1] Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail:* **alex_panin@mail.ru**
[2] North-Caucasus Federal University, Pushkin str., 1, 355017, Stavropol, Russia; *e-mail:* **eshrokov@mail.ru**
[3] North-Caucasus Federal University, Pushkin str., 1, 355017, Stavropol, Russia; *e-mail:* **rakimkam@mail.ru**
[4] North-Caucasus Federal University, Pushkin str., 1, 355017, Stavropol, Russia; *e-mail:* **verozub_95@mail.ru**

ВВЕДЕНИЕ

Стратегией пространственного развития Российской Федерации до 2025 г. одним из основных векторов социально-экономического развития страны определено приоритетное развитие городских агломераций. На территории Ставропольского края, в соответствии с этим документом, расположены 2 агломерации: Ставропольская и Кавказских Минеральных Вод (КМВ). Самым населённым и наиболее урбанизированным ареалом Ставрополья является агломерация Кавказских Минеральных Вод (Стратегия пространственного развития, 2019).

Территория агломерации Кавказских Минеральных Вод в силу своего полицентрического характера является уникальной не только на территории Ставропольского края и СКФО, но и в Российской Федерации. Из всех полицентрических агломераций страны (например, агломерации Кузбасса, Самарско-Тольяттинской, Тульско-Новомосковской) — это единственная высокоурбанизированная территория агломерированного расселения с приоритетом экологических функций и рекреационной специализацией. Эта специализация (функция) для территории КМВ определяет статус региона федерального значения. Особо охраняемый эколого-курортный регион Кавказские Минеральные Воды (далее — Регион КМВ, КМВ) представляет собой природно-ландшафтный комплекс площадью 5 800 км^2 и располагается на территории 3 субъектов Северо-Кавказского федерального округа — Ставропольского края, Карачаево-Черкесской Республики и Кабардино-Балкарской Республики[1].

Агломерация КМВ является центром этого уникального курортно-бальнеологическое образование, концентрируя на своей территории около 1 млн чел. (88,6 % численности населения региона КМВ и 38,1 % населения Ставропольского края). В настоящей работе рассматривается исключительно та часть региона, которая располагается на территории Ставропольского края и представляет собой собственно агломерацию КМВ.

Уникальность курортной и рекреационной специализации агломерации КМВ и статус одного из крупнейших курортов страны требуют особых подходов к территориальному планированию и градостроительному проектированию данной территории, основанных в т.ч. на комплексном геоинформационном анализе всех факторов и ограничений развития данной агломерации.

Несмотря на объективное существование агломерации в течение длительного времени, эта территория выделена в качестве устойчивой системы расселения региона только в проекте Схемы территориального планирования Ставропольского края[2]. В 2014 г. для территории КМВ была разработана схема территориального планирования[3], однако схема рассматривала Ставропольскую часть региона КМВ без упора на сложившуюся агломерированную систему расселения. До настоящего времени агломерация КМВ не имеет «официального статуса» в законодательной базе Ставропольского края (за исключением Закона Ставропольского края от 19.10.2019 № 74-кз[4]) (Внесение изменений, 2014). Всё это определяет сложности территориального планирования и градостроительного проектирования, поскольку документы муниципальных образований в составе агломерации практически не

---

[1] Постановление Правительства РФ от 06.07.1992 г. № 462

[2] Научно-исследовательская работа «Внесение изменений в схему территориального планирования Ставропольского края». Проект. Т. 2. Кн. 1. Концепция пространственного (градостроительного) планирования Ставропольского края. Концепция Ставропольской агломерации. Концепция агломерации КМВ. Ставрополь, 2018. С. 119.

[3] Внесение изменений в схему территориального планирования Кавказских Минеральных Вод. В 4-х т. Омск, 2014.

[4] Закон Ставропольского края от 10 октября 2019 г. № 74-кз «О государственной поддержке развития муниципальных образований Ставропольского края, расположенных в границах особо охраняемого эколого-курортного региона Российской Федерации — Кавказские Минеральные Воды»

учитывают интересы друг друга; в генеральных планах, СТП и др. нет даже приблизительных расчётов агломерационных эффектов от совместного градостроительного развития.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использованы сравнительно-географический, картографический, математико-статистический методы геоинформационного анализа и проектирования.

В качестве исходных данных использованы общедоступные материалы социально-экономической статистики, кадастрового учёта, текстовые и картографические материалы документов стратегического и территориального планирования (схем территориального планирования, генеральных планов и стратегий социально-экономического развития муниципальных образований КМВ), материалы массовых и экспертных социологических опросов, собственные исследования и наблюдения авторов.

В рамках исследования создана геоинформационная модель агломерации Кавказских Минеральных Вод, содержащая базу геоданных и картографические основы различных масштабов, содержащие информацию о современном состоянии и перспективах развития:

- сети городских и сельских населённых пунктов, системы расселения и социально-культурного обслуживания, проектных решений в организации расселения;
- транспортной и инженерной инфраструктур;
- окружающей природной среды, природно-экологического и градо-экологического каркасов территории;
- ЧС природного и техногенного характера;
- курортных зон (в т.ч. территориальных возможностей, ограничений и рисков);
- округов горно-санитарной охраны.

В целом использование ГИС-технологий и методов в рамках работы позволило решить следующие задачи:

- подготовить картографический блок, содержащий цифровую топографическую основу, цифровое космическое изображение, тематические картографические материалы;
- систематизировать социально-экономические показатели (демография, миграция, занятость, экономика, градостроительное развитие, транспортно-логистические связи);
- выявить особенности перспективного изменения застройки, формирования социальной инфраструктуры территории в контексте прогнозируемых изменений численности населения;
- определить основные направления и параметры пространственного развития территории агломерации;
- сформировать основные принципы устойчивого социально-экономического развития территории методами территориального планирования и градостроительного зонирования на основе рационального использования земель и их охраны, гармоничного развития инженерной, транспортной и социальных инфраструктур, охраны природы, защиты территории от воздействия чрезвычайных ситуаций природного и техногенного воздействия, повышения эффективности управления территорией.

Авторский коллектив принимает участие в разработке документов стратегического и территориального планирования Ставропольского края и муниципальных образований агломерации Кавказских Минеральных Вод.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Уникальность агломерации КМВ (помимо сказанного выше) определяется рядом отличительных особенностей:

- положение всей территории агломерации в пределах особо охраняемого эколого-курортного региона Кавказские Минеральные Воды;
- особый правовой статус территории;
- законодательно закреплённые границы региона и наличие документов территориального планирования для всей территории КМВ;
- положение в пределах городов-курортов федерального значения (Ессентуки, Железноводск, Кисловодск, Пятигорск) и выполнение ими функций ядер агломерации;
- особая роль железнодорожного транспорта в обеспечении внутриагломерационных связей.

Границы агломерации КМВ

Одним из наиболее сложных вопросов в выделении, функционировании и определении перспектив развития агломераций является делимитация (выделение) их границ. Исходный базовый интегральный критерий наличия агломерации — относительная целостность системы городских и сельских населённых пунктов в её составе.

В качестве критериев для выделения агломерации КМВ и делимитации её границ положены сложившиеся научные подходы [*Лаппо и др.*, 2010; *Наймарк*, 1985; *Перцик*, 2009; *Полян,*1988; *Полян и др.,*1988] и следующие базовые показатели:

- наличие городов с численностью населения более 100 тыс. чел;
- наличие не менее 2 городских поселений во внешней зоне агломерации, жители которых имеют относительно более высокую связь с большим (главным) городом, при этом их общая численность — не менее 10% от числа жителей города-центра;
- сельское население агломерации выступает на равных с городским (сельская местность включается на основе построения изохрон транспортной доступности каждого сельского поселения (групп сельских поселений));
- интенсивность связей поселений внешней зоны с главными городами агломерации — наличие устойчивых трудовых маятниковых корреспонденций с городами-центрами, наличием и границами пороговых межселенных связей населения;
- выявление зоны влияния рекреационных функций главного города на его окружение (определяется по размещению дачных поселений и учреждений отдыха и рекреации, зон массового отдыха жителей главного города);
- наличие сельскохозяйственных предприятий и их сельхозугодий, призванных обеспечивать главный город продовольствием;
- большой разрыв качества среды обитания между городом и сельской местностью;
- уровень и качество развитости агломерации.

Наиболее распространённым способом определения границ городских агломераций является метод изохрон — определение границ агломераций по затратам времени, необходимого для поездки в ядро (ядра) агломерации. Изохроны строятся относительно центров агломерации для затрат времени 0.5-, 1.0-, 1.5-часовых радиусов, что даёт возможность выявить соответствующие зоны. По условиям доступности центра агломерации можно определить границу агломерации (рис. 1).

Транспортная доступность определяет масштабы маятниковой миграции, которая в агломерации КМВ отличается максимальным показателем интенсивности. По нашим оценкам, величина маятниковых перемещений населения в пределах обозначенной территории составляет более 16 млн корреспонденций в год.

С учётом анализа комплекса критериев и метода изохрон, в состав агломерации Кавказских Минеральных Вод входят: город-курорт Пятигорск, город-курорт Кисловодск, город-курорт Ессентуки, город-курорт Железноводск, город Лермонтов, Минераловодский и Георгиевский городские округа, Предгорный район.

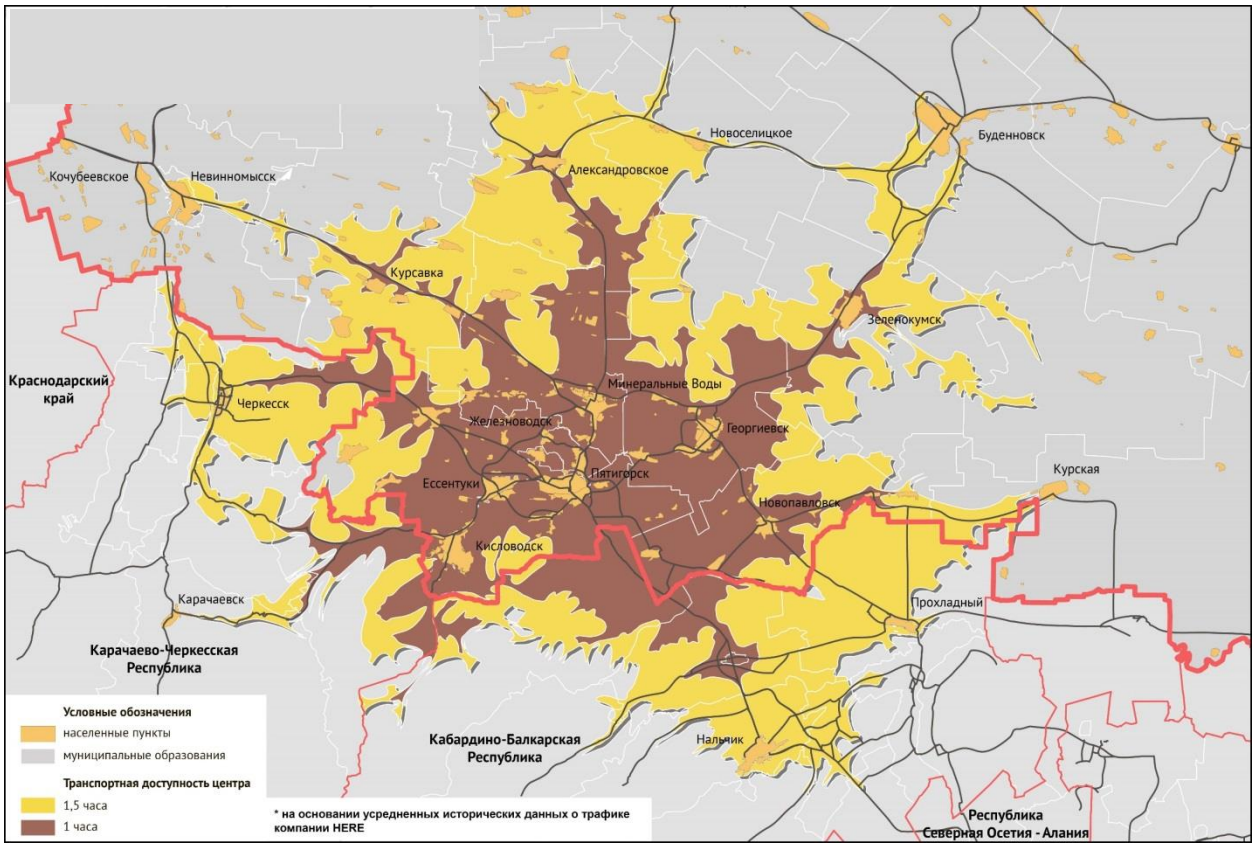


Рис. 1. Транспортная доступность ядер агломерации Кавказских Минеральных Вод
Fig. 1. Transport accessibility of the cores of the KMV agglomeration

Стоит отметить, что определение состава территории агломерации по административному принципу носит условный характер. В настоящее время в состав агломерации с учётом обозначенных выше критериев можно отнести некоторые населённые пункты за пределами указанных муниципальных образований.

При определённых обстоятельствах, с учётом 1,5-часовой транспортной доступности, влияние агломерации распространяется на Кировский, Советский городские округа, Андроповский и Александровский муниципальные районы. При реализации проектов строительства ВСМ железнодорожных магистралей в состав агломерации может быть включён город Будённовск (рис. 2).

Для подтверждения выделенных границ агломераций, а также степени процесса урбанизации используется коэффициент развитости, который предложен П.М. Поляном и рассчитывается по следующей формуле (1):

$$K\text{разв.} = P \times (M \times m + N \times n), \qquad (1)$$

где:

P — численность городского населения агломерации;

M и N — количество городов и посёлков городского типа соответственно;

m и n — их доли в городском населении агломерации соответственно.

Для того чтобы агломерация считалась сформировавшейся, К разв. должен быть больше 1,0 [*Лаппо и др.*, 2010].

Коэффициент развитости для агломерации КМВ составляет 4,33, что говорит о достаточно высоком уровне её сформированности и развитости. Вместе с тем в исследовании Е.В. Антонова и А.Г. Махровой [2019] максимальный коэффициент развитости для

агломерации КМВ составляет 5,2 — второй по значению после Махачкалинской агломерации в СКФО, что свидетельствует о высоком уровне сформированности агломерации. Однако авторы относят агломерацию КМВ к слаборазвитым агломерациям в России, что, по нашему мнению, достаточно спорно [*Антонов, Махрова*, 2019].

Пространственная модель организации агломерации КМВ

Пространственная организация территории агломерации определяется планировочным каркасом региона, включающим существующие социальный, экономический, экологический, транспортный каркасы с учётом перспектив их развития. Пространственное развитие планировочного каркаса рассматривается в границах региона в увязке с пространственной организацией всего Ставропольского края. Планировочные оси на территории Ставропольского края формируются вдоль основной сети автомобильных и железных дорог и образуют т.наз. «урбанизированное кольцо» с отходящими от него лучами.

В агломерации КМВ главная планировочная ось имеет выходы в Карачаево-Черкесскую Республику и Кабардино-Балкарскую Республику, а далее — через г. Георгиевск до г. Будённовска, где она получает новое развитие и выход в Республику Дагестан.

Модель пространственной организации агломерации служит основой для определения возможности территориального, функционального и экономического развития городов и поселений, возможности изменения демографического потенциала, объёмов жилищного строительства, а, следовательно, и изменений качества жизни населения путём формирования новой модели градостроительного развития территории.

Планировочный каркас территории формируется на основе магистральных линейных элементов транспорта, элементов инженерной инфраструктуры и природных планировочных осей. Выделение планировочного каркаса осуществляется в целях планирования направлений устойчивого территориального развития. Планировочный каркас включает в себя планировочные оси и планировочные центры.

В основе выделения планировочного каркаса лежит определение планировочных осей, их ранжирование по степени оказываемого влияния на развитие территорий. Планировочные оси на территории агломерации КМВ подразделяются на три группы.

К ***осям первого ранга*** отнесены планировочные оси, имеющие важное значение для всей территории КМВ. Они располагаются вдоль железнодорожных и автомобильных транспортных коридоров межрегионального и федерального значения.

Основным направлением планировочного каркаса (осью первого ранга) является широтный коридор «Владикавказ − Грозный − Махачкала − граница с Азербайджанской Республикой», включающий железнодорожные пути (участок Северо-Кавказской железной дороги и автомобильные пути (Р-217 «Кавказ» автомобильная дорога М-4 «Дон», А-167 «Кочубей − Нефтекумск − Зеленокумск − Минеральные Воды» и «Георгиевск − Новопавловск»). Данный транспортный коридор имеет ярко выраженное межрегиональное значение и определяет планировочную структуру не только агломерации КМВ, но и всего Ставропольского края и соседних регионов (рис. 2).

Ещё одним широтным направлением (осью первого ранга) является скоростная дорога федерального значения А-165 «Лермонтов − Черкесск», которая с автомобильной дорогой общего пользования федерального значения А-157 «Минеральные Воды (аэропорт) − Кисловодск», проектируемым объездом г. Ессентуки и г. Пятигорска с выходом на Р-217 «Кавказ» М-4 «Дон» образует ось транзитного автомобильного движения в южной части региона.

Наряду с основным широтным направлением получает развитие направление «Север – Юг» (ось первого ранга), образующее основную меридиональную планировочную ось — автомобильная дорога «Ставрополь − Александровское − Минеральные Воды» с выходом на южное направление и в юго-западном направлении А-157 «Минеральные Воды (аэропорт) − Кисловодск».

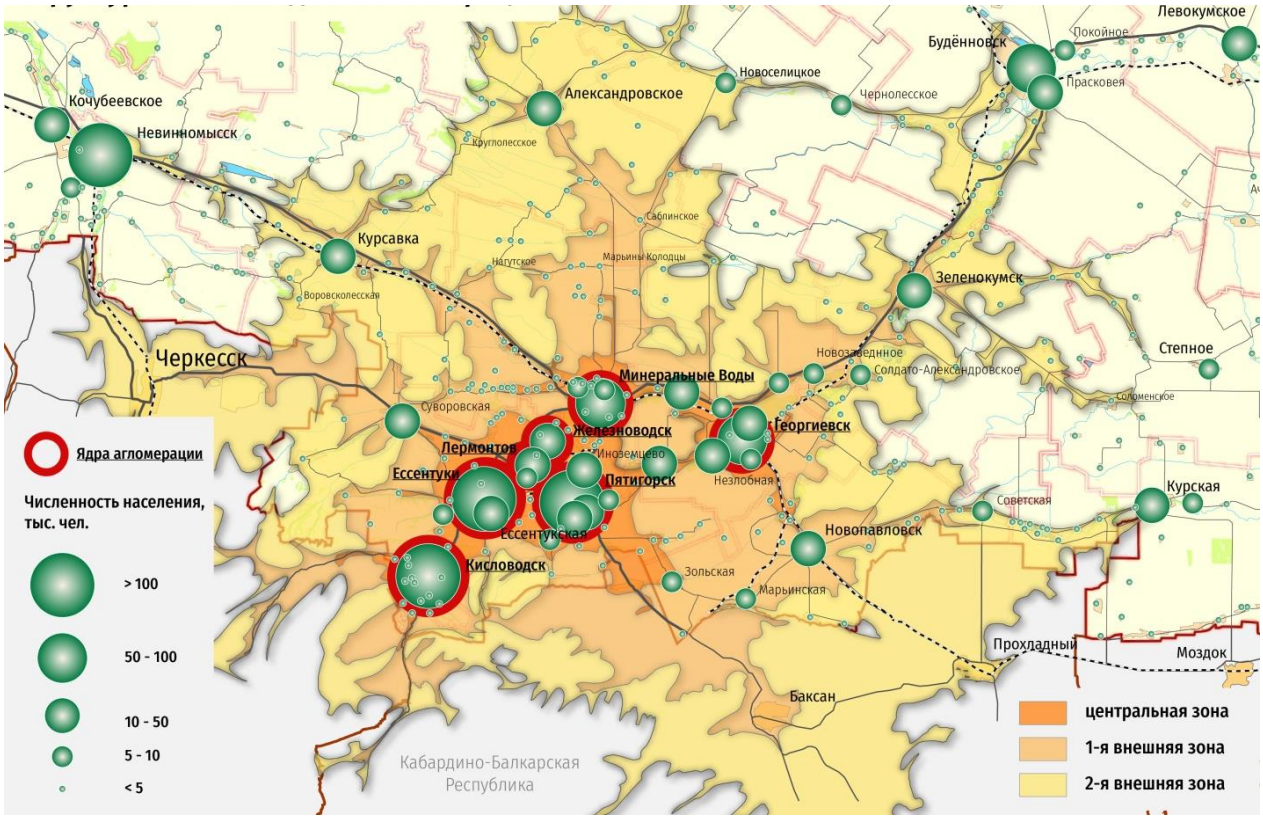


Рис. 2. Пространственная организация агломерации КМВ
Fig. 2. The spatial organization of the KMV agglomeration

Оси второго ранга составляют планировочные оси, имеющие значение для значительной части территории агломерации КМВ, формируемые в основном автодорогами общего пользования регионального или межмуниципального значения, многие из которых выполняют функцию дублёров основных транспортных связей для их разгрузки.

Планировочными центрами первого ранга агломерации КМВ являются:

- г. Пятигорск — город-курорт федерального значения, административный центр СКФО, субрегиональный центр Ставропольского края, центр социального, экономического развития, транспортно-логистический центр, самый крупный город в агломерации;
- г. Ессентуки — город-курорт федерального значения, административный центр региона КМВ;
- г. Кисловодск — город-курорт федерального значения, главная здравница Ставропольского края и бальнеологический центр российского масштаба;
- г. Минеральные Воды — главный транспортный узел СКФО и Ставропольского края.

Местоположение городов на пересечении меридиональных и широтных транспортных путей и сложившиеся административные функции определили их значимость в планировочном каркасе территории.

К ***планировочным центрам второго ранга*** относятся г. Лермонтов, г. Георгиевск и город-курорт Железноводск.

Сложившаяся структура планировочного каркаса определяет направления территориального развития, обеспечивает связанность территорий агломерации, Ставропольского края и укрепляет межрегиональные связи.

Агломерация КМВ расположена на пересечении крупнейших железнодорожных и автомобильных магистралей, связывающих большинство регионов Северного Кавказа с

другими частями России, и играет роль административно-политического центра Северо-Кавказского федерального округа. Город Пятигорск является единственным из центров федеральных округов, не являющийся ни административным центром субъекта Российской Федерации, входящего в округ, ни крупнейшим городом округа. Административным центром региона КМВ является г. Ессентуки.

Таким образом, агломерация КМВ является «административной альтернативой» Ставропольской агломерации, перераспределяя часть внешних ресурсов в свою пользу. Вместе с тем в конкуренции региональных агломераций наблюдается паритет в силу того, что сильные и слабые стороны каждой из них диаметрально противоположны.

Направления и перспективы развития агломерации КМВ

Направления и перспективы градостроительного и пространственного развития агломерации КМВ связаны с двумя противоположными процессами:

- во-первых, интенсивным градостроительным развитием отдельных частей и ареалов агломерации;
- во-вторых, существенными ограничениями (вплоть до полного запрета) в других частях и ареалах КМВ.

Одним из главных направлений развития агломерации КМВ является формирование градо-экологического каркаса территории. Функциональное назначение градо-экологического каркаса заключается в поддержании экологической стабильности территории — естественного режима природных процессов, определяющих существование ландшафтов и экосистем, предотвращении деградации природных комплексов, обеспечении устойчивости циклов возобновления ресурсного потенциала, поддержании сложившегося биологического разнообразия.

Градо-экологический каркас является формированием, характеризующимся пространственной структурой и вертикальной ярусностью.

В его составе имеются элементы, различные по функциям, экологическому значению и регламенту использования:

- ключевые территории или ядра — наиболее ценные и значимые территории, не нарушенные антропогенным воздействием, обеспечивающие сохранение биологического разнообразия, поддержание экологического баланса, выполняющие средообразующие функции;
- локальные элементы — небольшие природные объекты различного профиля, созданные для охраны уникальных объектов природы, выполнения хозяйственных, эстетических и социальных функций;
- транзитные территории или экологические коридоры — территории, связывающие отдельные ядра в единую экосеть и обеспечивающие беспрепятственное перемещение животных к местам зимовки и размножения, свободный обмен особями вида между популяциями, геохимический обмен для устойчивого равновесия ландшафтов, т.е. выполняющие транзитные функции.
- буферные территории — территории, прилегающие к ядрам, обеспечивающие их защиту от неблагоприятных антропогенных воздействий, выполняющие эколого-стабилизирующие функции (Внесение изменений в СТП КМВ, 2014).

Экологические коридоры соединяют ключевые территории, осуществляют транзитные и коммуникационные функции; благодаря им осуществляются связи между ядрами экологического каркаса.

Естественными транзитными территориями (экологическими коридорами) являются долины рек, прибрежные акватории, водоохранные леса, сохранившиеся участки естественной растительности, искусственные лесные защитные полосы, а также обширные участки природных и природно-антропогенных ландшафтов.

Следующим элементом экологического каркаса являются буферные территории, которые защищают ключевые и транзитные территории от неблагоприятных антропогенных воздействий.

Наиболее полно функциям таких территорий соответствуют округа горно-санитарной охраны (ГСО) курортов федерального значения Ессентуков, Железноводска, Кисловодска и Пятигорска, зоны санитарной охраны источников питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения и иные природные территории с законодательно установленными ограничениями на промышленное освоение и преобразование ландшафтов.

На стадии территориального планирования размещение объектов промышленной, транспортной и инженерной инфраструктуры, определение зон нового строительства необходимо производить с учётом режимов ограничения природопользования.

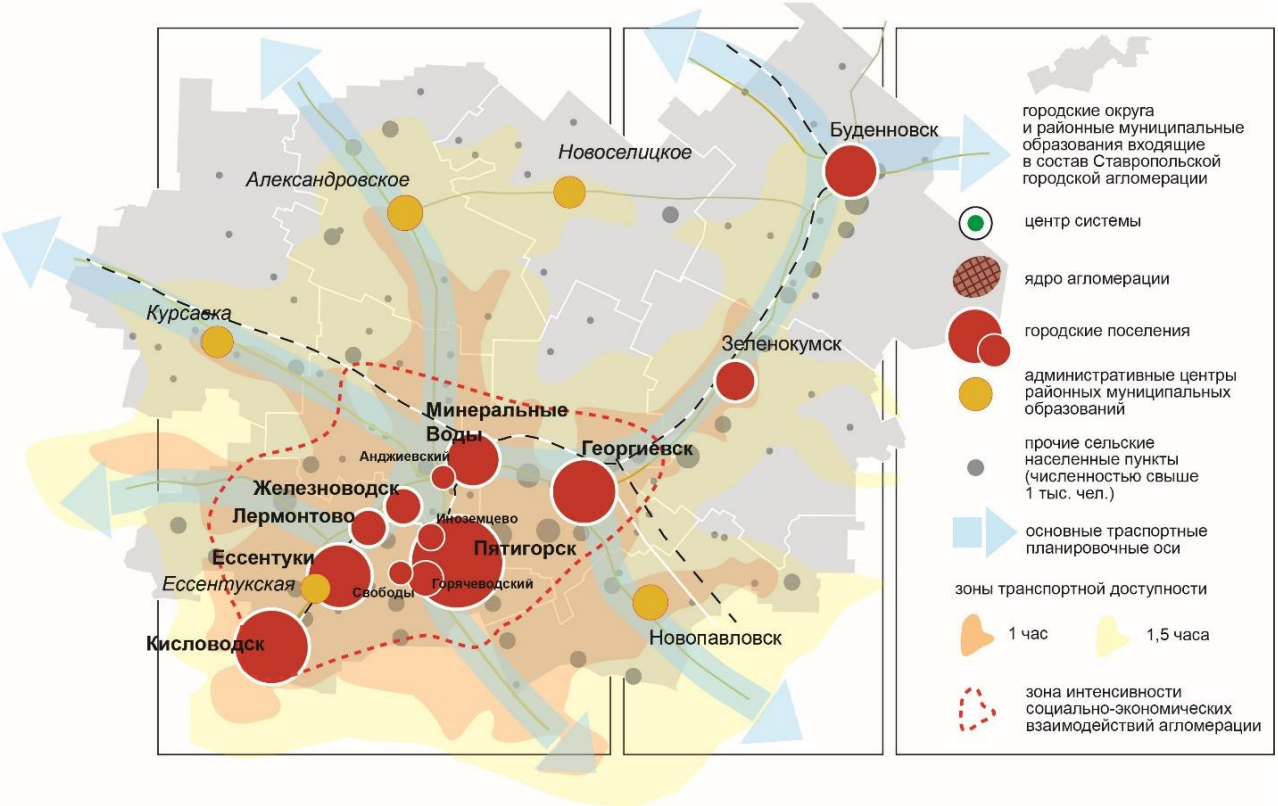


Рис. 3. Перспективная структурно-планировочная модель агломерации КМВ
Fig. 3. Promising structural-planning model of the KMV agglomeration

Территории, входящие в экологический каркас, должны быть ранжированы по значению для сохранения ландшафтного и биологического разнообразия и поддержания экологического равновесия.

Ключевые территории или ядра имеют наиболее строгие режимы ограничения хозяйственной и иной деятельности.

В пределах ключевых территорий запрещается любая деятельность, если она противоречит целям создания таких территорий или наносит вред природным комплексам и их компонентам.

В соответствии с режимами природопользования на особо охраняемых природных территориях допускается деятельность, направленная на обеспечение функционирования этих территорий и жизнедеятельности граждан, проживающих на них.

Режимы природопользования в пределах ключевых территорий экологического каркаса определяются в каждом конкретном случае в соответствии с нормативными правовыми актами.

На территории локальных элементов запрещается любая деятельность, если она противоречит целям создания данных природных объектов или причиняет вред природным комплексам и их компонентам.

Транзитные территории (экологические коридоры) формируются на прибрежных территориях и акваториях, где действуют строгие ограничения хозяйственной деятельности в соответствии с Водным кодексом Российской Федерации.

Обширные участки транзитных территорий — водораздельных возвышенностей — не имеют специальных, установленных законодательством требований к ограничению природопользования. Однако для поддержания естественного режима природных процессов экосистем необходимо сохранение пространственных связей между ценными природными комплексами.

Буферные зоны (территории) не изымаются полностью из хозяйственного использования; здесь устанавливается специальный режим землепользования. Они выполняют функцию защиты ядер и экологических коридоров от разрушительных или нежелательных потенциальных воздействий.

В пределах буферных территорий в зависимости от их вида ограничиваются антропогенные воздействия, регламентируется природопользование, создаются условия для восстановления природных ресурсов.

Наиболее строгие режимы ограничения хозяйственной деятельности, установленные законодательством, имеют следующие виды буферных территорий: округа горно-санитарной охраны курортов федерального значения Ессентуков, Железноводска, Кисловодска и Пятигорска и зоны санитарной охраны источников питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения.

Учёт различных режимов природопользования в пределах элементов экологического каркаса при принятии проектных решений в рамках территориального планирования способствует совмещению экономических, социальных и экологических интересов, определению условий развития территорий, планированию мероприятий и затрат на их реализацию.

Важнейшим пространственно-стратегическим ориентиром является дифференцированный подход к развитию жилищного строительства в пределах агломерации. Учитывая особенности и ориентиры, определённые стратегией развития Ставропольского края и города-курорта Кисловодска, документами территориального планирования (генеральными планами городов-курортов федерального значения), считаем целесообразным введение жёстких градостроительных ограничений на строительство жилья в пределах городов-курортов Кисловодска, Ессентуков, Железноводска, Пятигорска (в меньшей степени). Это тем более актуально, что бóльшая часть территорий городов-курортов расположена в границах 1-й и 2-й зон округа горно-санитарной охраны источников минеральных вод.

На основе результатов демографического прогноза и стратегического ориентира средней жилищной обеспеченности по Ставропольскому краю определена потребность в территориях для жилищного строительства по агломерации в целом и по каждому муниципальному образованию.

Всего для решения проблем жилищной обеспеченности для территории агломерации требуется около 1400 га (табл. 1).

Всего на территории агломерации для решения проблемы жилищной обеспеченности и достижения целевого показателя, определённого в Национальном проекте «Жильё и городская среда», указанной территории в 1401 га достаточно для строительства почти 7 млн м^2 жилья при достаточно комфортных показателях плотности населения и плотности застройки.

Табл. 1. Характеристика потребностей в жилищном строительстве по муниципальным образованиям в составе агломерации КМВ в 2018 г.
Table 1. Characterization of housing needs by municipalities as part of the KMV agglomeration in 2018

№ п/п	Наименование муниципального образования	Существующая жилищная обеспеченность, м^2 на 1 чел.	Потребность в территориях для жилищного строительства, га	Резерв территории в документах территориального планирования, га
1	Георгиевский городской округ	22,2	299	545
2	Город-курорт Ессентуки	23,8	215	915
3	Город-курорт Железноводск	26,4	50	247
4	Город-курорт Кисловодск	23,3	181	198
5	Город Лермонтов	24,8	20	0
6	Минераловодский городской округ	20,8	234	991
7	Предгорный район	25,8	175	1801
8	Город-курорт Пятигорск	27,3	227	378
	Всего по агломерации КМВ	**24,1**	**1401**	**5075**

Выделение земельных участков для жилищного строительства осуществляется в документах территориального планирования муниципальных образований в составе агломерации Кавказских Минеральных Вод — генеральных планов городских округов и схем территориального планирования муниципальных районов.

На основе анализа утверждённых и действующих документов территориального планирования муниципальных образований определены размеры земельных участков, зарезервированных под жилищное строительство в муниципальных образованиях агломерации КМВ.

Всего в генеральных планах и СТП определён территориальный резерв для реализации жилищного строительства в объёме более 5 тыс. га.

Этих земель вполне достаточно для решения проблемы жилищной обеспеченности. Определённые в генеральных планах территории для различных типов застройки не только позволяют покрыть дефицит, но и зарезервировать территорию для этих целей. При этом преобладающей является малоэтажная жилая застройка — на её долю приходится более 90 % всей территории.

В целом по агломерации определённые для жилой застройки земли обеспечивают возможности для размещения более 300 тыс. человек.

Мы считаем, что нет необходимости в таком объёме резервировать площади для жилищного строительства по ряду причин:

- во-первых, как правило, определённые в генеральных планах и СТП территории для этих целей не обеспечены необходимой инженерной инфраструктурой;
- во-вторых, такое резервирование предполагает изменение границ и расширение населённых пунктов, что для особо охраняемого эколого-курортного региона КМВ часто неприемлемо;
- в-третьих, градостроительное планирование в муниципалитетах не учитывает в достаточной степени сложившуюся и прогнозируемую демографическую структуру населения.

Приоритеты и векторы в строительстве жилья должны быть смещены на территорию пригородных зон городов-курортов, а также на территорию Минераловодского и Георгиевского городских округов. Учитывая более высокий уровень транспортной доступности в пределах агломерации КМВ, такой подход вполне допустим для зоны агломерированного расселения.

В этой связи необходимо привести утверждённую градостроительную документацию в муниципальных образованиях агломерации КМВ в соответствие с реальными потребностями региона и Ставропольского края, а также с теми результатами, которые получены в ходе разработки проекта Схемы территориального планирования Ставропольского края. При этом в направлениях жилищного освоения территории приоритет должен отдаваться проектам реконструкции, реновации и развития застроенных территорий, а также проектам комплексного освоения.

Кроме этого, можно определить следующие приоритеты градостроительного развития:

- развитие инженерной инфраструктуры агломерации, в первую очередь систем водоснабжения, водоотведения, ливневой канализации в городах-курортах;
- развитие системы расселения с использованием территориальных ресурсов Георгиевского, Минераловодского городских округов, а также Предгорного района;
- комплексное решение проблем в сфере утилизации ТКО;
- развитие транспортного каркаса агломерации, реконструкция трассы А-157, строительство объезда трассы Р-217 «Кавказ» вокруг Пятигорска, организация железнодорожного сообщения Минеральные Воды − аэропорт Минеральные Воды;
- соблюдение режимов зон горно-санитарной охраны, полный вывод непрофильных объектов капитального строительства из 1-й и 2-й зон ГСО;
- поэтапный переход на экологические виды транспорта в городах-курортах;
- подготовка научно-методической основы и реализация проектов по недопущению потери лечебных свойств минеральных вод и грязей, реализация системы постоянного экологического мониторинга;
- реконструкция и строительство новых объектов в санаторно-курортной и туристско-рекреационных сферах, расширение территории курортных парков;
- создание спортивно-развлекательного кластера;
- развитие агропромышленного кластера, создание оптового рынка сельскохозяйственной продукции, расширение инфраструктуры хранения с/х продукции (Стратегия Ставропольского края, 2019).

Таким образом, проектные решения, закреплённые в документах территориального планирования, должны быть учтены и транслированы в правила землепользования и застройки в целях создания условий для устойчивого развития территорий муниципальных образований, сохранения окружающей среды и объектов культурного наследия. Лишь в таком случае при соблюдении принципа преемственности градостроительной документации различного вида может быть обеспечена практическая реализация основных решений, заложенных в процессе территориального планирования.

Целенаправленная адаптация агломерации Кавказских Минеральных Вод и региональной системы расселения к потребностям развития эколого-курортного комплекса КМВ при необходимости сохранения и наиболее эффективного использования природных свойств курортов является основной задачей развития региона, определяющей формы градостроительной и хозяйственно-экономической деятельности на данной территории.

ВЫВОДЫ

Разработанная модель агломерации Кавказских Минеральных Вод позволяет определять основные направления и параметры пространственного развития территории агломерации и выполнять функцию информационного обеспечения внутреннего взаимодействия органов региональной и муниципальной власти, тем самым повышая качество принятия управленческих решений.

Агломерация КМВ относится к ярко выраженным полицентрическим сформировавшимся развитым агломерационным структурам (коэффициент развитости для агломерации КМВ составляет 4,33). Для муниципальных образований региона документами стратегического и территориального планирования устанавливается главная функция — курортного региона федерального значения, использующего для реализации данной функции уникальные природные лечебные ресурсы.

В результате проведённого геоинформационного анализа определены основные направления пространственного развития и наиболее подходящий набор проектных мероприятий, в полной мере соответствующих документам территориального и социально-экономического планирования разного уровня и возможностям определения новых задач и перспектив как для всей территории агломерации КМВ, так и для её отдельных частей.

В целом основные направления градостроительного развития с учётом агломерационных эффектов для муниципальных образований агломерации Кавказских Минеральных Вод обобщены в Концепции консолидированного градостроительного развития. В основе этой Концепции — учёт полицентрического характера территории агломерации, сохранение и развитие природно-экологического каркаса территории, разнообразие типов градостроительной среды и др. Реализация концепции позволит достичь сбалансированного и поступательного развития и всей агломерации, и каждого из муниципальных образований.

Сложившиеся на сегодня дисфункции и нарушения должны сниматься, решаться в результате активной целенаправленной градостроительной и инвестиционной политики, основным регулятором которой служат инструменты развития, прежде всего территориальное планирование.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант №20-05-00386 А «Пространственно-временные диспропорции демографического развития городских агломераций разного типа в Европейской части России».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the RFBR, grant No 20-05-00386 A “Spatial and temporal disparities in the demographic development of urban agglomerations of different types in the European part of Russia”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антонов Е.В., Махрова А.Г.* Крупнейшие городские агломерации и формы расселения над агломерационного уровня в России. Известия РАН. Серия географическая, 2019. № 4. С. 31–45.

2. *Каргашина М.А.* Система геоинформационного обеспечения градостроительной деятельности: современное состояние и ключевые аспекты развития. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. Т. 24. Ч. 1. С. 253–261. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-253-261.

3. *Лаппо Г.М., Полян П.М., Селиванова Т.В.* Агломерации России в XXI веке. Вестник Фонда регионального развития Иркутской области. Иркутск, 2007. № 1. С. 45–52.

4. *Лаппо Г., Полян П., Селиванова Т.* Административно-территориальные преобразования и развитие агломераций. Демоскоп Weekley. Электронная версия бюллетеня «Население и общество», Институт демографии Государственного университета — Высшей школы экономики, 2010. № 407−408. Электронный ресурс: http://demoscope.ru/weekly/2010/0407/tema02.php (дата обращения 01.10.2019).

5. *Наймарк Н.И.* Современная сеть городских агломераций СССР. Известия АН СССР. Серия географическая, 1985. № 6. С. 82–91.

6. *Перцик Е.Н.* Крупные городские агломерации: развитие, проблемы проектирования. Проблемы развития агломераций России. М.: Крассанд, 2009. С. 34–46.
7. *Полян П.М.* Методика выделения и анализа опорного каркаса расселения: монография. М.: Институт географии АН СССР, 1988. Ч. 1. 220 с.
8. *Полян П.М., Заславский И.Н., Наймарк Н.И.* Проблемы делимитации городских агломераций: сравнение и синтез ведущих методик. Проблемы территориальной организации пространства и расселения в урбанизированных районах. Свердловск: СГПИ, 1988. С. 26–40.
9. Ставропольский край в цифрах. Краткий статистический сборник. Ставрополь: Северо-Кавказстат, 2018. 215 с.
10. *Черкасов А.А., Махмудов Р.К., Эшроков В.М.* ГИС. Схема территориального планирования Республики Калмыкия. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2019. Т. 25. Ч. 1. С. 179–188. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-179-188.
11. *Черкасов А.А., Чернова И.В., Сопнев Н.В.* Геоинформационно-картографическое моделирование расселения народов в России. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2019. Т. 25. Ч. 1. С. 298–307. DOI:10.35595/2414-9179-2019-1-25-298-307.
12. *Эшроков В.М., Махмудов Р.К., Черкасов А.А., Глущенко И.В.* ГИС-анализ градостроительного развития города-курорта Кисловодска. Наука. Инновации. Технологии, 2018. № 2. С. 185–196.

REFERENCES

1. *Antonov E.V. Makhrova, A.G.* Largest urban agglomeration and the form of settlement madagascariense level in Russia. News of RAS. Geographical series (Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya), 2019. No 4. P. 31–45 (in Russian).
2. *Cherkasov A.A., Chernova I.V., Sopnev N.V.* GIS and cartographic modeling of people's dispersion in Russia. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2019. V. 25. Part 1. P. 298–307. DOI:10.35595/2414-9179-2019-1-25-298-307 (in Russian, abs English).
3. *Cherkasov A.A., Makhmudov R.K., Eshrokov V.M.* GIS Scheme of territorial planning of the Republic of Kalmykia. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2019. V. 25. Part 1. P. 179–188. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-179-188 (in Russian).
4. *Eshrokov V.M., Makhmudov R.K., Cherkasov A.A., Glushchenko I.V.* GIS-analysis of urban development of the resort city of Kislovodsk. Science. Innovations. Technologies, 2018. No 2. P. 185–196 (in Russian).
5. *Kargashina M.A.* System of geoinformation support for urban development: current state and key aspects of development. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2018. V. 24. Part 1. P. 253–261. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-253-261 (in Russian).
6. *Lappo G.M., Polyan P.M., Selivanova T.V.* Agglomeration of Russia in the XXI century. Bulletin of the Regional Development Fund of the Irkutsk Region. Irkutsk, 2007. No 1. P. 45–52 (in Russian).
7. *Lappo G.M., Polyan P.M., Selivanova T.V.* Administrative-territorial transformation and the development of agglomerations. Weekley Demoscope. The electronic version of the Bulletin "Population and Society", Institute of Demography, State University — Higher School of Economics, 2010. No 407−408. Web resource: http://demoscope.ru/weekly/2010/0407/ tema02.php (accessed 01.10.2019) (in Russian).

8. *Naimark N.I.* Modern network of urban agglomerations of the USSR. News of USSR Academy of Sciences. Geographical series (Izvestiya Akad. Nauk SSSR. Seriya Geograficheskaya), 1985. No 6. P. 82–91 (in Russian).
9. *Pertsik E.N.* Large urban agglomerations: development, design problems. Problems of Development of Agglomerations in Russia. Moscow: Krasang, 2009. P. 34–46 (in Russian).
10. *Polyan P.M.* Method of selection and analysis of the reference frame of settlement: monograph. Moscow: Institute of Geography of the USSR Academy of Sciences, 1988. 220 p. (in Russian).
11. *Polyan P.M., Zaslavsky I.N., Naimark N.I.* Problems of delimitation of urban agglomerations: comparison and synthesis of leading methods. Problems of Territorial Organization of Space and Settlement in Urbanized Areas. Sverdlovsk: Sverdlovsk State Pedagogical Institute, 1988. P. 26–40 (in Russian).
12. Stavropol Territory in numbers. Brief statistical compilation. Stavropol: North-Caucasusstat, 2018. 215 p. (in Russian).

УДК: 551.4 (477.75) **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-95-105**

В.А. Табунщик[1]

ГЛУБИНА РАСЧЛЕНЕНИЯ РЕЛЬЕФА НА ТЕРРИТОРИИ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА

АННОТАЦИЯ

Крымский полуостров является уникальной природной территорией, где сочетаются горный и равнинный рельеф. Однако характеристика рельефа Крымского полуострова в большинстве случаев ограничивается лишь качественной оценкой. В статье предпринята попытка количественной оценки рельефа Крымского полуострова путём построения карты глубины расчленения этого рельефа. В работе рассматривается методика построения таких карт с использованием современных методов геоинформатики и открытых геоданных — цифровой модели рельефа Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM). На основании этой методики для территории Крымского полуострова построена карта глубины расчленения рельефа. Значения показателя глубины расчленения рельефа Крымского полуострова колеблется от 0 до 790 м на км^2. Среднее значение показателя составляет 46 м на км^2. Территориально показатель глубины расчленения рельефа распределён неравномерно. В целом на территории Крымского полуострова преобладают отметки глубины расчленения рельефа до 50 м на км^2 (80 % от общей площади), что связано с тем, что бóльшая часть полуострова имеет равнинный рельеф. Наибольшие значения показателя глубины расчленения рельефа характерны для юго-западной части территории Крымского полуострова, где наблюдаются наибольшие перепады высот между яйлами (Ай-Петринская, Ялтинская, Гурзуфская, Никитская, Бабуган-яйла) и склонами, круто спускающимися к южному берегу Крыма. Дополнительно проанализировано распределение показателя глубины расчленения рельефа для гидроморфного, плакорного, низкогорного и среднегорного ландшафтных уровней на территории Крымского полуострова: определены минимальные, максимальные и средние значения показателей глубины и густоты расчленения рельефа, а также диапазоны значений показателей в пределах каждого ландшафтного уровня.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Крымский полуостров, рельеф, глубина расчленения рельефа, ландшафт

Vladimir A. Tabunshchik[2]

DEPTH OF THE RELIEF DISSECTION ON THE TERRITORY OF THE CRIMEAN PENINSULA

ABSTRACT

The Crimean Peninsula is a unique natural area that combines both mountain and flat terrain. However, the characteristics of the relief of the Crimean Peninsula in most cases are limited only to a qualitative assessment. In the article, the relief of the Crimean Peninsula is measured and a map of depth of the relief dissection of the Crimean Peninsula is constructed. Methods of constructing such maps using modern methods of geoinformatics and open geodata — digital terrain model Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) are discussed. On the basis of the methodology

[1] ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», Научно-исследовательский центр геоматики, Просп. Нахимова, д. 2, 299011, Севастополь, Россия; *e-mail:* **tabunshchyk@ya.ru**
[2] A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (IBSS), Geomatics Research Center, Nakhimov Ave, 2, 199034, Sevastopol, Russia; *e-mail:* **tabunshchyk@ya.ru**

for the territory of the Crimean Peninsula, a map of depth of the relief dissection is constructed. The values of the indicator of depth of the relief dissection of the Crimean Peninsula range from 0 to 790 m per km^2. Average value of the depth of the relief dissection of the Crimean Peninsula is 46 m per km^2. Geographically, the indicator of the depth of the relief dissection of the Crimean Peninsula is distributed irregularly. On the territory of the Crimean Peninsula, value the depth of the relief dissection are 50 m per km^2 (80 % of the total area) prevail, which is due to the fact that most of the peninsula has a flat terrain. The highest indicator values of the depth of the relief dissection is typical for the southwestern part of the Crimean Peninsula, where there are the greatest differences in elevation between yailas (Ai-Petri yaila, Yalta yaila, Gurzuf yaila, Nikita yaila, Babugan-Yaila) and slopes steeply down to the southern coast of Crimea. In addition, the distribution of the terrain depth index for landscape levels on the territory of the Crimean Peninsula was analyzed: the minimum, maximum, and average values of the of the depth of the relief dissection of the Crimean Peninsula and landscape level of the Crimean Peninsula were determined.

KEYWORDS: the Crimean Peninsula, relief, depth of the relief dissection, landscape

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы изучения морфометрических показателей рельефа, таких как густота и глубина расчленения, интересуют учёных с давних пор. Глубина и густота расчленения рельефа оказывают огромнейшее влияние на развитие эрозионных форм рельефа, сельскохозяйственную деятельность, туризм и рекреацию и пр. На современном этапе представляется возможным значительно упростить расчёт показателей густоты расчленения рельефа, используя последние достижения геоинформатики. Теоретические аспекты изучения показателя глубины расчленения (вертикального расчленения) рельефа заложены в работах [*Волков*, 1950; *Спиридонов*, 1970; *Пириев*, 1983; *Анисимов*, 1999; *Погорелов, Думит*, 2009; *Florinsky*, 2016]. Практическое аспекты расчётов показателя глубины расчленения рельефа мы находим в работах многих авторов. А.Н. Мунтян [2015] исследовал горизонтальное и вертикальное расчленение рельефа в пределах Приднестровья; М.М. Мехбалиев [2015] —— глубину расчленения рельефа Большого Кавказа в пределах Азербайджана; В.В. Братков с соавторами [2011], З.В. Атаев и В.В. Братков [2012] —густоту эрозионного расчленения Северо-Восточного Кавказа; Д.В. Курлович [2013] — горизонтальное и вертикальное расчленение рельефа Белоруссии; Г.А. Орехова и Л.Л. Новых [2017] — расчленение рельефа в пределах бассейнов рек Северский Донец и Ворскла; В.Ф. Лысова [2012] — расчленение рельефа в пределах бассейна реки Малой Визинги; Г.А. Халилов и С.Н. Абушова [2014] — горизонтальное и вертикальное расчленение рельефа в пределах Приднестровья; Ю.О. Антипцева и Ж.А. Думит [2009] — расчленение рельефа в пределах Лагонакского нагорья (Северо-Западный Кавказ).

На территории Крымского полуострова некоторыми исследователями были проведены исследования по картированию глубины и густоты расчленения рельефа для отдельных частей Крымского полуострова — Тарханкутского полуострова [*Михайлов*, 2015], центрального предгорья Главной гряды Крымских гор [*Позаченюк, Петлюкова*, 2016], юго-восточной части Крымского полуострова [*Клюкин*, 2007], причём в последней работе расчёты производились вручную, а в работах [*Михайлов*, 2015; *Позаченюк, Петлюкова*, 2016] — с помощью геоинформационных систем. Однако на данный момент отсутствуют карты глубины и густоты вертикального расчленения рельефа, покрывающие всю территорию Крымского полуострова.

Цель данной работы — построить карту глубины расчленения рельефа, провести анализ и определить влияние фактора «Глубина расчленения рельефа, м» на формирование ландшафтной структуры на территории Крымского полуострова.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основой исследования послужили открытые наборы геоданных — Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM), которые используются многими исследователями в качестве альтернативы топографическим картам. Суть методики исследования [*Курлович*, 2013; *Михайлов*, 2015; *Позаченюк, Петлюкова*, 2016 и др.] сводится к построению сетки квадратов, покрывающей всю территорию Крымского полуострова, где каждая ячейка сетки выступает в роли операционной территориальной единицы и несёт с себе информацию о глубине (разность максимальной и минимальной высот) расчленения рельефа. Весь объём работ выполняется в геоинформационной системе ArcGIS или ей подобных (QGIS, SAGA и пр.). Для расчёта показателя глубины расчленения рельефа в пределах каждой ячейки определяется разность максимальной и минимальной высот, полученные значения извлекаются в точки, и на их основании производится интерполяция. Применительно к программному комплексу ArcGIS методика состоит в выполнении друг за другом следующих шагов [*Курлович*, 2013; *Михайлов*, 2015; *Позаченюк, Петлюкова*, 2016 и др.]:

- цифровая модель рельефа SRTM для территории Крымского полуострова загружается в программный комплекс ArcGIS;
- с помощью инструмента «Построить сетку» («Create Fishnet») из группы инструментов «Создание образцов» («Sampling») набора инструментов «Управление данными» («Data Management») на исследуемой территории строится сетка квадратов заданного размера;
- с помощью инструмента «Объект в полигон» («Feature To Polygon») из группы инструментов «Пространственные объекты» («Features») набора инструментов «Управление данными» («Data Management») сетка квадратов преобразуется в полигональную сетку;
- с помощью инструмента «Зональная статистика» («Zonal Statistics») из группы инструментов «Зональные» («Zonal») набора инструментов «Spatial Analyst» определяется максимальное значение высоты местности в пределах каждого квадрата;
- с помощью инструмента «Зональная статистика» («Zonal Statistics») из группы инструментов «Зональные» («Zonal») набора инструментов «Spatial Analyst» определяется минимальное значение высоты местности в пределах каждого квадрата;
- с помощью инструмента «Вычесть» («Minus») из группы инструментов «Математические» («Math») набора инструментов «Spatial Analyst» определяется разность между максимальным и минимальным значением высоты в пределах каждого квадрата;
- с помощью инструмента «Растр в точки» («Raster to Point») из группы инструментов «Из растра» («From Raster») набора инструментов «Конвертация» («Conversion») значения разности высот в пределах квадрата извлекаются в точки;
- с помощью группы инструментов «Интерполяция» («Interpolation») набора инструментов «Spatial Analyst» на основании точек, отражающих разность высот в пределах квадратов, строится карта глубины расчленения рельефа.

Вначале был произведён подбор сетки квадратов с наиболее оптимальным размером ячейки. В качестве исследуемых сеток квадратов для территории Крымского полуострова были использованы сетки с размером ячейки 20x20, 10x10, 5x5 и 1x1 км. Для каждой был произведён расчёт показателя глубины расчленения рельефа на территории Крымского полуострова. При использовании сеток с ячейками 20x20, 10x10, 5x5 км возникают ошибки, проявляющиеся в том, что для территорий, где отметки высот не превышают 100 м (большая часть равнинного Крыма), значения показателя глубины расчленения рельефа составляют более 100 м, чего просто не может быть; к тому же возникает довольно большая погрешность при подсчётах. Например, если ячейка размером 20x20 км имеет значение глубины расчленения рельефа в 1284 м на км^2, то 4 вложенные в неё ячейки 10x10 км — 441, 950, 1020 и 1093 м на км^2, 16 ячеек 5x5 км — значения от 262 до 1020 м на км^2, 400 ячеек

размером 1x1 км — значения от 70 до 525 м на км^2. Укрупнение сетки до 0,5x0,5 км не производилось, учитывая большой набор данных, подлежащих анализу (при разбивке территории Крымского полуострова на квадраты размером 20x20 км таких квадратов насчитывалось 64, 10x10 км — 257, 5x5 км — 1 066, 1x1 км — 26 642, 0,5x0,5 км — более 100 000). Использование сетки с ячейкой 1x1 км показало довольно хорошие результаты, позволяющие увидеть перепады высот в пределах куэст Крымских гор и яйлинские водораздельные поверхности. Таким образом, для исследования была выбрана сетка квадратов размером 1x1 км.

Следует учитывать то, что сетка строится по экстенту шейп-файла с границами Крымского полуострова, и при смещении границы ячейки на некоторое расстояние на север, юг, запад или восток в её границу могут попасть новые максимальные и минимальные значения, что приведёт к новым фактическим данным. В связи с этим было проанализировано 5 сеток квадратов с размером ячейки 1x1 км — исходная и четыре сетки, где ячейки были смещены по отношению к исходной на 0,5 км к северу, югу, западу и востоку соответственно, и произведён подсчёт глубины расчленения. Так, для случайной ячейки размером 1x1 км, имеющей значение глубины расчленения рельефа 442 м на км^2, границы были сдвинуты на 0,5 км к северу, югу, западу и востоку при сохранении площади, и получены новые значения в 333, 466, 375 и 412 м на км^2. При этом изменение значения показателя глубины расчленения рельефа в отдельных ячейках изменялось в 3 и более раза. Для того чтобы понять, влияют ли эти изменения на общую картину или взаимно нивелируются, был произведён статистический анализ полученных выборок. Коэффициент корреляции между полученными значениями исходной и четырёх сдвинутых сеток составил от 0,90 до 0,95, что свидетельствует о высокой степени связанности всех пяти выборок. По всем выборкам среднее значение показателя глубины расчленения рельефа составило 45–46 м на км^2, стандартная ошибка — 0,5, медиана — 14, мода — 9 (в одной из выборок 8), стандартное отклонение — 74–75, ассиметричность — 3 (табл. 1).

Табл. 1. Основные статистические показатели выборки при построении сетки квадратов 1x1 км
Table 1. The main sample statistical indicators when constructing a grid of squares grid 1x1 km

Статистический показатель	**Сетка квадратов 1x1 км**				
	Исходная	**Смещение на 0,5 км к северу**	**Смещение на 0,5 км к югу**	**Смещение на 0,5 км к западу**	**Смещение на 0,5 км к востоку**
Среднее	46	45	45	45	46
Стандартная ошибка	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Медиана	14	14	14	14	14
Мода	9	9	8	9	9
Ст. отклонение	74	74	74	75	75
Дисперсия	5515	5518	5525	5572	5569
Эксцесс	12	11	11	11	11
Асимметричность	3	3	3	3	3
Интервал	790	782	782	687	687
Минимум	0	0	0	0	0
Максимум	790	782	782	687	687
Минимум-максимум без учета выбросов	0–84	0–84	0–84	0–84	0–84
Нижний квартиль — верхний квартиль (25–75 %)	9–39	9–39	9–39	9–39	9–39

Выборка не является однородной, данные значительно разбросаны относительно среднего значения. В связи с этим значительные отличия представлены только в определении максимальных (и в то же время экстремальных) значений. Из всех выборок на выбросы приходится примерно 15 % значений выборки. Если в основной выборке максимальные значения показателя глубины расчленения рельефа составляет 790 м на км^2, то в дополнительное это значение падает до 782 и 687 м на км^2. Однако, учитывая схожесть всех пяти выборок, в дальнейшем будет производиться только характеристика исходной выборки и построение карты глубины расчленения Крымского полуострова на её основе.

Традиционно ArcGIS предлагает использовать на выбор несколько методов интерполяции данных, таких как «Естественная окрестность», «Крикинг», «Обратно взвешенные расстояния (ОВР)», «Сплайн». Учитывая то, что интерполяция производится на основании точек, соответствующих центрам ячеек 1x1 км, то на выходе получается довольно качественная картина. Однако разные методы интерполяции имеют свои минусы. По умолчанию при интерполяции ArcGIS предлагал уменьшить размер выходной ячейки, что приводило к неточностям в визуализации данных, поэтому размер выходной ячейки прописывался вручную и составлял 1x1 км. Интерполяция производилась по методу «Крикинг», так как все остальные методы при интерполяции давали ошибки при визуализации картографического изображения, проявляющиеся в виде «артефактов» («ОВР», «Естественная окрестность») и отрицательных интерполированных значений («Сплайн»). Однако коэффициент корреляции между значениями по различным методам интерполяции составляет 0,95–0,97, что свидетельствует о сходстве результатов, полученных с помощью различных методов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате по описанной выше методике была построена карта глубины расчленения рельефа (рис. 1).

Для Крымского полуострова показатели глубины расчленения рельефа находятся в диапазоне от 0 до 790 м на км^2, а среднее значение составляет 46 м на км^2. На диапазон значений от 0 до 5 м на км^2 приходится 12 % площади Крымского полуострова, от 5 до 10 м на км^2 — 26 %, от 10 до 25 м на км^2 — 30 %, от 25 до 50 м на км^2 — 12 %, от 50 до 100 м на км^2 — 7 %, от 100 до 250 м на км^2 — 10 %, от 250 до 500 м на км^2 — 8 %, более 500 м на км^2 — менее 1 %. В целом на территории Крымского полуострова преобладают отметки глубины расчленения рельефа до 50 м на км^2 (80 % от общей площади), что связано с тем, что бóльшая часть полуострова имеет равнинный рельеф со слабыми перепадами высот, т.к. расположена в пределах Скифской эпигерцинской плиты, которая покрыта неогеновыми отложениями. В равнинной части Крыма наибольшие значения глубины расчленения рельефа наблюдаются на западе (Тарханкутский п-ов) и востоке (Керченский п-ов), что связано со сложным геологическим строением Тарханкутского полуострова, в основании которого лежит Тарханкутское поднятие, и Керченского полуострова, в основании которого лежат Киммерийско-альпийский и Индоло-Кубанский прогибы Скифской эпигерцинской плиты и Горно-Крымское складчато-надвиговое сооружение, а наименьшие — на северо-востоке в пределах Северо-Сивашского прогиба, представляющего собой молодую аккумулятивную низменную равнину, сформировавшуюся в условиях очень слабых поднятий и опусканий и освободившуюся от влияния моря в неогене. В пределах Присивашской низменности в районах, тяготеющих к заливу Сиваш, характерны самые минимальные значения глубины расчленения рельефа — до 1–2 м на км^2.

Наибольшие значения показателя глубины расчленения рельефа характерны для юго-западной части территории Крымского полуострова, где наблюдаются наибольшие перепады высот между яйлами (Ай-Петринская, Ялтинская, Гурзуфская, Никитская, Бабуган-яйла) и склонами, круто спускающимися к южному берегу Крыма. Это участки Крымского полуострова, представляющие собой Горно-Крымское складчато-надвиговое сооружение, сформированные в мезозое и омоложенные альпийским орогенезом. Глубина расчленения рельефа здесь достигает 790 м на км^2.

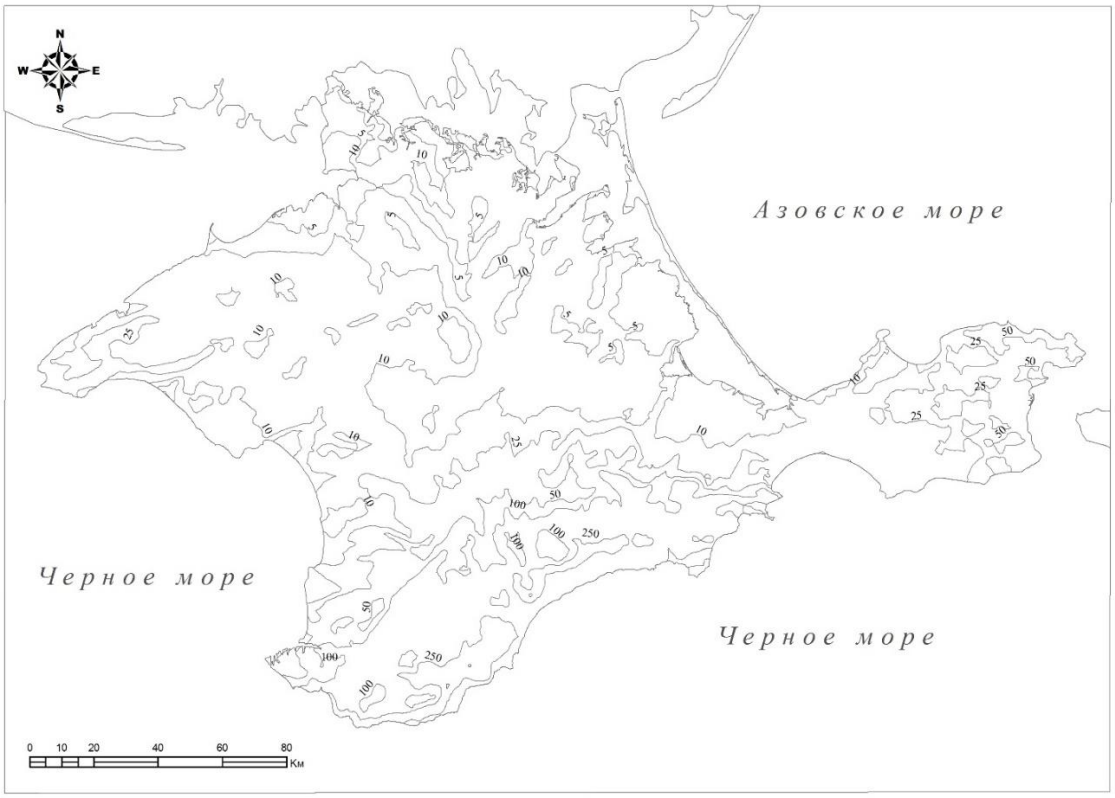


Рис. 1. Глубина расчленения рельефа Крымского полуострова
Fig. 1. Depth of the relief dissection of the Crimean Peninsula

В целом на территории Крымского полуострова показатель глубины расчленения рельефа распределён неоднородно. Рассмотрим более детально значения глубины расчленения рельефа для ландшафтных уровней Крымского полуострова.

Согласно представлениям Г.Е. Гришанкова [1972], на территории Крымского полуострова выделяются гидроморфный, плакорный, низкогорный и среднегорный ландшафтные уровни (рис. 2). Ландшафтные уровни — это «планетарные геоморфологические образования, относительно однородные по характеру рельефа и грунтового увлажнения, но отличающиеся своеобразием проявления географической зональности» [*Гришанков*, 1972, с. 164].

В пределах гидроморфного ландшафтного уровня превалируют диапазоны значений глубины расчленения рельефа от 5 до 10 м на км^2 (46,22 % от площади ландшафтного уровня) и 10 до 25 м на км^2 (32,73 % от площади ландшафтного уровня). В пределах плакорного ландшафтного уровня 56,10 % от площади ландшафтного уровня приходится на значения от 10 до 25 м на км^2. В пределах низкогорного ландшафтного уровня 25,66 % от площади ландшафтного уровня приходится на значения от 25 до 50 м на км^2, 24,81 % — на значения от 10 до 25 м на км^2. В пределах среднегорного ландшафтного уровня 58,03 % от площади ландшафтного уровня приходится на значения от 100 до 250 м на км^2 (табл. 2).

Согласно представлениям М.Д. Гродзинского [2014], с использованием концепции экологической ниши представляется возможным оценить воздействие любого внешнего фактора среды на формирование ландшафтов той или иной территории. Рассмотрим влияние показателя глубины расчленения рельефа территории на формирование её ландшафтов. Концепция исходит из предположения, что, если значения показателя глубины расчленения рельефа выступают ведущим фактором, под влиянием которого формируются и существуют ландшафтные уровни, то их экологические ниши должны разграничиваться или

незначительно пересекаться. Вышеописанные диапазоны значений выступают в виде факторных амплитуд диапазона условий существования ландшафтных уровней. Для каждого ландшафтного уровня была произведена статистическая оценка диапазона значений (табл. 3). В пределах гидроморфного ландшафтного уровня объём выборки составил 9875, плакорного — 9219, низкогорного — 6694, среднегорного — 2891 точек.

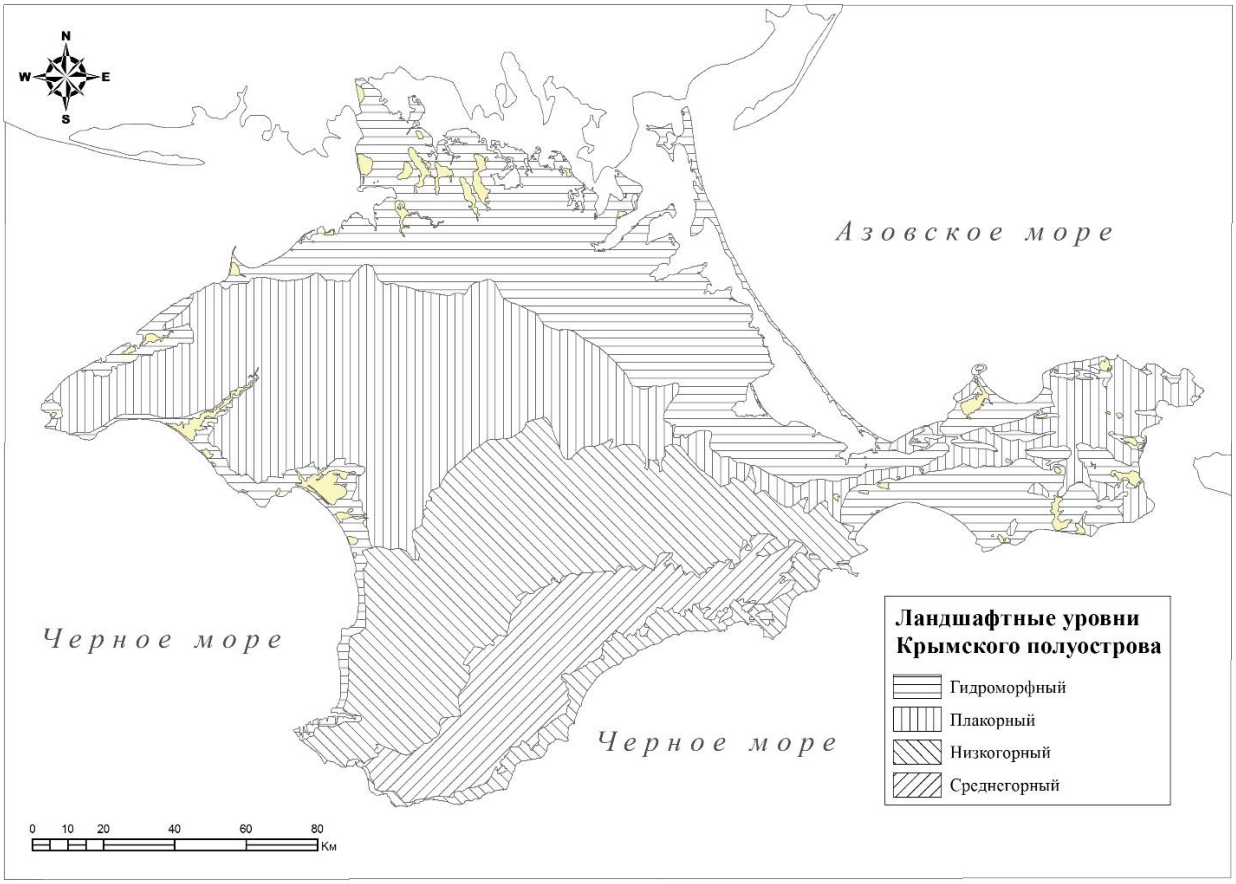


Рис. 2. Ландшафтные уровни Крымского полуострова, оцифровка [Табунщик, Петлюкова, 2019]
Fig. 2. Landscape levels of the Crimean Peninsula digitization [Tabunshchik, Petlyukova, 2019]

Табл. 2. Глубина расчленения рельефа по ландшафтным уровням Крымского полуострова
Table 2. Depth of the relief dissection in landscape levels of the Crimean Peninsula

Густота расчленения, м на км^2	**Ландшафтный уровень**			
	гидроморфный	**плакорный**	**низкогорный**	**среднегорный**
	% от общей площади уровня			
до 5	13,99	1,08	0,26	0,04
5–10	46,22	27,31	7,28	–
10–25	32,73	56,10	24,81	0,34
25–50	5,37	11,81	25,66	3,42
50–100	1,55	3,48	18,55	13,81
100–250	0,13	0,22	20,04	58,03
250–500	0,01	–	3,30	22,65
более 500	–	–	0,11	1,71

Табл. 3. Основные статистические показатели ландшафтных уровней Крымского полуострова
Table 3. Main statistical indicators of landscape levels of the Crimean Peninsula

Густота расчленения, м на км^2	**Ландшафтный уровень**			
	гидроморфный	**плакорный**	**низкогорный**	**среднегорный**
Среднее	12	17	70	193
Стандартная ошибка	0,1	0,1	0,9	2,0
Медиана	8	13	40	163
Мода	6	11	12	141
Ст. отклонение	10,2	13,8	71,0	108,8
Дисперсия	104	189	5 034	11 827
Эксцесс	24	13	5	2
Асимметричность	4	3	2	1
Минимум-максимум без учёта выбросов	0–23	0–31	0–206	0–431
Нижний квартиль — верхний квартиль (25–75 %)	6–13	9–18	19–94	106–236

Значения показателя глубины расчленения рельефа колеблются в пределах гидроморфного уровня от 0 до 288 м на км^2, плакорного — от 0 до 157 м на км^2, низкогорного — от 0 до 750 м на км^2, среднегорного — от 3 до 790 м на км^2. Средние значения показателя глубины расчленения рельефа составляют в пределах гидроморфного уровня 12 м на км^2, плакорного — 17 м на км^2, низкогорного — 70 м на км^2, среднегорного — 193 м на км^2.

Таким образом, амплитуды значений по фактору «Глубина расчленения рельефа, м» значительно перекрываются, что свидетельствует о том, что рассматриваемый фактор не является ведущим в формировании ландшафтных уровней Крымского полуострова.

ВЫВОДЫ

1. На территории Крымского полуострова показатель глубины расчленения рельефа колеблется от 0 до 790 м на км^2. Среднее значение показателя составляет 46 м на км^2.

2. По территории Крымского полуострова показатель глубины расчленения рельефа распределён неравномерно. В пределах гидроморфного ландшафтного уровня он достигает 288 м на км^2, плакорного — 157 м на км^2, низкогорного — 750 м на км^2, среднегорного — 790 м на км^2. Средние значения составляют соответственно 12 м на км^2 в пределах гидроморфного, 17 м на км^2 — плакорного, 70 м на км^2 — низкогорного и 193 м на км^2 — среднегорного ландшафтных уровней.

3. Показатель глубины расчленения рельефа не относится к ведущим факторам формирования ландшафтной неоднородности Крымского полуострова, о чём свидетельствует значительное перекрытие экологических ниш ландшафтных уровней в пространстве фактора «Глубина расчленения рельефа, м».

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках темы НИР «Изучение пространственно-временной организации водных и сухопутных экосистем с целью развития системы оперативного мониторинга на основе данных дистанционного зондирования и ГИС-технологий. Регистрационный номер: АААА-А19-119061190081-9».

ACKNOWLEDGEMENTS

The work presented in this paper was carried out in the framework of RF state task according to plan of scientific research of the A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (“Studying the spatio-temporal organization of water and land ecosystems with the aim of developing an operational monitoring system based on remote sensing data and GIS technologies”. Registration number AAAA-A19-119061190081-9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анисимов В.И.* Морфометрический анализ рельефа. Сочи: СГуТиКД, 1999. 321 с.
2. *Антипцева Ю.О., Думит Ж.А.* Морфометрический анализ рельефа с использованием ГИС-технологий при оценке рекреационного потенциала Лагонакского нагорья (Северо-Западный Кавказ). Геоморфология, 2009. № 1. С. 45–50.
3. *Атаев З.В., Братков В.В.* Применение морфометрического анализа рельефа для выделения горно-равнинных ландшафтов-экотонов (на примере Северо-Восточного Кавказа). Юг России: экология, развитие, 2012. № 2. С. 87–93.
4. *Братков В.В., Атаев З.В., Алсабекова А.А., Сулумов С.Х.* Эрозионное расчленение рельефа Северо-Восточного Кавказа как фактор рекреационного освоения территории. Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки, 2011. № 4. С. 99–103.
5. *Волков Н.М.* Принципы и методы картометрии. М.–Л.: Издательство Академии наук СССР, 1950. 328 с.
6. *Гришанков Г.Е.* Ландшафтные уровни материков и географическая зональность. Известия Академии наук СССР. Серия географическая, 1972. № 4. С. 3–18.
7. *Гродзинський М.Д.* Ландшафтна екологія. Київ: Знання, 2014. 550 с.
8. *Клюкин А.А.* Экзогеодинамика Крыма. Симферополь: Таврия, 2007. 320 с.
9. *Курлович Д.В.* Морфометрический ГИС-анализ рельефа Беларуси. Земля Беларуси, 2013. № 4. С. 42–48.
10. *Лысова В.Ф.* Сравнительный анализ вертикальной и горизонтальной расчленённости рельефа бассейна Малой Визинги. Вестник Коми государственного педагогического института, 2012. № 10. С. 117–124.
11. *Мехбалиев М.М.* Прикладное морфометрическое исследование глубины расчленения склонов горных геоморфосистем Большого Кавказа (в пределах Азербайджана). Академический журнал Западной Сибири, 2015. Т. 11. № 3 (58). С. 79–82.
12. *Михайлов В.А.* Комплексный морфометрический анализ Тарханкутского полуострова с помощью ГИС. Современные научные исследования и инновации, 2015. № 2–4 (46). С. 5–13.
13. *Мунтян А.Н.* Изучение влияния горизонтальной и вертикальной расчлененности территории и уклонов местности на эрозионную опасность Приднестровья. Вестник Приднестровского университета. Серия: Медико-биологические и химические науки, 2015. № 2 (50). С. 134–138.
14. *Орехова Г.А., Новых Л.Л.* Природное разнообразие родников верховий бассейнов рек Северский Донец и Ворскла. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Естественные науки, 2017. Т. 40. № 18 (267). С. 131–139.
15. *Пириев Р.Х.* Методы морфометрического анализа рельефа (на примере территории Азербайджана). Баку: Элм, 1983. 119 с.
16. *Погорелов А.В., Думит Ж.А.* Рельеф бассейна р. Кубани (морфологический анализ). М.: ГЕОС, 2009. 220 с.
17. *Позаченюк Е.А., Петлюкова Е.А.* ГИС-анализ морфометрических показателей рельефа Центрального Предгорья Главной гряды Крымских гор для целей ландшафтного планирования. Учёные записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология, 2016. Т. 2 (68). № 2. С. 96–113.

18. *Спиридонов А.И.* Основы общей методики полевых геоморфологических исследований и геоморфологического картирования. М.: Высшая школа, 1970. 456 с.
19. *Табунщик В.А., Петлюкова Е.А.* Густота расчленения рельефа на территории Крымского полуострова. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки, 2019. № 1 (201). С. 95–100.
20. *Халилов Г.А., Абушова С.Н.* Морфометрический метод экогеоморфологической оценки рельефа Азербайджанской республики (на примере междуречья Храми-Зайам). Географический вестник, 2014. № 4 (31). С. 17–21.
21. *Florinsky I.V.* Digital terrain analysis in soil science and geology. Amsterdam: Elsevier/Academic Press, 2016. 486 p.

REFERENCES

1. *Anisimov V.I.* Morphometric analysis of the relief. Sochi: SSUTRB (Sochi State University of Tourism and Resort Business), 1999. 321 p. (in Russian).
2. *Antiptseva Yu.O., Dumit Zh.A.* GIS-based morphometric analysis for the assessment of the recreational potential of Lagonak highland. Geomorphologiya, 2009. No 1. P. 45–50 (in Russian).
3. *Atayev Z.V., Bratkov V.V.* The use of morphometric analysis to highlight the relief of mountain-lowland landscapes-ecotones (on the example of the North-Eastern Caucasus). South of Russia: ecology, development, 2012. No 2. P. 87–93 (in Russian).
4. *Bratkov V.V., Atayev Z.V., Alsabekova A.A., Sulumov S.Kh.* Erosional dismemberment of the relief of the northeastern Caucasus as a factor in the recreational development of the territory. News of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and exact sciences, 2011. No 4. P. 99–103 (in Russian).
5. *Florinsky I.V.* Digital terrain analysis in soil science and geology. Amsterdam: Elsevier/Academic Press, 2016. 486 p.
6. *Grishankov G.Ye.* Landscapes of continents and geographical zoning. Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Seriya Geograficheskaya, 1972. No 4. P. 3–18 (in Russian).
7. *Grodzinsky M.D.* Landscape ecology. Kiev: Znann'ia, 2014. 550 p. (in Ukrainian).
8. *Khalilov G.A., Abushova S.N.* Morphometric method of ecogeomorphological estimation of the relief of the Republic of Azerbaijan (on the example of the interfluve Khrami-Zayam). Geographical Bulletin, 2014. No 4 (31). P. 17–21 (in Russian).
9. *Klyukin A.A.* Exogeodynamics of the Crimea. Simferopol: Tavriya, 2007. 320 p. (in Russian).
10. *Kurlovich D.V.* Morphometric GIS analysis of the relief of Belarus. Land of Belarus, 2013. No 4. P. 42–48 (in Russian).
11. *Lysova V.F.* Comparative analysis of the vertical and horizontal dismemberment of the relief of the Malaya Vizingua basin. Bulletin of the Komi State Pedagogical Institute, 2012. No 10. P. 117–124 (in Russian).
12. *Mekhbaliyev M.M.* Applied morphometric study of the depth of the dismemberment of the slopes of the mountain geomorphic systems of the Greater Caucasus (within Azerbaijan). Academic Journal of West Siberia, 2015. V. 11. No 3 (58). P. 79–82 (in Russian).
13. *Mikhaylov V.A.* Complex morphometric analysis of the Tarkhankut peninsula with the help of GIS. Modern scientific researches and innovations, 2015. No 2–4 (46). P. 5–13 (in Russian).
14. *Muntyan A.N.* Study of the influence of horizontal and vertical dismemberment of terrain and deviations of the terrain on the erosion hazard of Transdniestria. Bulletin of the Transnistrian University. Series: Biomedical and Chemical Sciences, 2015. No 2 (50). P. 134–138 (in Russian).
15. *Orekhova G.A., Novykh L.L.* Natural diversity of the springs in the upper basins of the Seversky Donets and Vorskla Rivers. Belgorod State University Scientific Bulletin. Series: Natural sciences, 2017. V. 40. No 18 (267). P. 131–139 (in Russian).
16. *Piriyev R.Kh.* Methods of morphometric analysis of the relief (on the example of the territory of Azerbaijan). Baku: Elm, 1983. 119 p. (in Russian).

17. *Pogorelov A.V., Dumit Zh.A.* Relief of the basin of the river Kuban (morphological analysis). Moscow: GEOS, 2009. 220 p. (in Russian).
18. *Pozachenyuk Ye.A., Petlyukova Ye.A.* GIS-analysis of morphometric indices of the relief of the Central Foothills of the Main Ridge of the Crimean Mountains for the purposes of landscape planning. Scientific notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology, 2016. V. 2 (68). No 2. P. 96–113 (in Russian).
19. *Spiridonov A.I.* Fundamentals of the general methodology of field geomorphological studies and geomorphological mapping. Moscow: Higher school, 1970. 456 p. (in Russian).
20. *Tabunshchik V.A., Petlyukova Ye.A.* Density of the relief dissection on the territory of the Crimean Peninsula. Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Natural science, 2019. No 1 (201). P. 95–100 (in Russian).
21. *Volkov N.M.* Principles and methods of cartometry. Moscow−Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1950. 328 p. (in Russian).

УДК: 911.37 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-106-119**

И.П. Супрунчук[1], В.В. Чихичин[2], П.М. Полян[3]

ПОЛИМАСШТАБНЫЙ АНАЛИЗ МИГРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЮГЕ РОССИИ С ПОМОЩЬЮ СРЕДСТВ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены возможности использования геоинформационных систем для мониторинга миграционных процессов на разных территориальных уровнях. Предложена концепция разработки и функционирования системы геоинформационного мониторинга миграционных процессов в России, которая даёт возможность получения, обновления и анализа информации, обеспечивает моделирование процессов, разработку эффективных управленческих решений. Система геоинформационного мониторинга реализована на основе реляционной системы управления базами данных Microsoft SQL Server и семейства программных продуктов ESRI ArcGIS и состоит из пяти ключевых составляющих: аппаратные средства, программное обеспечение, данные, исполнители и методы.

С помощью геоинформационной системы мониторинга проведено исследование современных миграционных процессов на нескольких территориальных уровнях — от макрорегионального до локального. На макрорегиональном уровне (на примере юга Европейской части России) наблюдается дифференциация регионов по уровню миграционного прироста и характеру миграционных процессов. На региональном уровне мониторинга рассмотрены особенности внутренних миграционных процессов в Ставропольском крае. Зона миграционной убыли в крае охватывает почти все сельские районы. Миграционный прирост населения характерен только для крупных городов и их пригородных зон. На локальном поселенческом уровне система геоинформационного мониторинга позволяет изучать такие характеристики миграционных процессов, как этнический и социальный состав мигрантов, распределение мигрантов по населённым пунктам, а также миграционные связи между различными территориями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геоинформационный мониторинг, миграционные процессы, геоинформационные системы, юг Европейской части России, Ставропольский край

---

[1] Северо-Кавказский федеральный университет, Кафедра социально-экономической географии, геоинформатики и туризма, ул. Пушкина, д. 1, 355000, Ставрополь, Россия; *e-mail:* **ilia_suprunchuk@mail.ru**
[2] Северо-Кавказский федеральный университет, Кафедра социально-экономической географии, геоинформатики и туризма, ул. Пушкина, д. 1, 355000, Ставрополь, Россия; *e-mail:* **wawachi@mail.ru**
[3] Институт географии Российской академии наук, Отдел социально-экономической географии, Старомонетный пер., д. 29, 119017, Москва, Россия; *e-mail:* **pavel.polian@gmail.com**

Ilya P. Suprunchuk[1], **Vasiliy V. Chikhichin**[2], **Pavel M. Polyan**[3]

MULTI-SCALE ANALYSIS OF MIGRATION PROCESSES IN THE SOUTH OF RUSSIA USING GEOINFORMATION MONITORING TOOLS

ABSTRACT

The article considers the possibilities of using geoinformation systems for monitoring migration processes at different territorial levels. The concept of development and functioning of the system of geoinformation monitoring of migration processes in Russia is proposed. This system makes it possible to obtain, update and analyze information, provide process modeling, and develop effective management solutions. The geoinformation monitoring system is implemented on the basis of the Microsoft SQL Server relational database management system and the ESRI ArcGIS family of software products and consists of five key components: hardware, software, data, performers, and methods.

The study of modern migration processes at several territorial levels — from macro-regional to local-was carried out using the geo-information monitoring system. At the macro-regional level (for example, in the South of Russia), there is a differentiation of regions by the level of migration growth and the nature of migration processes. At the regional level of monitoring, the features of internal migration processes in the Stavropol territory are considered. The migration loss zone in the province covers almost all rural areas. Migration growth of the population is typical only for large cities and their suburban areas. At the local settlement level, the geo-information monitoring system makes it possible to study such characteristics of migration processes as the ethnic and social composition of migrants, the distribution of migrants by localities, and migration links between different territories.

KEYWORDS: geoinformation monitoring, migration processes, geoinformation systems, South of the European part of Russia, Stavropol territory

ВВЕДЕНИЕ

Юг Европейской части России традиционно отличается активным характером миграционных процессов, что обусловлено рядом особенностей географического положения и социально-экономического развития региона. В последние десятилетия для территории характерна смена форм миграции, масштабов миграционного потока и его этнической структуры. В новых социально-экономических условиях изменилась в целом география миграционных потоков, этнических миграций как на страновом, так и региональном, а также локальном и поселенческом уровнях. Отмечаются изменения миграционных потоков в системе «город-село». В условиях общего демографического кризиса миграционный прирост сокращается, и миграция не компенсирует естественную убыль населения, расширяются ареалы, теряющие население в ходе миграции. Усиливается дифференциация городских и сельских поселений по характеру миграционного прироста, выделяются поселения с устойчивым миграционным приростом и территории, стабильно теряющие своё население. Современные миграционные процессы активно меняют этническую структуру населения регионов России, влияют на изменение географии расселения отдельных народов. В свою

[1] North-Caucasus Federal University, Department of socio-economic geography, geoinformatics and tourism, Pushkin str., 1, 355000, Russia, Stavropol; *e-mail:* **ilia_suprunchuk@mail.ru**
[2] North-Caucasus Federal University, Department of socio-economic geography, geoinformatics and tourism, Pushkin str., 1, 355000, Russia, Stavropol; 1 *e-mail:* **wawachi@mail.ru**
[3] Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Department of social and economic geography, Staromonetny lane, 29, 119017, Moscow, Russia; *e-mail:* **pavel.polian@gmail.com**

очередь, высокая скорость трансформации этнической структуры населения может приводить к нарастанию межнациональной напряженности в отдельных регионах страны.

В связи с этим актуальным представляется выявление пространственно-временных трансформаций миграционных процессов, идущих на разных территориальных уровнях, — от страны в целом до отдельных поселений, а определение механизмов и методов управления миграционными процессами становится ключевой задачей современного государственного управления. Решение такой задачи невозможно без организации непрерывного получения достоверной и актуальной информации. Наиболее адекватным методом слежения за миграционными процессами следует считать комплексный мониторинг, позволяющий не только получать точные количественные данные, но и отслеживать векторные характеристики и тенденции их изменений с учётом территориального масштаба. Выявление пространственно-временных особенностей миграционных процессов подразумевает обработку и обобщение больших массивов информации, что нереально без использования современных способов, в частности геоинформационных технологий. ГИС не только гарантируют возможность получения, обновления и анализа информации, но и обеспечивают оперативное моделирование процессов, разработку на этой базе действенных управленческих решений с учётом их возможных последствий. Таким образом, именно геоинформационный мониторинг является наиболее эффективным методом информационного обеспечения миграционной политики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как показывает международный опыт, наибольший эффект накопления новых знаний о пространственно-временных процессах достигается при использовании геоинформационных методов и подходов, которые позволяют детально структурировать пространственную статистику на всех масштабных уровнях, в т.ч. с учётом административно-территориального устройства стран и регионов. Картографический инструментарий ГИС позволяет достаточно быстро визуализировать исследуемые процессы, готовить ГИС-модели, карты, схемы. Такой подход даёт возможность «синтезировать» процесс исследования и получать качественно новые знания. В этой связи использование геоинформационных технологий для анализа миграционных процессов на разных масштабных уровнях представляется важным и неоспоримым.

Система геоинформационного мониторинга миграционных процессов — это комплексная система, консолидирующая географическую и атрибутивную информацию об исследуемой территории в едином хранилище для целей проведения пространственно-временного анализа, оперативного мониторинга, а также моделирования процессов. Геоинформационный мониторинг понимается нами как система сбора данных о состоянии пространственно-временных индикаторов территориально распределенных объектов, явлений и процессов, обработка и анализ результатов с использованием ГИС-технологий, визуализация (картографирование), анализ и оценка, прогнозирование изменения состояния с целью поддержки принятия управленческих решений.

Система геоинформационного мониторинга реализована на основе реляционной системы управления базами данных Microsoft SQL Server и семейства программных продуктов ESRI ArcGIS: настольная часть на базе ESRI ArcGIS. Основными статистическими источниками системы служат данные Федеральной службы государственной статистики об общей численности населения, показателях естественного и механического движения населения, численности городского и сельского населения. Такие данные имеют максимальную частоту обновления (от 1 до 4 р./год) и территориальную «глубину» (от РФ в целом до отдельных муниципальных образований). Дополнительной статистической базой исследования выступают данные, полученные в результате обработке талонов прибытия и выбытия мигрантов с помощью авторского программного комплекса «Анкета».

Используемый в работе принцип полимасштабности понимается как метод оперирования масштабами — рангами территории при исследовании для выявления пространственно-временных особенностей этно-демографических процессов. Полимасштабность данного исследования реализована через следующие уровни: страновой (Российская Федерация), региональный (субъект РФ), районный (муниципальный район) и поселенческий (населённый пункт).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для организации системы мониторинга миграционных процессов нами была предложена концептуальная схема (рис. 1). При её создании использован опыт разработки в лаборатории «Народонаселение и ГИС-технологии» Северо-Кавказского федерального университета систем геоинформационного мониторинга демографических процессов [*Раужин,* 2011], этнических процессов [*Черкасов*, 2013], миграционных процессов [*Белозёров, Раужин,* 2012], террористической деятельности [*Супрунчук*, 2014], системы горного расселения [*Чернова*, 2016].

Разработанная геоинформационная система мониторинга включает 5 ключевых составляющих: аппаратные средства, программное обеспечение, данные, исполнители и методы. Программное обеспечение ГИС содержит функции и инструменты, необходимые для хранения, анализа и визуализации географической (пространственной) информации. В данном случае это функции и инструменты, основанные на программной платформе ArcGIS Spatial Analyst фирмы ESRI. Система ArcGIS, подобно другим мощным информационным системам, обладает чётко определённой моделью для работы с данными, прежде всего пространственными [*Белозёров*, 2019].

Важным элементом системы являются функциональные блоки. Первый блок — хранилище пространственной информации. Реализованы возможности использования различных типов данных, обеспечивающих проведение геоинформационного мониторинга. Второй блок — веб-узел, позволяющий оперативно моделировать на веб-странице тематические карты, отражающие состояние процессов на территории. Третий блок — модуль автоматического формирования запросов к базе геоданных, являющийся частью веб-страницы — позволяет просмотреть и проанализировать в онлайн-режиме хранящуюся в базе геоданных статистическую информацию, а также производить её корректировку или вводить новую, ранее не имеющуюся в системе мониторинга [*Belozerov et al.*, 2013].

Визуализация является важным элементом любой ГИС и позволяет готовить пространственно-временные модели. Полимасштабный геоинформационный мониторинг предполагает привлечение математических программных продуктов с использованием информации, хранящейся в базе геоданных. Геоинформационный мониторинг позволяет конструировать модели динамики явления, модели структуры явлений, а также повысить автоматизацию воспроизводства картографических изображений [*Тикунов и др.*, 2014].

Современная миграционная ситуации на юге Европейской части России характеризуется следующими чертами:

- на фоне общего сокращения числа регионов явное доминирование с положительным сальдо миграций Краснодарского края, концентрирующего более 95 % всего южнороссийского миграционного прироста;
- неустойчивость миграционного прироста в равнинных регионах, в частности, в Ростовской области и Ставропольском крае [*Белозёров и др.*, 2016];
- отчётливое проявление миграционного оттока из республик Северного Кавказа (за исключением Адыгеи);
- для северокавказских республик пополнение населения обеспечивается только за счёт мигрантов из стран ближнего зарубежья, однако миграционный прирост в несколько раз меньше оттока собственного населения;

- в этнической структуре выезжающих мигрантов растёт доля титульных этносов [*Белозёров и др.*, 2018].

В числе аттрактивных в миграционном отношении регионов в концентрации мигрантов стал доминировать Краснодарский край, что обусловлено реализацией здесь масштабных инвестиционных проектов. В «принимающей» зоне снизилось значение Ростовской области и Ставропольского края (рис. 2). В свою очередь, произошло увеличение числа «отдающих» население субъектов за счёт Северной Осетии − Алании. Причём лидерство по объёмам миграционной убыли в этой зоне перешло Дагестану. Миграционный прирост населения в районе формируется преимущественно за счёт международной миграции. По географическим особенностям формирования миграционного прироста все регионы Северного Кавказа можно разделить на три группы. В первой группе сальдо миграции преимущественно складывается за счёт межрегионального тренда при второстепенной роли международной миграции (Краснодарский край, Адыгея). В Ингушетии и Ростовской области миграционный прирост приходится на международную миграцию. В остальных субъектах Северного Кавказа внутренняя миграция отличается устойчивой миграционной убылью, которая по своим масштабам перекрывает миграционный прирост международной миграции [*Соловьёв*, 2018].

В рамках системы мониторинга миграционные процессы рассматриваются через характеристику общего миграционного потока, его территориальных, этнических, демографических особенностей на разных территориальных уровнях — от странового до поселенческого. Возможности геоинформационного мониторинга апробированы при исследовании миграционных процессов в Ставропольском крае на региональном, локальном, поселенческом уровнях.

Ставропольский край является своеобразным «коридором миграционных ветров» между нестабильными северокавказскими республиками и остальной страной. Непосредственное расположение вблизи бывших горячих точек (Чечни, зоны осетино-ингушского конфликта и др.), а также не менее мощных очагов межэтнической напряженности в государствах Южного Кавказа (грузино-югоосетинского, азербайджано-армянского, грузино-абхазского) обусловило массовый приток вынужденных мигрантов на Ставрополье [*Белозёров и др.*, 2014].

Ставшие традиционными в прошлые десятилетия стрессовые факторы миграции в настоящее время утрачивают своё значение. В конце XX − начале XXI вв. затишье в горячих точках, изменение социально-экономической ситуации в стране, этнополитических процессов в странах ближнего зарубежья усилили влияние экономического фактора на ход миграционных процессов.

Зона миграционной убыли населения распространена по территории Ставропольского края с востока и северо-востока на юго-запад и запад. В настоящее время эта закономерность просматривается как нельзя лучше. Самая высокая миграционная убыль населения характерна для Туркменского, Нефтекумского, Апанасенковского, Степнового, Арзгирского и Левокумского районов. А самый высокий миграционный прирост — в Шпаковском районе и Ставрополе. Также прирост населения отмечается в Георгиевске, Ессентуках, Кисловодске, Лермонтове, Пятигорске, Невинномысске, Грачёвском и Предгорном районах (рис. 3). Если в 1990-е гг. большая часть городов и районов края входили в зону высокого миграционного прироста населения, то в 2000-е гг. она значительно сократилась и включает преимущественно Ставропольскую и Кавминводскую агломерации.

Исследование миграционных процессов в Ставропольском крае позволило выявить ряд региональных и внутрирегиональных особенностей. В целом миграция обеспечила компенсацию естественной убыли и рост численности населения в крае. В 1990-е гг. преобладали стрессовые миграции, репатриация, обеспечившие положительный миграционный прирост в большинстве городов и районов края, затем в 2000-е гг. стрессовые факторы сменились на экономические, внешний приток мигрантов ослабел, и в последние годы в крае

отмечается отрицательный миграционный прирост. При этом усилилось внутрирегиональное перемещение населения. Сформировались две основные зоны притяжения мигрантов — Ставропольская и Кавминводская агломерации; на остальных территориях наблюдается миграционная убыль. В настоящее время в условиях отрицательного сальдо миграции в крае наблюдается усиление тенденции миграционного оттока и увеличение числа поселений с отрицательными показателями сальдо миграций.

Изменился характер этнических миграций. В первой половине 1990-х гг. в крае активно расселялись русские и армяне, отмечался отток ряда северокавказских народов, в частности, чеченцев и даргинцев, но в последующие годы доля русских мигрантов уменьшилась, сохранился приток армян, возобновилось движение даргинцев, чеченцев и других народов Кавказа. Изменение этнических особенностей воспроизводства населения повлекло изменение центра тяжести расселения этносов. В крае центр тяжести расселения русских смещается в северо-западном направлении; вслед за ним перемещается центр тяжести расселения других народов — армян, чеченцев, даргинцев, что ведёт к росту полиэтнизации западных и центральных территорий края [*Белозеров и др.*, 2018].

Рассмотрим пример использования средств геоинформационного мониторинга для анализа особенностей миграционных процессов в Андроповском районе Ставропольского края. Эту территорию можно считать относительно «типовой»; изучение миграционных процессов в этом районе может многое дать в понимании главных тенденций сельских миграций в Ставропольском крае. Для анализа выбраны 1992 и 2006 гг., которые в миграционном отношении отличаются коренным образом по основным механизмам и объёмам миграции не только в районе, но и в целом в Ставропольском крае и России [*Соловьев, Жиренко,* 2009].

Территориально миграционный прирост в районе в 1992 г. распределялся неравномерно. Основная его часть пришлась на районный центр — село Курсавку, а также крупные сёла с населением более 1 000 чел. — Солуно-Дмитриевское, Крымгиреевское, Новый Янкуль и станицу Воровсколесскую. При этом практически все населённые пункты испытали миграционный прирост. Исключение составили лишь Султан, Дубовая Балка и Киан-Подгорное. В целом такое распределение миграционного потока вполне логично, т.к. доля в миграционном потоке примерно соответствует доле того или иного населённого пункта в населении района. Предпочтение въезжающими мигрантами крупных сельских населённых пунктов также очевидно, т.к. в сельской местности чем крупнее населённый пункт, тем больше возможностей для жителей он предоставляет. Миграционный поток в районе географически ещё был слабо дифференцирован, мигранты распределялись по его территории практически прямо пропорционально численности населения населённых пунктов (рис. 4).

В 2006 г. миграционные процессы в районе носили более «спокойный» характер. Складывается некоторая модель замещения населения — выезжают из района в основном на учёбу в города, а также молодое трудоспособное население, руководствующееся экономическими соображениями. Прибывшие мигранты часто используют район как перевалочный пункт на пути своих дальнейших перемещений. Расположение района между двумя территориями с крупными городами — Кочубеевским и Минераловодским, а также относительно небольшое расстояние (около 100 км) до двух городских агломераций — Ставропольской и Кавминводской — делают район также привлекательным для трудовых мигрантов.

В 2006 г. миграционный поток географически стал более дифференцированным. В отличие от 1992 г., когда практически все населённые пункты испытывали миграционный прирост, в 2006 г. населённых пунктов с миграционной убылью и миграционным приростом стало примерно поровну, причём величина населённого пункта в меньшей степени влияла на показатель, чем в 1992 г. Так, миграционный прирост испытывали как крупные населённые пункты района — Курсавка, Крымгиреевское, Куршава, Янкуль, Суркуль, Казинка, так и средние и малые — Нижнеколоннский, Алексеевское, Овражный, Верхний

Янкуль и др. Такая же ситуация характерна и для пунктов с миграционной убылью. К ним относятся и крупные поселения — Солуно-Дмитриевское, Новый Янкуль, Водораздел, Воровсколесская, Султан и Красноярское, и средние и мелкие — Подгорное, Киан, Павловка и др. Отсюда следует вывод о внутренних факторах различия населённых пунктов района по показателям.

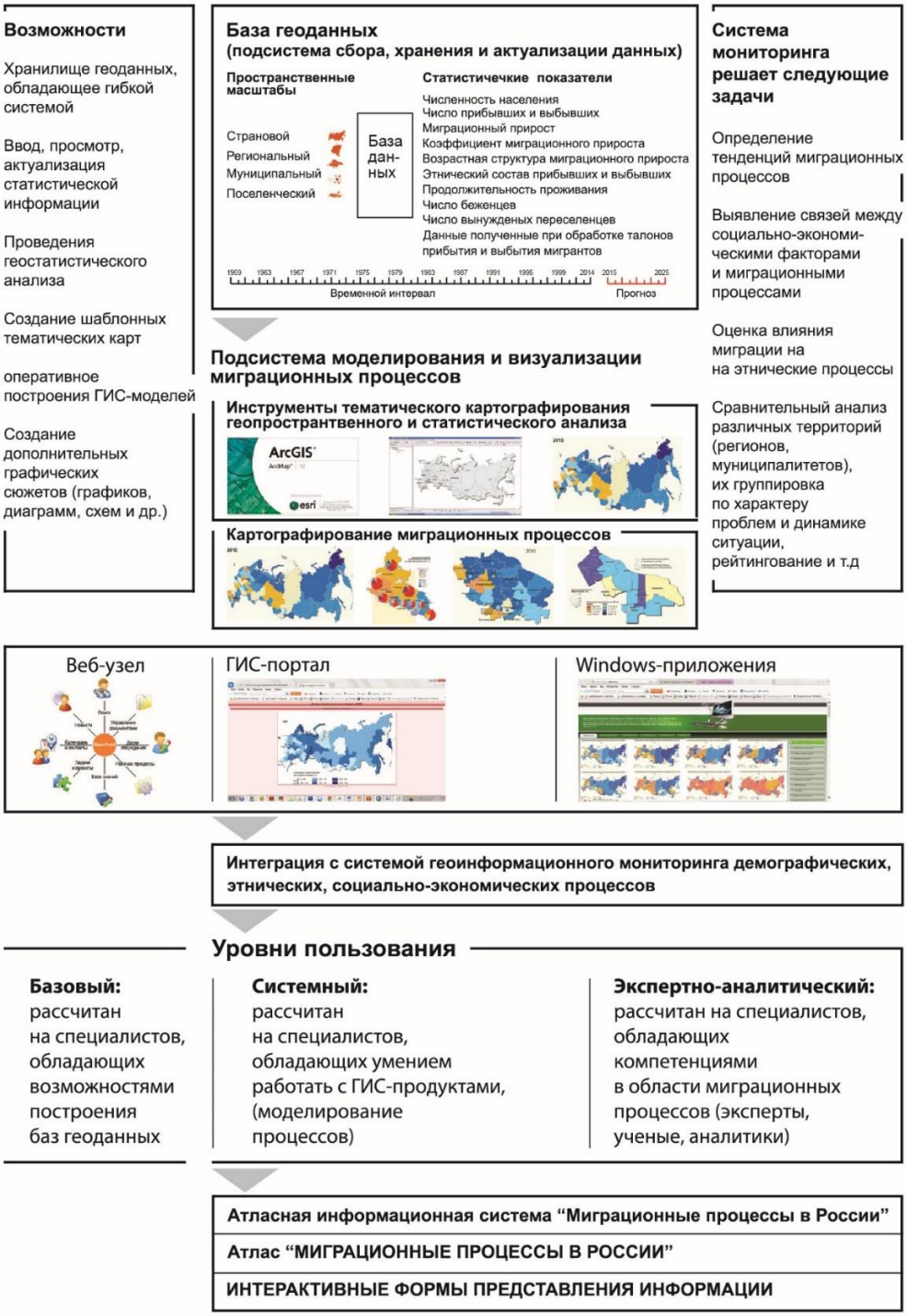


Рис. 1. Концептуальная схема системы геоинформационного мониторинга миграционных процессов в России [Тикунов и др., 2014]
Fig. 1. Conceptual scheme of the system of geoinformation monitoring of migration processes in Russia [Tikunov et al., 2014]

Рис. 2. Миграционная ситуация в регионах Юга Европейской части России в 2013 г. [Белозеров и др., 2014]
Fig. 2. Migration situation in the regions of South of the European part Russia in 2013 [Belozerov et al., 2014]

Важным аспектом миграционных процессов выступают этнические характеристики потока мигрантов и территориальные особенности их расселения. В начале 1990-х гг. наблюдался значительный приток в район русских, армян и греков. Это было связано с репатриацией русских из бывших республик СССР, а также этническими конфликтами в Азербайджане и Грузии — для армян и греков. Наибольшую миграционную убыль в этот период показали кумыки и карачаевцы, предположительно вернувшиеся в свои титульные республики. Для 2006 г. характерны околонулевые значения миграционного прироста. Этносами, увеличившими свою численность за счет миграции, выступили аварцы, осетины и татары. Наибольшая миграционная убыль характерна для русских и чеченцев. Большую

часть в миграционном потоке составляют русские (от 50 до 68 %). Если в 1992 г. отмечался значительный прирост, гл. обр. за счёт вынужденных мигрантов, то в 2006 г., несмотря на увеличение общей доли в потоке, наблюдается небольшая убыль, вызванная экономическими причинами.

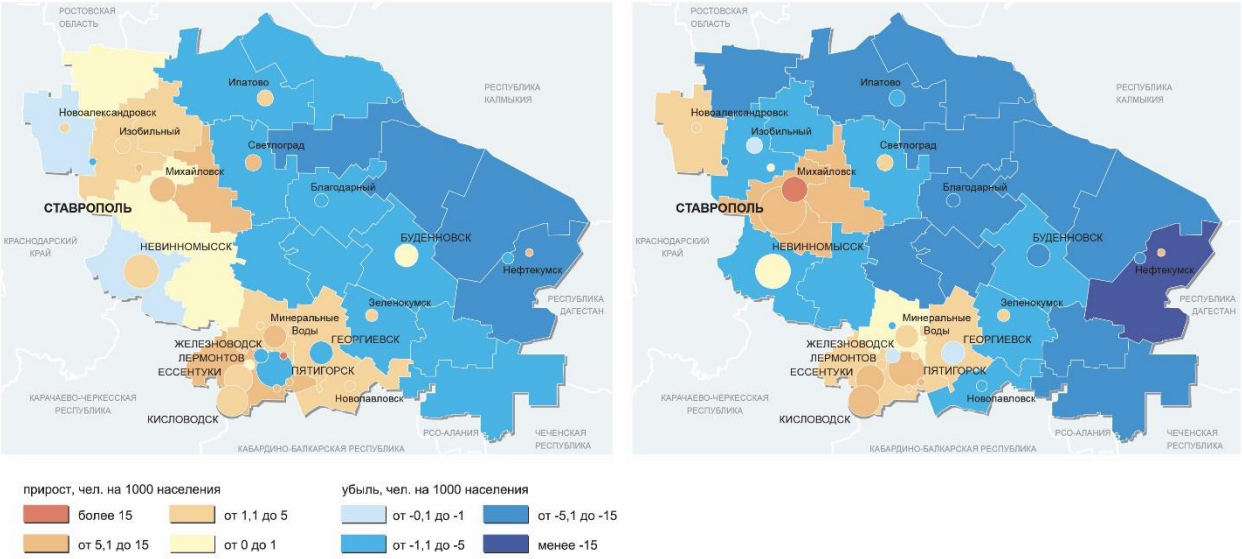


Рис. 3. Миграционный прирост и убыль Ставропольском крае в 2000–2007 гг. (слева) и в 2008–2013 гг. (справа) [Белозёров и др., 2014]
Fig. 3. Migration growth and decline in Stavropol territory in 2000–2007 (left) and in 2008–2013 (right) [Belozerov et al., 2014]

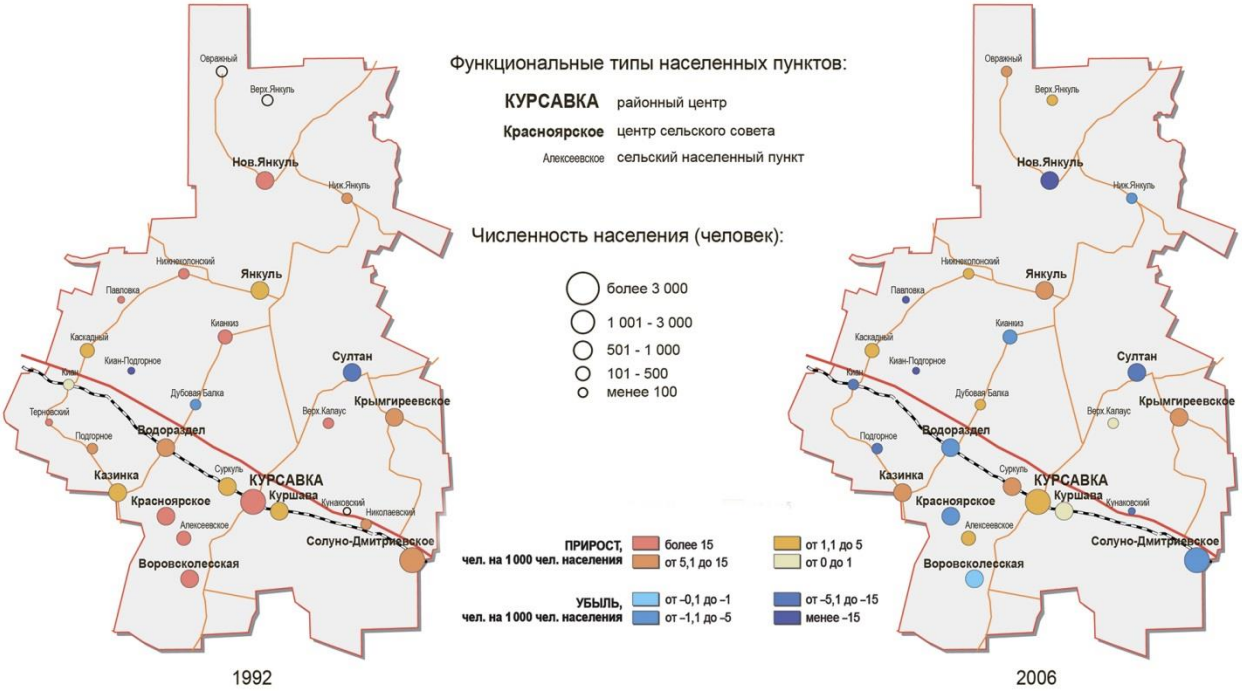


Рис. 4. Распределение миграционного потока по функциональным типам поселений Андроповского района в 1992 и 2006 гг.
Fig. 4. Distribution of migration flow by functional types of settlements in Andropovsky district in 1992 and 2006

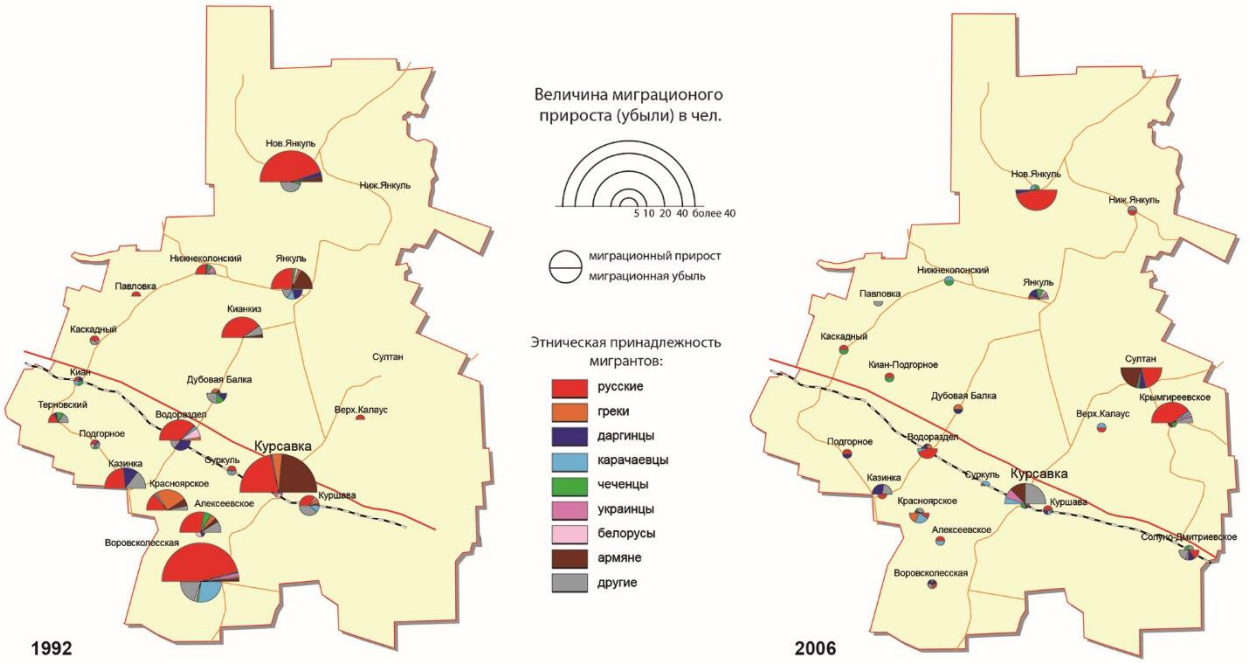


Рис. 5. Этно-территориальные особенности миграционных процессов в Андроповском районе в 1992 и 2006 гг.
Fig. 5. Ethno-territorial features of migration processes in Andropovsky district in 1992 and 2006

Вторыми по доле в миграционном потоке являются армяне. Как и русские в 1992 г., они активно «вселялись» на территорию района. Эта миграция также имела вынужденный характер — в основе потока лежали беженцы из Нагорного Карабаха и Баку. В отличие от русских, к 2006 г. объём потока снизился, но сальдо осталось положительным. В район продолжают прибывать армяне, в первую очередь по экономическим причинам. Значительное число армян в год покидает район, выезжая в ближайшие города. С этой точки зрения, территория для армян выступает транзитной — адаптируясь здесь в течение нескольких лет, они затем переезжают в более крупные населённые пункты Ставропольского края или даже за его пределы.

Интерес представляет вопрос распределения этнической миграции по населённым пунктам района (рис. 5). В 1992 г. все населённые пункты района в большей или меньшей степени принимали русское население. Остальные этносы расселялись неравномерно, выбирая для заселения определённые населённые пункты. Так, армяне расселялись в районном центре — с. Курсавка, а также с. Янкуль. Бóльшая часть греков поселилась в с. Красноярском, некоторая часть в Курсавке и с. Крымгиреевском. У даргинцев наблюдался процесс перераспределения — их число уменьшилось в сс. Янкуль, Водораздел, увеличилось в сс. Казинка и Крымгиреевское. Также отчётливо прослеживается процесс выезда карачаевцев — наибольшее их число выехало из станицы Воровсколесской и с. Крымгиреевского.

В 2006 г. некоторые тенденции территориального распределения изменились. Так, русские имеют миграционный прирост только в с. Крымгиреевском, в то время как в сс. Новый Янкуль, Султан и Водораздел наблюдается значительная миграционная убыль русского населения. Армяне «выбывают» из с. Султан, «прибывают» в с. Курсавку. Миграция титульных народов Северного Кавказа сохраняет характер, принятый в начале 1990-х гг. — в некоторых населённых пунктах отмечается миграционный прирост таких мигрантов, в некоторых, наоборот, убыль.

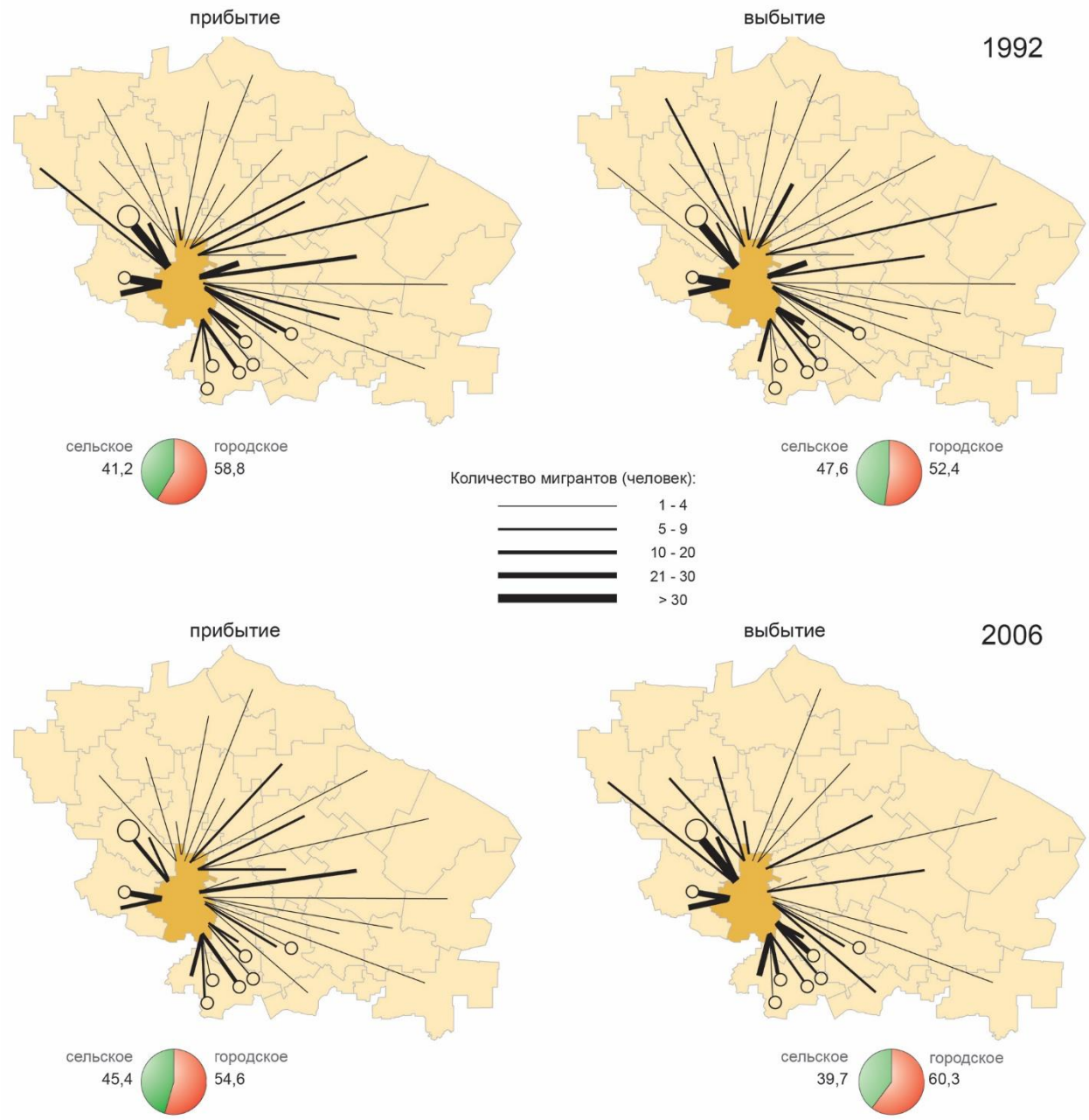


Рис. 6. Внутрирегиональные миграционные связи Андроповского района в 1992 и 2006 гг.
Fig. 6. Intraregional migration relations of the Andropovsky district in 1992 and 2006

Возможности системы мониторинга миграционных процессов на локальном уровне позволяют изучать внутрирегиональные миграционные связи территории, а также проанализировать миграции типа «село−город» (рис. 6). Особенности этих связей также значительно отличаются по периодам. В начале 1990-х гг. Андроповский район имел миграционные связи со всеми муниципалитетами Ставропольского края, наиболее мощные — с ближайшими сельскими районами и двумя крупными городами — Ставрополем и Невинномысском. В структуре прибывших преобладали мигранты из городской местности (59 %). Среди выбывших доли сельских и городских мигрантов были сопоставимы — 48 и 52 % соответственно. Фактически происходит миграционный процесс по типу «город−село».

К середине 2000-х гг. ситуация существенно изменяется. Сужается география миграционных связей внутри края и их интенсивность. Миграционные процессы принимают

классическое для сельской местности направление «село–город». А наиболее связными с районом становятся городские территории — Ставрополь, Невинномысск и вся зона Кавминводской агломерации.

ВЫВОДЫ

1. Полимасштабная геоинформационная система содержит крупные массивы миграционных показателей, тесно связана с Интернет-технологиями и позволяет на качественно новом уровне и оперативно проводить мониторинг миграционных процессов. Это значительно расширяет доступ к миграционным показателям разного территориального уровня, упрощает процедуру отображения статистической информации, её дополнения и оперативного изменения, автоматизирует процесс анализа миграционных процессов, повышает оперативность и эффективность работы органов государственной власти при разработке региональной политики с учётом особенностей миграционной ситуации различных территорий.

2. Современная миграционная ситуация на юге России характеризуется сокращением числа регионов с положительным сальдо миграций, неустойчивостью миграционного прироста в Ростовской области и Ставропольском крае, продолжением миграционного оттока из республик Северного Кавказа в северном направлении и преобладанием в этнической структуре выезжающих мигрантов титульных этносов.

3. Ставропольский край традиционно являлся регионом, привлекательным для мигрантов, входил в число регионов с миграционным приростом и относился к центрам притяжения регионального и межрегионального масштаба. Устойчивые миграционные потоки на Ставрополье, особенно на протяжении 1990-х гг. и в начале XXI в., оказали значительное влияние на демографическую, этническую структуру населения, расселение народов. Однако к середине 2010-х гг. регион впервые в своей истории испытывает миграционную убыль населения и начинает терять характер миграционных процессов как потенциал для стабилизации и увеличения численности населения. Внутри края углубляется дифференциация и происходит поляризация миграционных процессов. Только крупнейшие города региона и их пригородная местность продолжают привлекать мигрантов. Остальные территории испытывают разной степени отток населения.

4. Использование геоинформационной системы мониторинга на локальном уровне позволило выявить специфические особенности миграционных процессов в Андроповском районе, которые в целом характерны для сельской местности Ставропольского края, а именно: снижение масштабов миграции и миграционного прироста, по сравнению с началом 1990-х гг.; смену вынужденного характера миграционных процессов; сохранение традиционных направлений миграции «село–город», а также стягивание мигрантов из малых и средних населённых пунктов в районный центр и крупные сельские поселения; миграционный отток русского населения из района, а также концентрированное расселение этнических мигрантов в отдельных населённых пунктах, что особенно важно для выстраивания межнациональных отношений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 20-05-00386.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, grant No 20-05-00386.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белозёров В.С., Гладилин А.В., Щитова Н.А., Черкасов А.А.* Геоинформационно-картографическое сопровождение миграционных и демографических исследований: технологии, методы, базы данных. Наука. Инновации. Технологии, 2019. № 3. С. 49–62.

2. *Белозёров В.С., Панин А.Н., Приходько Р.А., Чихичин В.В., Черкасов А.А., Махмудов Р.К., Корнева Л.И., Супрунчук И.П.* Этнический атлас Ставропольского края. Ставрополь: Издательство Северо-Кавказского федерального университета, 2014. 304 с.
3. *Белозёров В.С., Раужин И.Г.* Геоинформационная система полимасштабного мониторинга миграционных процессов в России. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2012. Т. 18. С. 280–283. DOI: 10. 35595/2414-9179-2019-1-25-110-120.
4. *Белозёров В.С., Щитова Н.А., Соловьёв И.А.* Трансформация миграционных процессов в России и её регионах: подходы и результаты исследования. Современные тенденции пространственного развития и приоритеты общественной географии. Материалы международной научной конференции в рамках IX Ежегодной научной ассамблеи Ассоциации российских географов-обществоведов. Барнаул: Издательство Алтайского государственного университета, 2018. С. 131–135.
5. *Белозёров В.С., Щитова Н.А., Черкасов А.А.* Миграции и расселение народов Дагестана в равнинном Предкавказье (на примере Ставрополья). Горный форум: Эффективное развитие горных территорий России. Материалы международной научно-практической конференции. Махачала: Дагестанский государственный институт народного хозяйства, 2016. С. 146–152.
6. *Раужин И.Г.* Полимасштабный мониторинг демографических процессов в России с использованием геоинформационных технологий. Дисс. ... канд. геогр. наук. Ставрополь: Ставропольский государственный университет, 2011. 214 с.
7. *Соловьёв И.А.* Региональные особенности миграционных процессов на Северном Кавказе. Географический вестник, 2018. № 1. С. 49–55.
8. *Соловьёв И.А., Жиренко Г.Н.* Миграционный и демографический портрет Андроповского района. Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета, 2009. № 3. С. 44–50.
9. *Супрунчук И.П.* Концепция функционирования ГИС «Террористическая деятельность в России». Вестник Северо-Кавказского федерального университета, 2014. № 3. С. 59–62.
10. *Тикунов В.С., Белозёров В.С., Панин А.Н., Черкасов А.А.* Полимасштабный геоинформационный мониторинг миграционных процессов: общие подходы. Наука. Инновации. Технологии, 2014. № 1. С. 135–144.
11. *Черкасов А.А.* Мониторинг этнических аспектов урбанизации на основе ГИС-технологий. Дисс. ... канд. геогр. наук. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2013. 165 с.
12. *Чернова И.В.* Пространственно-временная трансформация сельского расселения в республиках Северного Кавказа в 1959–2010 гг. Дисс. ... канд. геогр. наук. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2016. 146 с.
13. *Belozerov V.S., Tikunov V.S., Cherkasov A.A., Ibrahimov A., Caliskan V.* Geoinformation technologies in the study of ethnic aspects of urbanization in Russia. Geography, Environment, Sustainability, 2013. V. 6. No 4. P. 19–30.

REFERENCES

1. *Belozerov V.S., Gladilin A.V., Shchitova N.A., Cherkasov A.A.* Geoinformation and cartographic support of migration and demographic research: technologies, methods, databases. Science. Innovations. Technologies, 2019. No 3. P. 49–62 (in Russian).
2. *Belozerov V.S., Panin A.N., Prikhod'ko R.A., Chikhichin V.V., Cherkasov A.A., Makhmudov R.K., Korneva L.I., Suprunchuk I.P.* Ethnic atlas of the Stavropol territory. Stavropol: Publishing House of the North Caucasus Federal University, 2014. 304 p. (in Russian).
3. *Belozerov V.S., Rauzhin I.G.* Geoinformation system of multi-scale monitoring of migration processes in Russia. InterCarto. InterGIS. Sustainable development of territories: GIS theory and

practical. Moscow: Moscow University Press, 2012. V. 18. P. 280– 283. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-110-120 (in Russian).
4. *Belozerov V.S., Shchitova N.A., Soloviev I.A.* Transformation of migration processes in Russia and its regions: approaches and results of research. Modern trends of spatial development and priorities of social geography. Proceedings of the international scientific conference within the IX annual scientific Assembly of the Association of Russian geographers-social scientists. Barnaul: Publishing House of Altai State University, 2018. P. 131–135 (in Russian).
5. *Belozerov V.S., Shchitova N.A., Cherkasov A.A.* Migration and settlement of the peoples of Dagestan in the lowland pre-Caucasus (on the example of Stavropol). Mountain forum: Effective development of mountain territories of Russia. Materials of the international scientific and practical conference. Makhachkala: Dagestan State Institute of National Economy, 2016. P. 146–152 (in Russian).
6. *Belozerov V.S., Tikunov V.S., Cherkasov A.A., Ibrahimov A., Caliskan V.* Geoinformation technologies in the study of ethnic aspects of urbanization in Russia. Geography, Environment, Sustainability, 2013. V. 6. No 4. P. 19–30.
7. *Cherkasov A.A.* Monitoring of ethnic aspects of urbanization on the basis of GIS technologies. PhD dissertation. Stavropol: North Caucasus Federal University, 2013. 165 p. (in Russian).
8. *Chernova I.V.* Spatial-temporal transformation of rural settlement in the republics of the North Caucasus in 1959–2010. PhD of geogr. sciences diss. Stavropol: North Caucasus Federal University, 2016. 146 p. (in Russian).
9. *Rauzhin I.G.* Multi-scale monitoring of demographic processes in Russia using GIS technologies. PhD of geogr. sciences diss. Stavropol; Stavropol state University, 2011. 214 p. (in Russian).
10. *Soloviev I.A.* Regional features of migration processes in the North Caucasus. Geographical Bulletin, 2018. No 1. P. 49–55 (in Russian).
11. *Soloviev I.A., Zhirenko G.N.* Migration and demographic portrait of the Andropovsky district. Bulletin of the North Caucasus State Technical University, 2009. No 3. P. 44–50 (in Russian).
12. *Suprunchuk I.P.* Concept of functioning of GIS “Terrorist activity in Russia”. Bulletin of the North Caucasus Federal University, 2014. No 3. P. 59–62 (in Russian).
13. *Tikunov V.S. Belozerov V.S. Panin A.N. Cherkasov A.A.* Multi-Scale geoinformation monitoring of migration processes: General approaches. Science. Innovations. Technologies, 2014. No 1. P. 135–144 (in Russian).

УДК: 528.92:55 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-120-136**

А.А. Маммедов[1], Ш.Д. Мусаев[2], Я.Г. Пошивайло[3], Г.С. Федотов[4]

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕОЛОГОРАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РУД ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

АННОТАЦИЯ

Геоинформационные технологии применяются, без преувеличения, во всех сферах человеческой деятельности, и геологическая отрасль не является исключением. Геоинформационные системы в геологии помогают решить целый ряд практических задач. Геологи, специализирующиеся на разведке полезных ископаемых, используют для поиска новых экономически эффективных месторождений разнообразные наборы данных — от геологических карт, гиперспектральных аэрофотоснимков и мультиспектральных спутниковых снимков до баз данных различных форматов. Геоинформационная система является идеальной платформой для объединения такой разнородной информации и её последующего анализа.

В статье изложен опыт национальной горнодобывающей компании Азербайджанской республики ЗАО «AzerGold» по применению геоинформационных систем в геологоразведке месторождений руд цветных металлов на примере разработки Филизчайского и Агйохушского месторождений. Авторами рассмотрены производственные задачи, описаны проблемы, возникающие на этапе производства разведочных работ, и предложены методы их решения. Отмечается необходимость комплексного применения информационных систем в геологоразведочных работах при поисках месторождений руд цветных металлов. Разработана структура базы данных для целей обеспечения геологоразведки руд цветных металлов, включающая такие разделы, как топография, геохимия, геофизика, структурная геология. Предложена структура геоинформационного обеспечения работ при геологической разведке руд цветных металлов, которая объединяет функциональные возможности геоинформационных систем (ГИС) и горно-геологических информационных систем (ГГИС).

Иллюстрируются этапы геоинформационной обработки исходных данных, на основе которых была сформирована стратегия геологоразведочных работ на Филизчайском колчеданно-полиметаллическом месторождении, и затем оперативно и с высокой точностью определены оптимальные места и количество скважин, координаты, направления и углы падения скважин, а также уточнён ресурсный потенциал. Раскрывается роль интерполяционных методов в определении первичных геологоразведочных скважин при разведке золотоносного месторождения Агйохуш.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геоинформационные системы, горно-геологические информационные системы, цифровая карта, база данных, каркасная модель месторождения

---

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий, ул. Плахотного, д. 10, 630108, Новосибирск, Россия; *e-mail:* **alesgermammedov80@gmail.com**

[2] Горнодобывающая компания ЗАО «Azergold», ул. Микаила Мушвига, д. 2Н, 350040, Баку, Азербайджанская Республика; *e-mail:* **shax52@mail.ru**

[3] Сибирский государственный университет геосистем и технологий, ул. Плахотного, д. 10, 630108, Новосибирск, Россия; *e-mail:* **yaroslava@ssga.ru**

[4] Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский проспект, д. 4, 119991, Москва, Россия

Alesger A. Mammedov[1], **Shahbeddin D. Musaev**[2], **Yaroslava G. Poshivaylo**[3], **Grigory S. Fedotov**[4]

GI SUPPORT OF GEOLOGICAL EXPLORATION OF NON-FERROUS METAL ORE DEPOSITS

ABSTRACT

Geoinformation technologies are applied, without exaggeration, in all spheres of human activity, and the geological industry is no exception. Geoinformation systems in geology help to solve a number of practical problems. Geologists specializing in mineral exploration use a variety of data sets to search for new, cost-effective deposits, from geological maps, hyperspectral aerial photographs and multispectral satellite imagery to databases of various formats. The geographic information system is an ideal platform for combining such heterogeneous information and its subsequent analysis.

The article describes the experience of the national mining company of the Republic of Azerbaijan CJSC AzerGold in the use of geographic information systems in the exploration of non-ferrous metal deposits using the example of the development of the Filizchay and Aghyokhush deposits. The authors considered production problems, described the problems that arise at the stage of exploration and proposed methods for solving them, the need for the integrated use of information systems in exploration when searching for deposits of non-ferrous metals is noted. A database structure has been developed for the purpose of geological exploration of non-ferrous metal ores, including sections such as topography, geochemistry, geophysics, structural geology. The structure of geoinformation support for geological exploration of non-ferrous metal ores is proposed, which combines the functionality of geographic information systems (GIS) and mining geological information systems (MGIS).

The stages of geoinformation processing of initial data are illustrated, on the basis of which a geological exploration strategy was formed at the Filizchay pyrite-polymetallic deposit, and then the optimal places and number of wells, coordinates, directions and angles of incidence of wells were determined quickly and with high accuracy, as well as the resource potential was specified. The role of interpolation methods in determining the primary exploration wells in the exploration of the Agyokhush gold deposit is disclosed.

KEYWORDS: geoinformation systems, mining geological information systems, digital map, database, wireframe deposit model

ВВЕДЕНИЕ

Природные ресурсы, наряду с трудовыми и материальными, являются важнейшим фактором развития общественного производства. Природно-ресурсный потенциал мирового хозяйства и отдельной страны оказывает существенное влияние на экономику. Важной составляющей ресурсов государства является минеральное сырьё, которое по своему геологическому происхождению и назначению можно разделить на топливное, рудное, химическое, строительное и техническое.

[1] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Plakhotny str., 10, 630108, Novosibirsk, Russia; *e-mail:* **alesgermammedov80@gmail.com**

[2] “AzerGold” Closed Joint-Stock Company, Mikail Mushvig, 2H, 350040, Baku, The Republic of Azerbaijan; *e-mail:* **shax52@mail.ru**

[3] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Plakhotny str., 10, 630108, Novosibirsk, Russia; *e-mail:* **yaroslava@ssga.ru**

[4] National University of Science and Technology “MISIS”, Leninsky Ave, 4, 119991, Moscow, Russia

Азербайджан был и остаётся важнейшей минерально-сырьевой базой Южного Кавказа. На этой базе созданы и успешно развиваются горнорудная промышленность благородных и цветных металлов [*Musayev et al.*, 2016]. Путём анализа благоприятных геологических предпосылок, прямых и косвенных поисковых признаков, а также анализа закономерностей размещения выявленных месторождений для металлогенических зон Большого и Малого Кавказа прогнозируется выявление новых рудных объектов [*Баба-заде и др.*, 2007].

По степени изученности запасы минеральных ресурсов подразделяются на четыре категории: разведанные (промышленные) — A, B, C1 и предварительно оценённые — C2[1]. К категории A (достоверные запасы) относят детально разведанные и изученные запасы с точным определением границ тел полезных ископаемых. На запасах этой категории уже ведётся промышленная разработка, а допустимая погрешность в оценке запасов составляет до 10 % от их объёма. К категории B относят запасы, которые разведаны и изучены с детальностью, обеспечивающей выяснение основных особенностей условий залегания, но без точного отражения пространственного положения каждого типа руды. Запасы этой категории либо ещё не разрабатываются, либо находятся в начальной стадии разработки, а допустимая погрешность в оценке не превышает 15 %. Категория C1 включает в себя запасы, которые либо находятся в стадии разведки, либо по которым была осуществлена разведка и проведена их частичная оценка, а допустимая погрешность в оценке этих запасов не должна превышать 25 %. Запасы категории C2 (потенциальные) относятся к предварительно оценённым, когда границы месторождений не определены, проведение разведочных работ только планируется, а погрешность в оценках объёма запасов может достигать 50 %.

Рудное минеральное сырьё имеет за редким исключением магматическое или метаморфическое происхождение, поэтому приурочено к складчатым тектоническим структурам, к щитам и разломам земной коры. По данным Министерства экологии и природных ресурсов Азербайджанской Республики в ней разведано 12 726 000 т меди, 5 449 100 т цинка, 3 656 500 т свинца, 55 207,3 т кобальта, 164 738,1 т молибдена, 2 222,3 т ртути, 31 983,7 т алюминия.

На целом ряде технологических этапов поиска и добычи запасов минеральных ресурсов всех категорий изученности применяются геоинформационные системы, и особенно это актуально для категории C2 [*Дьяконов, Жорж,* 2008]. Изыскания, которые ведутся для поиска неразведанных ресурсов, требуют значительных материальных и трудовых затрат. Применение ГИС в геологоразведке позволяет проанализировать и оценить ресурсы месторождения и планировать дальнейшие работы, значительно сокращая затраты на изыскания [*Botwe, Osei Jnr,* 2018]. Геоинформационные технологии значительно упрощают множество сложных и рутинных работ в геологоразведке, таких как создание цифровых карт разного масштаба, проектирование геологической базы данных, применение различных методов интерполяции для построения карт геохимических аномалий, проектирование геологоразведочных скважин, создание различного вида профилей, каркасной и блочной модели месторождения и т.п. [*Palka, Brodny,* 2018].

Данные в ГИС имеют пространственную привязку, что позволяет наложить информационные слои, провести анализ и сделать соответствующие выводы. Оценка ресурсов производится с помощью цифровых карт и геоинформационных моделей, на которых базируется ГИС. Закономерно, что ГИС применяются практически всеми крупными горнодобывающими, геологоразведочными и консалтинговыми компаниями в горном деле.

Одно из первых применений ГИС при добыче руд цветных металлов было зафиксировано в середине 1990-х гг. на шахтах компании Brimstone Mining Inc, которая приобрела

[1] Электронный ресурс: https://mirec.mgimo.ru/2014-02/prirodnye-resursy-mirovoj-ekonomiki (дата обращения 18.11.2019)

шахту Mayflower в юго-западной части штата Монтана[1]. Шахта Mayflower была основным производителем золота в 1930-х гг., соответственно, вся информация была устаревшая (чертежи на холсте, старые бумажные карты и данные геодезической съёмки различной степени подробности и точности). Компания DTM Consulting of Bozeman перевела все исторические данные в цифровой формат для последующей визуализации в ГИС и для оценки ресурсов шахты. Всё это позволило сделать выводы о целесообразности проведения геологоразведочных работ.

Ещё одним примером является использование ГИС компанией Eaglecrest Exploration LTD, которая занималась разработкой золоторудного месторождения «Сан-Симон» на северо-востоке Боливии[2]. С помощью ГИС-технологий компания построила трёхмерные модели существующих буровых разрезов (модели разрезов, построенные по буровым скважинам); с помощью этих моделей была выявлена прежде не замечаемая закономерность: золото концентрировалось в вертикальных рудных телах. Немедленно были пересмотрены планы буровых работ с учётом новых данных по залеганию металла, и с тех пор, как минимум, каждая третья скважина на основных залежах позволяла добывать более 10 г золота на 1 т руды. Таким образом, 3D-моделирование показало свою эффективность при разработке месторождения. Кроме того, трёхмерные модели позволяют интегрировать данные топографии, данные полевых проб, геофизической съёмки, архивные данные, что делает модель более детальной и пригодной для анализа и планирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время в геологоразведке месторождений руд цветных металлов наблюдается тенденция интеграции информационных систем с целью объединения их функциональных возможностей. Причиной тому служат разнородные исходные данные и широкий круг решаемых задач. Как правило, используется тандем программного обеспечения, а именно ГГИС + ГИС:

- ГГИС (Горно-геологическая информационная система, например, MICROMINE [*Басаргин*, 2014; 2016], MINEFRAME [*Наговицын*, 2018]);
- ГИС (QGIS, ArcGis, MapInfo). Каждая система имеет свою структуру базы для хранения данных, и каждая система имеет функциональные особенности, определяющие её предназначение.

Целью настоящего исследования является изучение возможностей комплексного объединения методов ГИС и ГГИС для получения новых знаний и закономерностей.

Для целей геологоразведки необходимо создание двух баз данных: одна база данных для хранения картографической информации, другая — для хранения геологической информации (рис. 1). Каждая база данных должна описывать пространственные объекты, участвующие в процессе моделирования месторождения руд цветных металлов, но в случае картографической базы данных это пространственные объекты месторождения, а в случае геологической базы данных — пространственные объекты подземных и открытых горных выработок.

В табл. 1 и 2 представлена структура баз данных (геологической и картографической соответственно), разработанная для разведки руд цветных металлов.

---

[1] Электронный ресурс: https://www.esri.com/news/arcnews/winter0203articles/mining-gold.html (дата обращения 18.11.2019)

[2] Электронный ресурс: https://www.geosoft.com/media/uploads/resources/brochures/fp_ebook_feb2-11_web.pdf (дата обращения 10.11.2019)

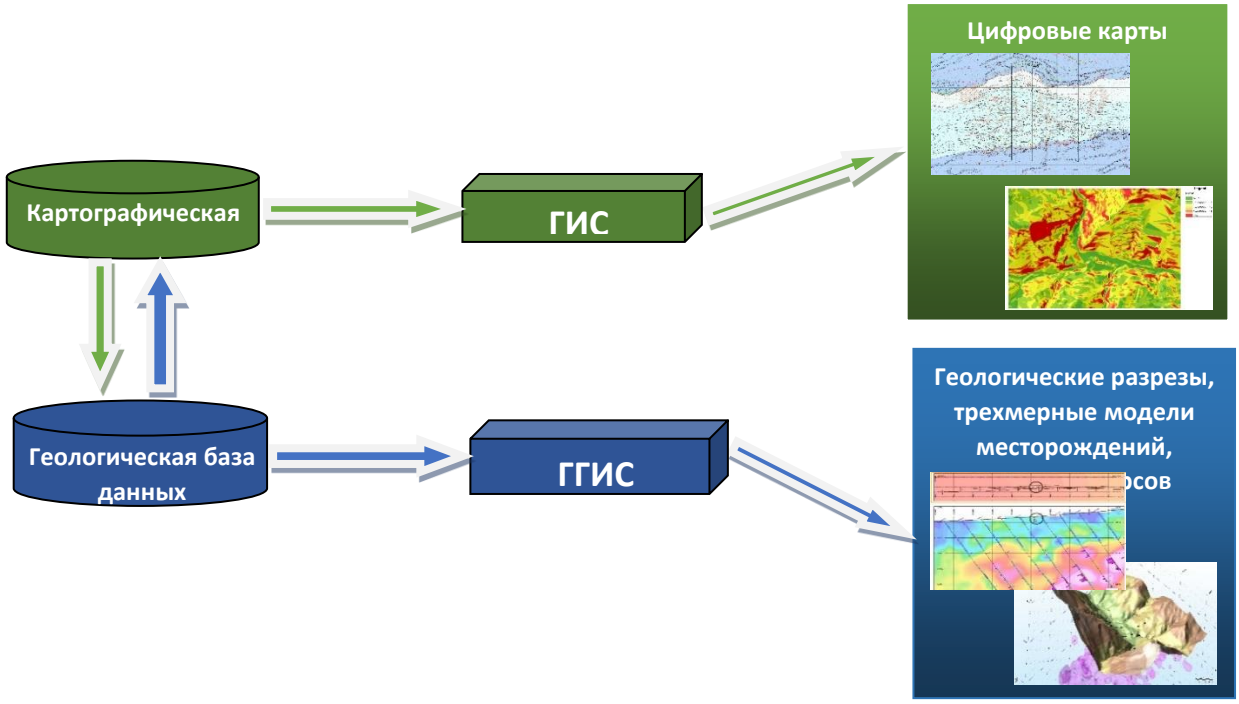


Рис. 1. Обобщённая схема процесса создания карт, геологических разрезов, трёхмерных моделей месторождений для оценки ресурсов руд цветных металлов
Fig. 1. Generalized flowchart for creating maps, geological sections, three-dimensional models of deposits for assessing the resources of non-ferrous metals

Табл. 1. Состав геологической базы данных разведки месторождений руд цветных металлов
Table 1. The composition of the geological database for exploration of non-ferrous metals ore deposits

Раздел	Источник данных	Набор объектов	Формат данных	Атрибутивная информация
Подземные горные выработки	Геологоразведочные скважины	Устья скважин	DAT файл Файловая система ГГИС Micromine для хранения атрибутивной информации в виде таблицы	Идентификационный номер скважины, координаты, глубина, дата начала бурения, дата завершения бурения
		Инклинометрия скважин		Идентификационный номер скважины, глубина, азимут, зенитный угол
		Результаты опробования скважин		Идентификационный номер скважины, идентификационный номер пробы, интервал опробования, химические элементы

		Литология скважин		Идентификационный номер скважины, идентификационный номер пробы, интервал опробования, тип породы, данные о выходе керна
	Шахты, штольни, штреки, орты	Устья подземной горной выработки	STRING Файловая система ГГИС Micromine система для хранения векторной информации	Номер подземной горной выработки, координаты, глубина, длина
		Средняя линия подземной горной выработки		Номер средней линии подземной горной выработки, глубина, длина
		Линия опробования подземной горной выработки		Номер линии опробования подземной горной выработки, длина, координаты начальной точки линии опробования, координаты конечной точки линии, зенитный угол, азимут, номер пробы, химические элементы
		Контуры горных пород		Типы горных пород, площади горных пород
Открытые горные выработки	Шурфы, канавы и т.п.	Линия опробования открытой горной выработки	STRING Файловая система ГГИС Micromine система для хранения векторной информации	Номер открытой горной выработки, координаты начальной точки и последней точки, средняя глубина. Номер линии опробования открытой горной выработки, длина, координаты начальной точки линии опробования, координаты конечной точки линии опробования, зенитный угол, азимут, номер пробы, химические элементы

Табл. 2. Состав картографической базы данных разведки месторождений руд цветных металлов
Table 2. The composition of the cartographic database of the exploration of non-ferrous metal ore deposits

Раздел	**Источник данных**	**Набор объектов**	**Формат данных**	**Атрибутивная информация**
Топография	Топографическая съёмка, лазерная съемка	Рельеф, гидрология, растительность, здания, дороги, коммуникации	SHP	Название реки, тип растительности, площадь растительности, тип здания этажность, типы дорог, длина дорог, типы коммуникаций
Геохимия	Пробы, взятые с поверхности Земли	Пробы		Номера проб, координаты проб, химические элементы
Геофизика	Данные, полученные по результатам геофизических измерений	Геофизические пикеты, контуры, характеризующие геофизические аномалии		Номера, координаты пикетов, типы геофизических аномалий, показатели интенсивности аномалии
Структурная геология	Геологические архивные данные, данные актуальной геологической разведки (карты и планы)	Литология складчатых пород, разрывные структуры		Коды и описание пород, коды и описания разрывных структур, и типы минералов

Для создания цифровых карт и картографической базы данных целесообразно использовать функционал ГИС, а для решения геологических задач при геологоразведочных работах (от проектирования скважин до подсчёта ресурсов месторождения) — ГГИС. На рис. 2 представлена общая структура геоинформационного обеспечения геологической разведки руд цветных металлов с учётом применяемого программного обеспечения.

В результате комплексного использования компьютерных технологий создаются уникальные информационные продукты — горно-геологические информационные системы. Совокупность аппаратных, программных средств и хранимых моделей месторождения, карьера, отвалов, топографии и ситуации называют геоинформационным обеспечением горного производства или горно-геологической информационной системой (ГГИС) [*Аленичев, Суханов,* 2016].

В любой ГГИС в базе данных должны храниться информация о координатах скважин, их глубинах, инклинометрия скважины, которая определяет положение скважины в пространстве, данные опробования, данные литологии, характеризирующие типы пород на определённых глубинах. При хранении данных в неспециализированных системах могут встречаться ошибки, такие как отсутствующие скважины, ошибки в данных инклионометрии, вызывающие несоответствие в глубинах скважин, ошибки в данных опробования, указывающие на отсутствующие интервалы в данных опробования. Все эти ошибки могут оказать своё фатальное влияние при оценке ресурсов. ГГИС автоматически проверяет данные на ошибки.

При привязке растровых данных (геологических карт, планов шахт) в ГГИС можно учитывать не только координаты X, Y, но и координату Z.

С помощью этой опции возможна привязка геологических разрезов с помощью координат скважин и отображение их в трёхмерном пространстве. Работа с сетью неправильных треугольников в ГГИС намного отличается от функционала, имеющегося в ГИС. В ГГИС сеть неправильных треугольников играет особую роль — с их помощью строится не только цифровая модель рельефа, но и модель рудного тела. Модель рудного тела также называют ещё каркасной моделью. С помощью каркасной модели вычисляется объём рудного тела, выполняется редактирование каркасов — разделение, объединение, вычитание и т.п. Каркасная модель строится также для визуализации старых шахт.

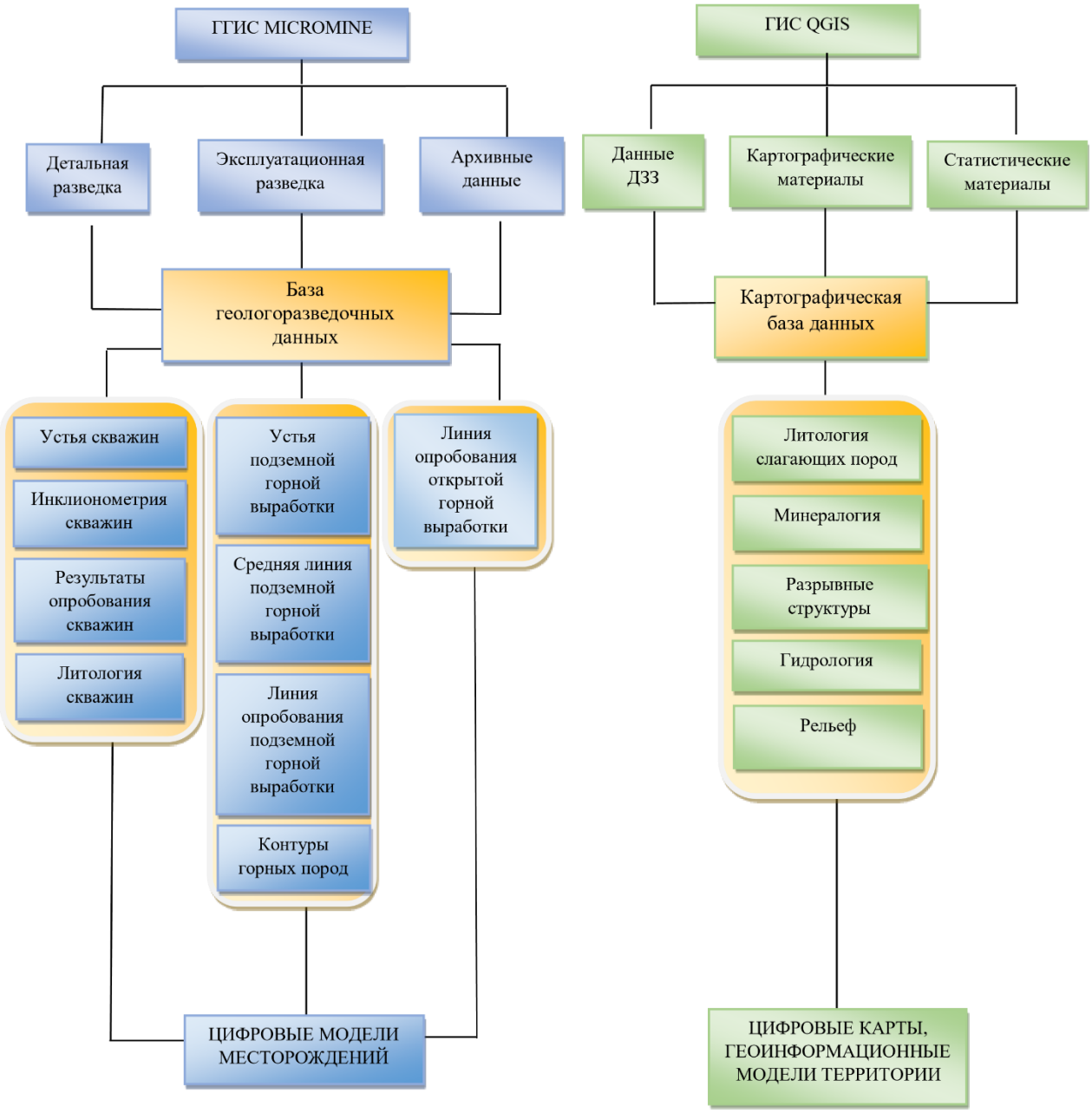


Рис. 2. Структура геоинформационного обеспечения геологической разведки месторождений руд цветных металлов
Fig. 2. The structure of GI support of the geological exploration of non-ferrous metal ore deposits

Разработка геологических карт — это сложный и трудоёмкий процесс, поскольку геологические карты имеют свою специфику, свои уникальные символы, крапы и т.п. С использованием классификаторов процесс создания символики можно полностью автоматизировать, символы кодируются, и данная кодировка применяется ко всем создаваемым геологическим картам. Возможно перемасштабировать карты, преобразовывать координаты из одной системы в другую, выполнять пространственный анализ, моделировать поверхности, используя различные интерполяционные методы. Однако комплексное применение ГИС и ГГИС сопровождается определёнными трудностями и требует разработки соответствующего научно-методического обеспечения.

На рис. 3 показана цифровая геологическая карта Филизчайского месторождения, которое находится на северо-западе Азербайджанской Республики. Данное месторождение занимает второе место в Европе по запасам колчеданной полиметаллической руды. Карта была составлена по архивным материалам и с помощью ГИС была преобразована в систему координат WGS84 UTM 38N, что позволило наложить на неё новую информацию и провести более детальный анализ для геологической разведки.

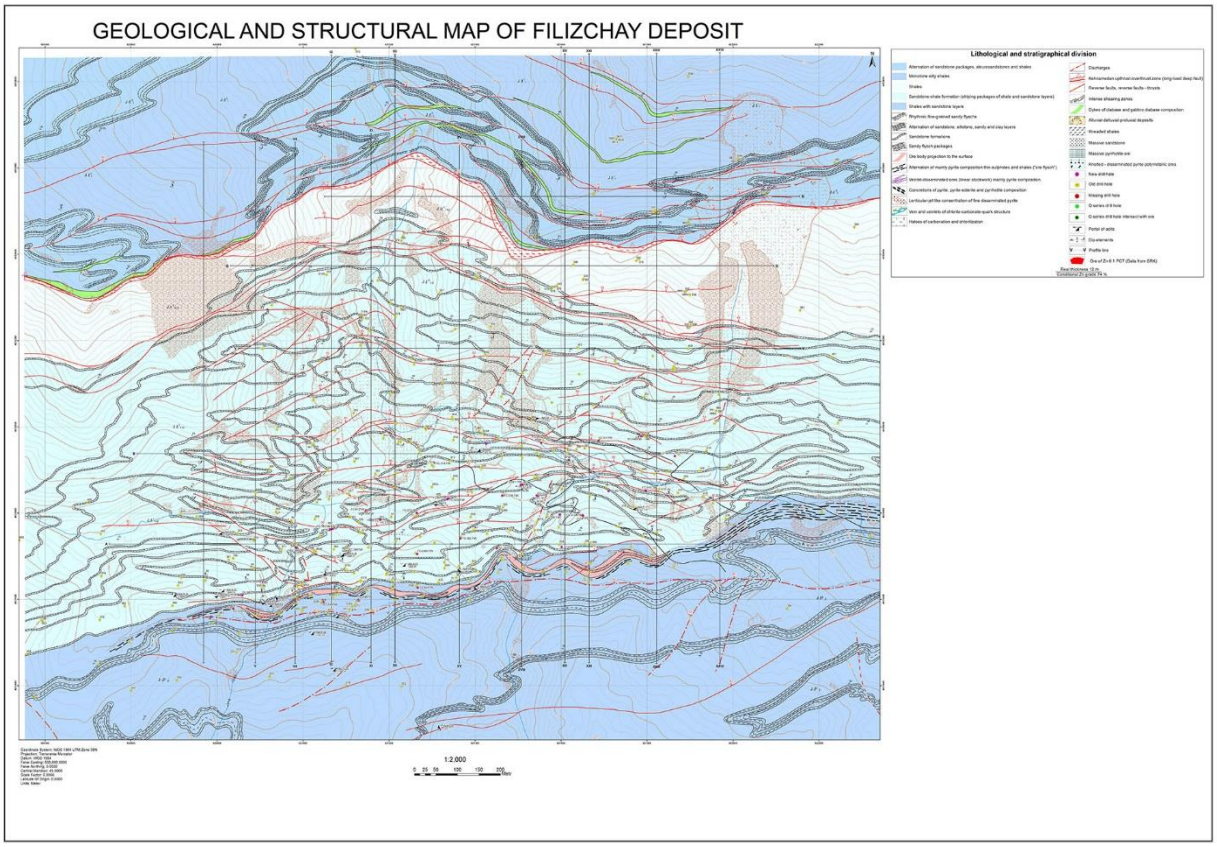


Рис. 3. Цифровая геологическая карта Филизчайского месторождения (северо-запад Азербайджанской Республики)
Fig. 3. Digital geological map of the Filizchay deposit (north-west of the Azerbaijan Republic)

Как было сказано выше, пространственный анализ является ключевым элементом любой ГИС. Важной составляющей алгоритмов пространственного анализа в геологии являются интерполяционные методы [*Капутин*, 2002], которые широко применяются при создании геохимических карт аномалий. Геоинформационные системы поддерживают несколько методов интерполяции: обратно взвешенных расстояний (ОВР), сплайна,

естественной окрестности, кригинга и т.д. Каждый интерполяционный метод имеет свои области применения — например, интерполяционный метод сплайна хорошо подходит для создания топографической поверхности, а метод ОВР хорошо выполняет интерполяцию явлений, которые зависят от расстояния — его лучше применять для равномерно распределённых данных. Метод естественной окрестности хорошо себя зарекомендовал в точках, которые имеют равномерное и неравномерное распределения. Перечисленные методы интерполяции являются детерминистическими — это означает, что эти методы не учитывают корреляцию при интерполяции значений между известными точками. Интерполяционный метод кригинга — это геостатистический метод интерполяции, который учитывает корреляцию между известными точками при интерполировании точек.

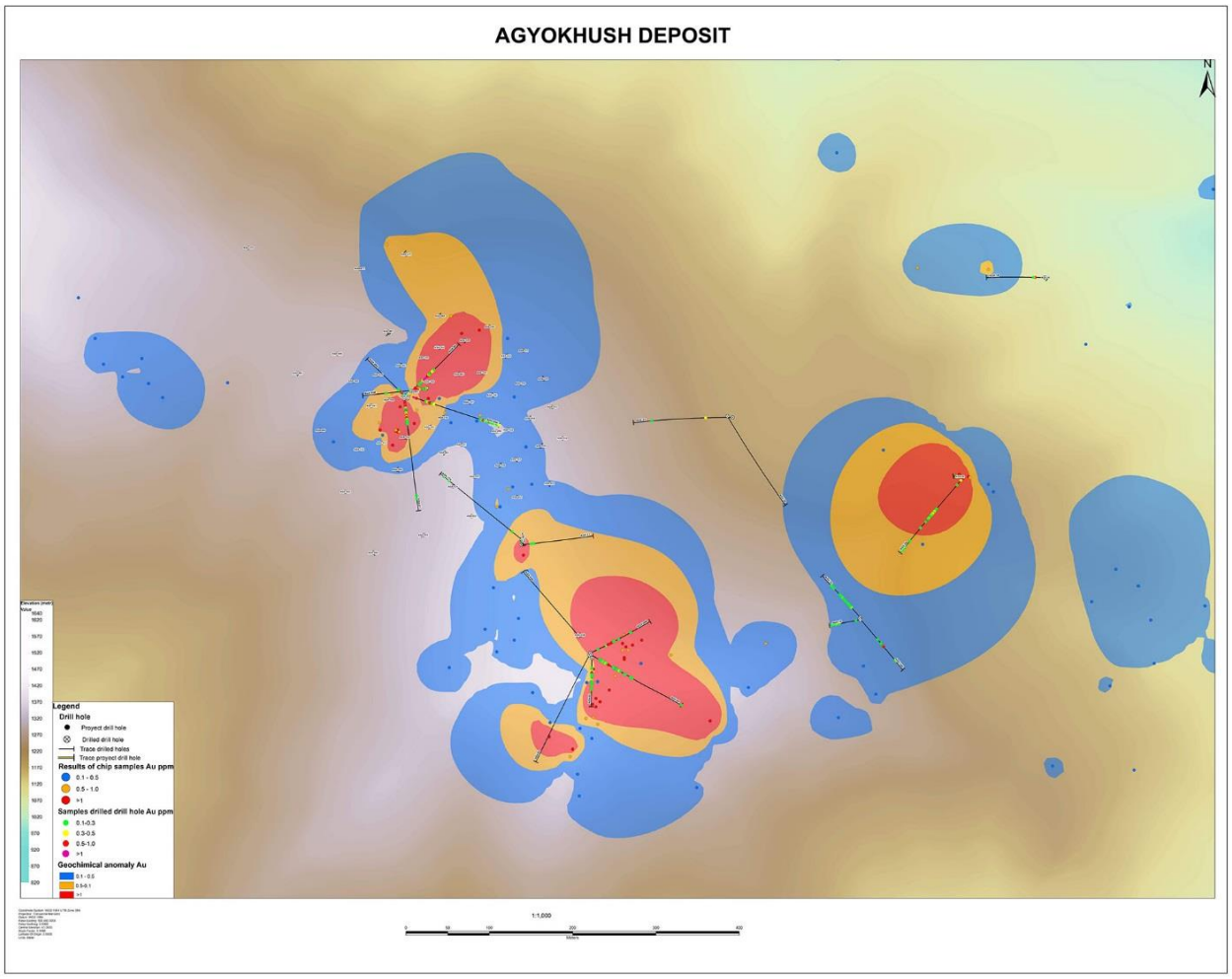


Рис. 4. Карта геохимических аномалий Агйохушского месторождения
Fig. 4. Map of the geochemical anomalies of the Agyokhush deposit

Для решения пространственных задач в ЗАО «AzerGold» преимущественно применяется метод естественной окрестности — например, при построении карт геохимических аномалий. Интерполяция по методу естественной окрестности находит самое близкое подмножество входных образцов к запрошенной точке и применяет к ним веса, основанные на пропорциональных областях, чтобы интерполировать значение. Она также известна как интерполяция Сибсона или «захватывающей области». Расчётные высоты, полученные в результате этого метода интерполяции, гарантированно будут находиться в пределах диапазона высот используемых образцов, что позволяет успешно применять данный метод для

задач геологоразведки. Интерполяционный метод не выводит тренды и не будет создавать пики, ямы, рёбра или точки минимума, которые уже не представлены входящими образцами[1].

Далее рассмотрим несколько практических примеров совместного использования ГИС и ГГИС.

Построенная карта геохимических аномалий является основой для проведения дальнейших геологоразведочных работ, таких как бурение геологоразведочных скважин. Это бурение является очень дорогостоящим видом работ, поэтому получение ложных высоких значений аномалий может негативно отразиться на стоимости проекта.

На рис. 4 представлена карта геохимических аномалий. По полученной в результате пространственного анализа карте геохимических аномалий было пробурено 64 равномерно распределённые скважины. Целью равномерного распределения скважин было построение каркасной модели и проведение на её основе оценки ресурсов данной территории.

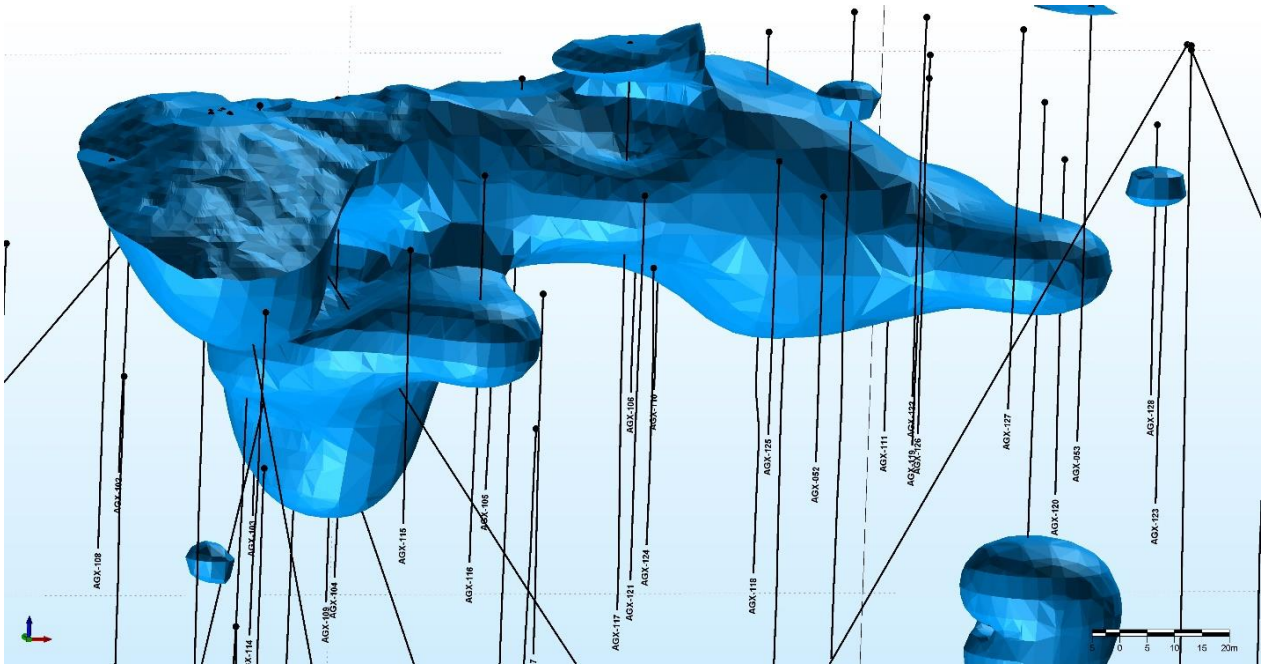


Рис. 5. Каркасная модель рудного тела Агйохушского месторождения, созданная с помощью условного моделирования
Fig. 5. The wireframe model of the ore body of the Agyokhush deposit created using conditional modeling

На следующем технологическом этапе по результатам буровых работ в ГГИС MICROMINE были построены каркасные модели рудных тел двумя методами: эксплицитного (традиционный) и имплицитного (условного) моделирования. MICROMINE использует локальные и глобальные радиально-базисные функции (РБФ) для создания условных моделей разломов, литологии, содержаний, подземных выработок. Построение каркасных моделей с помощью радиально-базисных функций (РБФ) отличается от традиционного метода построения каркасов. Эксплицитный метод основывается на интерпретации данных скважин,

[1] Электронный ресурс: https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/help/analysis/geostatistical-analyst/deterministic-methods-for-spatial-interpolation (дата обращения 12.11.2019)

канав, точечных данных по разрезам, совпадающих с разведочными профилями. В отличие от эксплицитного моделирования, в условном моделировании при помощи интерполяции точечных данных создаётся каркасная модель рудного тела. Преимущество условного моделирования состоит в меньших временных затратах.

Условное моделирование может использоваться при густой или редкой сети скважин. Оно также хорошо работает с данными нерегулярной сети бурения или там, где в пределах рудного тела было проведено бурение и опробование с использованием различных методов (канавы, подземное опробование).

На рис. 5 показана модель, созданная с помощью условного моделирования.

Несмотря на то что построение каркасных моделей с помощью условного моделирования происходит намного проще и быстрее (для построения каркасной модели рудного тела Агйохушского месторождения методом условного моделирования потребовалось несколько минут, моделирование классическим методом заняло около 2 часов), у условного моделирования есть один существенный недостаток — отсутствие ручного контроля за процессом построения. Другими словами, геолог не может, руководствуясь своим видением геологической ситуации, получить модель рудного тела. Модель строится путём интерполяции и может не учитывать ряд важных факторов. В построенную модель можно затем внести ряд корректировок, но это нивелирует эффект, полученный от автоматического построения.

Каркасная модель рудного тела, которая была построена с помощью эксплицитного метода, показана на рис. 6. Сопоставление двух моделей показало, что оценка ресурсов с помощью эксплицитного метода даёт более точные результаты. Результат подсчёта ресурсов с помощью условного моделирования был завышен на 17,5 % по сравнению с моделью, построенной классическим методом. В итоге для дальнейших разработок были приняты результаты каркасной модели, построенной с помощью классического метода.

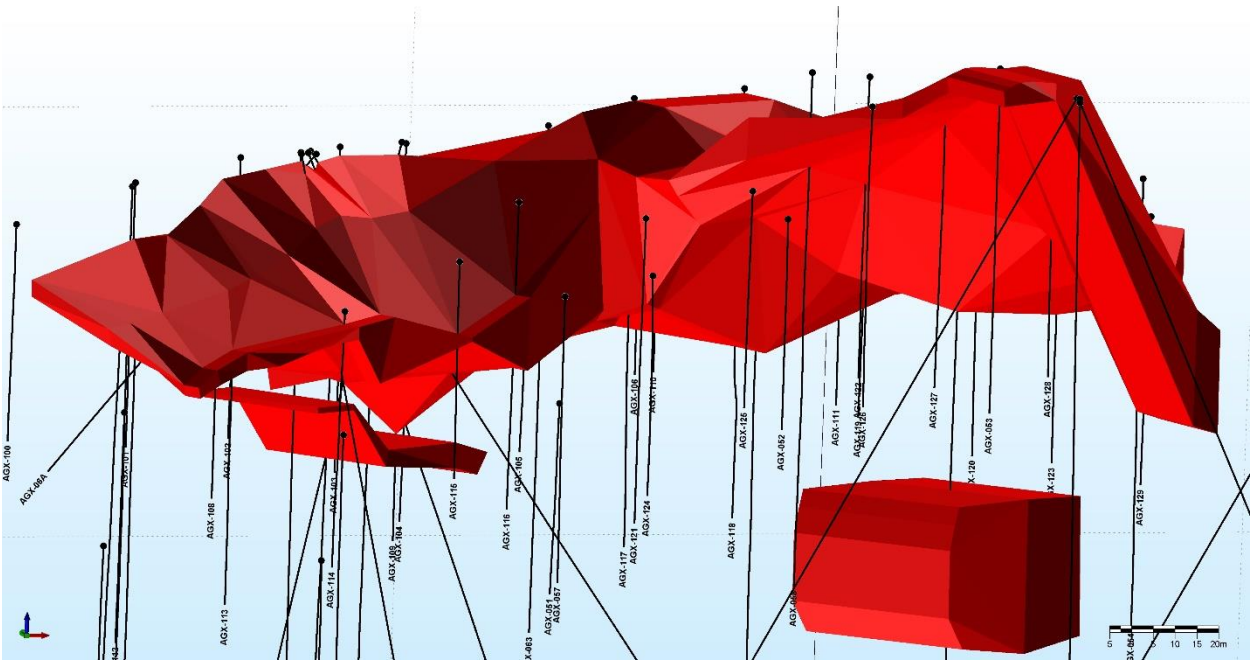


Рис. 6. Каркасная модель рудного тела Агйохушского месторождения, созданная с помощью эксплицитного моделирования
Fig. 6. The wireframe model of the ore body of the Agyokhush deposit created using explicit modeling

Рассмотрим другую производственную работу, связанную оцифровкой архивных планов шахт Филизчайского месторождения. Необходимо было произвести расчёт ресурсов Филизчайского месторождения по архивным данным. Поставленная задача была непростой, поскольку архивные планы штолен были выполнены в локальной системе координат. Кроме того, предстояло подготовить данные для вычисления ресурсов, значит, нужно было выполнить нужные вычисления для представления планов шахт в ГГИС. На первом этапе данные были оцифрованы в локальной системе координат, далее по опорным точкам оцифрованные данные были переведены в координатную систему WGS84 UTM38N. Для импорта данных в ГГИС нужно оцифрованные пробы представить как скважины, а для этого нужно будет обязательно вычислить начальные координаты (X, Y, Z) оцифрованных проб. Здесь, конечно, возникает проблема с нахождение координаты Z, зенитного угла и азимута оцифрованных проб. Данную проблему можно решить с помощью маркшейдерских замеров, которые были сделаны в шахте. По маркшейдерскому замеру строится сеть неправильных треугольников, далее оцифрованные пробы на основе построенной сети неправильных треугольников конвертируются в трёхмерные полилинии (3D polyline), на основе которых можно вычислить координату Z, зенитный угол. Для вычисления азимута пробы не принципиально, чтобы оцифрованная проба была трёхмерной полилинией. На рис. 7 представлена цифровая модель шахты.

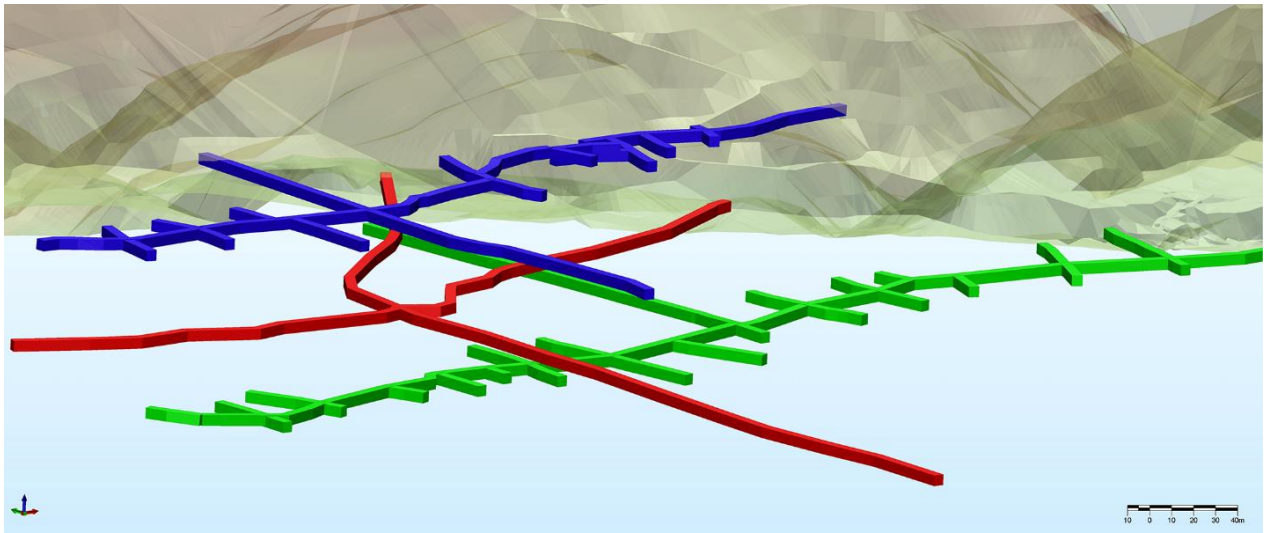


Рис. 7. Трёхмерная цифровая модель подземных горных выработок Филизчайского месторождения
Fig. 7. The three-dimensional digital model of underground mining of Filizchay deposit

Для проектирования в кратчайшие строки новых скважин на Филизчайском месторождении с целью увеличения добычи цинка, меди, свинца и серебра было необходимо построить цифровую модель рельефа. Филизчайское месторождение находится на труднодоступной территории в высокогорной и скалистой местности. Задача была решена с использованием архивных геологических и топографических данных (была построена карта уклонов в ГИС QGİS). Критериями для выбора местоположения новых геологоразведочных скважин являются близость к дорожной сети, минимальные уклоны и пересечение с рудой. На первом этапе на основе цифровой модели рельефа строится карта уклонов (рис. 8). Далее на основе карты уклонов выбираются потенциальные места для скважин. На построенную цифровую модель рельефа был добавлен слой дорожной сети, что позволило из множества потенциальных скважин отобрать те, что расположены ближе к дорогам. Далее с помощью

ГГИС MICROMINE были определены координаты скважин, глубина, зенитный угол и азимут. Пересечение скважин с рудой было определено также с помощью ГГИС MICROMINE.

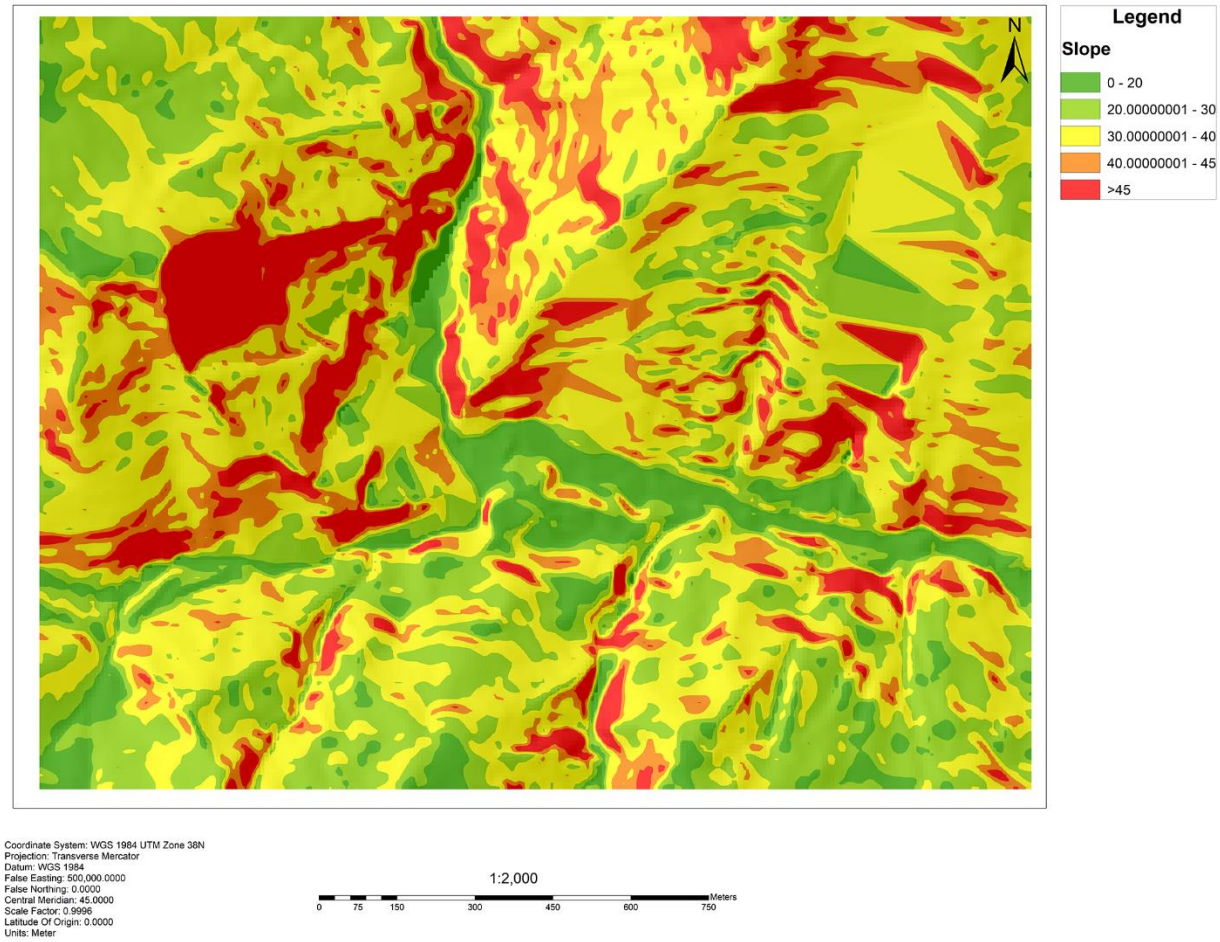


Рис. 8. Карта уклонов территории Филизчайского месторождения
Fig. 8. The terrain slope map of the Filizchay deposit

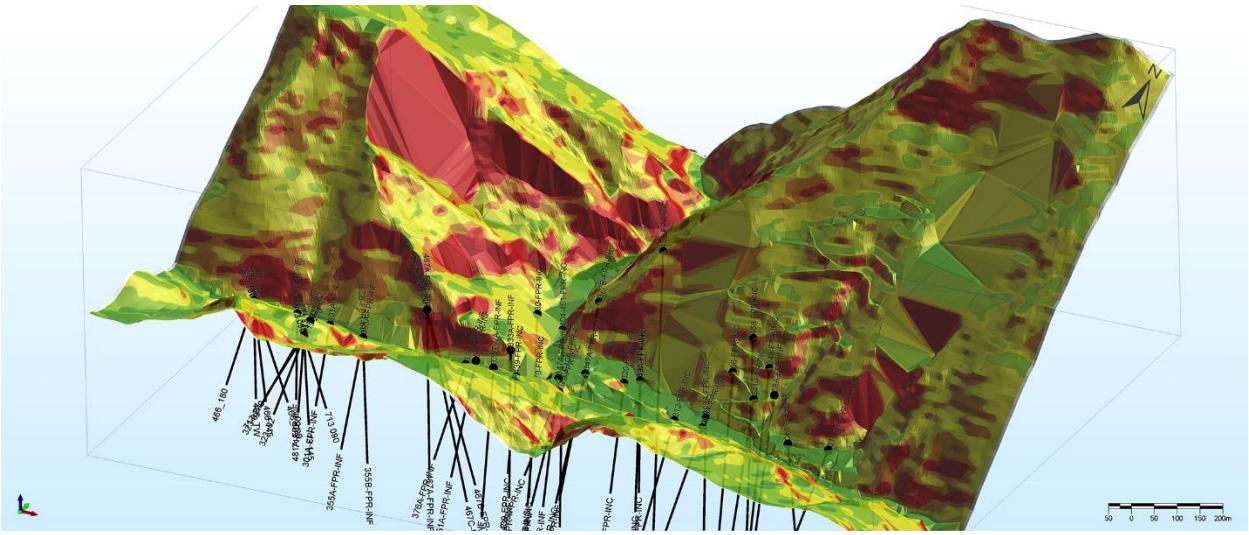


Рис. 9. Трёхмерная цифровая модель Филизчайского месторождения
Fig. 9. The three-dimensional digital model of the Filizchay deposit

На рис. 9 показана трёхмерная цифровая модель Филизчайского месторождения, где чёрными точками показаны проектируемые скважины.

Важно отметить, что геологоразведочные скважины являются важнейшими элементами в геологоразведочных работах. Можно сказать, что от них зависит судьба будущего месторождения. Проектируемые скважины также продлевают жизнь эксплуатируемого месторождения. С помощью ГГИС автоматизированным способом создаются профили геологоразведочных скважин.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате комплексного применения геоинформационных систем и горно-геологических информационных систем в геологоразведке руд цветных металлов на предприятиях ЗАО «AzerGold» были автоматизированы многие технологические процессы в геологоразведке рудных залежей, что значительно сократило затраты времени и повысило точность геологоразведочных работ. Была разработана структура картографической и геологической баз данных. С помощью пространственного ГИС-анализа была определена стратегия геологоразведочных работ на Филизчайском месторождении, оперативно и с высокой точностью определены оптимальные места и количество скважин, координаты, направления и углы падения скважин.

Предложенная методика оцифровки архивных планов шахт дала возможность уточнить ресурсы Филизчайского месторождения. С помощью ГИС QGIS создание геологических карт было намного упрощено: применение классификатора позволило в автоматизированном режиме оформлять сложные условные обозначения; послойная структура проекта дала возможность создания мультимасштабных геологических карт; структура атрибутивных данных позволяет хранить полную информацию о пространственных объектах и выполнять сложные запросы и аналитические операции.

Был выбран оптимальный метод для интерполирования поверхности по пробам, взятым на поверхности Земли, для построения карт геохимических аномалий, где на основе интерполированной поверхности были определены первичные геологоразведочные скважины. Получив положительный результат по первичным геологоразведочным скважинам, было принято решение дополнительно пробурить ещё 64 геологоразведочные скважины. По дополнительным пробуренным скважинам с помощью ГГИС MICROMINE была выполнена оценка ресурсов, которая показала положительный результат. Таким образом было открыто новое золотоносное месторождение Агйохуш.

ВЫВОДЫ

Применение геоинформационных технологий в геологоразведочных работах можно считать свершившимся фактом. Здесь хотелось бы привести слова, сказанные Юлианом Мисьевичем — геологом-консультантом по Африке и в Европе компании Gold Fields International, которая является крупнейшим поставщиком золота ЮАР: «В геологоразведке требуется программное обеспечение базы данных, пакет ГИС, и, разумеется, решение для обработки скважинных данных. Все три совершенно незаменимы».

Геологоразведочные компании всё больше концентрируются на сборе данных и их анализе для выбора стратегии дальнейших геологоразведочных работ.

Архивные данные о геологоразведочных работах после их перевода в цифровой формат обретают новые информационные качества. По этим данным не только оцениваются ресурсы старых месторождений, но и выбирается стратегия дальнейших геологоразведочных работ по данному месторождению, которые определяют целесообразность дальнейших работ.

Интеграция ГИС с ГГИС даёт новый толчок для геологоразведочных работ, т.к. с помощью геологических ГИС решается множество задач, которые не входят в инструментарий ГИС. Расположение трубопроводов, линий электропередачи, дорог, пандусов и др.

сооружений горнодобывающих предприятий часто меняется. Инженерный и оперативный персонал использует ГИС в приложениях планирования инфраструктуры. Отслеживание изменений существующей инфраструктуры и внесение их в план и блок-модели рудника можно производить с помощью ГИС. ГИС можно также использовать для интеграции последних данных геодезической съёмки с блок-моделями или проектными данными рудника из других ГГИС пакетов программного обеспечения для горного дела, таких как GeoSoft, Vulcan, MineSight, SURPAC Range или Mining Visualization System (MVS). В горном деле бóльшая часть информации, в т.ч. финансовые показатели и информация об активах, имеет определённый пространственный компонент, который может быть представлен в виде карты. Управляющие и экономисты предприятий отрасли используют ГИС для оценки активов собственной организации и конкурентов. С помощью ГИС горнодобывающие компании ведут также активный мониторинг воздействия их деятельности на окружающую среду и работу с претензиями. В ГИС можно одновременно отображать, запрашивать и анализировать разнообразные наборы геологических данных, таких как геофизические изображения, геохимические данные, геологические карты, данные радиометрических измерений и информация о скважинах и месторождениях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Хотим выразить свою благодарность руководству компании ЗАО «AzerGold» за предоставленные данные и условия для проведения вышеописанных работ.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to express our gratitude to the management of AzerGold CJSC for the provided data and conditions for conducting research.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аленичев В.М., Суханов В.И.* Перспективы внедрения горно-геологических информационных систем на отечественных горных предприятиях. Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: Горная книга, 2016. № 8. С. 5–15.

2. *Баба-заде В., Рамазанов В., Мусаев Ш., Джафарли М.* Минерально-сырьевые ресурсы Азербайджана и перспективы их использования. Горный журнал. М.: ИД «Руда и металлы», 2007. № 10. С. 14–19.

3. *Басаргин А.А.* Моделирование месторождений рудных полезных ископаемых с использованием геоинформационной системы MICROMINE. Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2016: XII Междунар. науч. конгр., 18–22 апр. 2016 г.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 2 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2016. Т. 2. С. 151–155.

4. *Басаргин А.А.* Создание цифровых моделей месторождений полезных ископаемых с применением современных технологий. Вестник СГГА, 2014. Вып. 1 (25). С. 34–39.

5. *Дьяконов В.В., Жорж Н.В.* Геоинформационные технологии разведки и поиска месторождений полезных ископаемых неосвоенных территорий: Учеб. пособие. М.: Издательско-полиграфический комбинат РУДН, 2008. 163 с.

6. *Капутин Ю.Е.* Горные компьютерные технологии и геостатистика. СПб.: Недра, 2002. 494 с.

7. *Наговицын О.В.* Концепция и методы формирования горно-геологической информационной системы (ГГИС MINEFRAME). Дисс. докт. техн. н. Екатеринбург: Институт горного дела УрО РАН, 2018. 339 с.

8. *Botwe T., Osei Jnr E.M.* Gold potential mapping using remote sensing and GIS at the Prestea Concession of Golden Star Bogoso/Prestea Ltd, Ghana. International Journal of Engineering Science and Computing, 2018. V. 8. Iss. 1. P. 15891–15897.

9. *Musayev Sh., Abdullayeva Sh., Babazade V., Akhmedov A.* The material compozition and tecnologocal characteristics of ores in Chovdar gold-ore deposit (lesser Caucasus). İJSET-İnternational of İnnovative Science, Engenering & Tecnology, 2016. V. 3. Iss. 7. P. 132–160.
10. *Palka D., Brodny J.* The concept of using the GIS system in underground mining. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, July 2018. V. 18. P. 607–614.

REFERENCES

1. *Alenichev V.M., Sukhanov V.I.* Prospects for the implementation of mining and geological information systems in domestic mining enterprises. Mining information and analytical bulletin. Moscow: Mining Book, 2016. No 8. P. 5–15 (in Russian).
2. *Baba-zade V., Ramazanov V., Musaev S., Jafarli M.* Mineral resources of Azerbaijan and the prospects for their use. Gornyi Zhurnal (Mining Journal). Moscow: “Ore and Metals” Publishing House, 2007. No 10. P. 14–19 (in Russian).
3. *Basargin A.A.* Creation of digital models of mineral deposits using modern technologies. Bulletin of the SSAG, 2014. Iss. 1 (25). P. 34–39 (in Russian).
4. *Basargin A.A.* Modeling of ore mineral deposits using the geographic information system MICROMINE. Interexpo GEO-Siberia 2016: XII International scientific Congr., April 18–22, 2016: International scientific conf. “Geodesy, geoinformatics, cartography, mine surveying”: Proceeding in 2 v. Novosibirsk: SSUGT, 2016. V. 2. P. 151–155 (in Russian).
5. *Botwe T., Osei Jnr E.M.* Gold potential mapping using remote sensing and GIS at the Prestea Concession of Golden Star Bogoso/Prestea Ltd, Ghana. International Journal of Engineering Science and Computing, 2018. V. 8. Iss. 1. P. 15891–15897.
6. *Dyakonov V.V., Georges N.V.* Geoinformation technologies of exploration and search for mineral deposits of undeveloped territories: Textbook. Moscow: Publishing and Printing Combine of RUDN University, 2008. 163 p. (in Russian).
7. *Kaputin Yu.E.* Mountain computer technologies and geostatistics. St. Petersburg: Nedra, 2002. 494 p. (in Russian).
8. *Musayev Sh., Abdullayeva Sh., Babazade V., Akhmedov A.* The material compozition and *tecnologocal* characteristics of ores in Chovdar gold-ore deposit (lesser Caucasus). İJSET-İnternational of İnnovative Science, Engenering & Tecnology, 2016. V. 3. Iss. 7. P. 132–160.
9. *Nagovitsyn* O.V. The concept and methods of forming a mining and geological information system (MGIS MINEFRAME): D diss. tech. sc. Ekaterinburg: The Institute of Mining of Ural Branch of RAS, 2018. 339 p. (in Russian).
10. *Palka D., Brodny J.* The concept of using the GIS system in underground mining. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, July 2018. V. 18. P. 607–614.

УДК: 502.51 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-137-150**

А.Г. Осипов[1], Г.К. Осипов[1], В.Ф. Ковязин[2]

МЕТОДИКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫНОСА БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В ФИНСКИЙ ЗАЛИВ ИЗ ЛЕСНОГО РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

АННОТАЦИЯ

Биогенное загрязнение водоёмов и их эвтрофирование является одной из серьёзнейших экологических проблем современности. Одним из источников загрязнения вод биогенными веществами являются лесные массивы, которые относятся к фоновым источникам биогенной нагрузки. Имеющиеся в настоящее время методики оценки выноса биогенных веществ из лесного растительного покрова не дают желаемых результатов, что вызывает острую потребность в их совершенствовании.

В данной статье изложена разработанная авторами методика геоинформационного моделирования выноса биогенных веществ из лесного растительного покрова в водные объекты с учётом пространственного распределения растительности на водосборе, её видового состава и поглощения биогенных веществ при их миграции.

В качестве объекта апробации разработанной методики была принята восточная часть Финского залива; это связано с тем, что в пределах его акватории активно проявляются процессы эвтрофирования вод.

Объём фоновой биогенной нагрузки на Финский залив, формируемой при разложении опада естественного растительного покрова на водосборе, определялся на основе удельного выноса биогенных веществ из растительных сообществ и их поглощения при миграции «растительное сообщество — водный объект».

Суммарная фоновая биогенная нагрузка на восточную часть Финского залива, сформированная в результате разложения опада естественного растительного покрова, составила для северного водосбора по азоту 170,21 т/год, по фосфору 12,14 т/год, а для южного водосбора — по азоту 207,31 т/год, а по фосфору 15,68 т/год.

Полученные данные не противоречат результатам других авторов, исследующих фоновую биогенную нагрузку на Финский залив.

Методика может быть эффективно использована при разработке мероприятий по снижению биогенной нагрузки на водные объекты и планировании хозяйственной деятельности на водосборах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Финский залив, фоновая биогенная нагрузка, ГИС «Карта 2011», геоинформационное моделирование

[1] Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, ул. Ждановская, д. 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия; *e-mail*: **Osipov-G-K-2005@yandex.ru**

[2] Санкт-Петербургский горный университет, Васильевский о-в, 21 линия, д. 2, 199106, Санкт-Петербург, Россия; *e-mail*: **vfkedr@mail.ru**

Alexey G. Osipov[1], Georgy K. Osipov[1], Vasily F. Kovyazin[2]

METHODS OF GI MODELING OF BIOGENIC SUBSTANCES REMOVAL TO THE GULF OF FINLAND FROM FOREST VEGETATION COVER

ABSTRACT

Biogenic pollution of water bodies and their eutrophication is one of the most serious environmental problems of our time. One of the sources of water pollution with biogenic substances is forests, which belong to the background sources of biogenic load. Currently available methods for assessing the removal of nutrients from the forest vegetation cover do not provide the desired results, which causes an urgent need for their improvement.

This article describes the method developed by the authors of geoinformation modeling of removal of biogenic substances from the forest vegetation cover to water bodies, taking into account the spatial distribution of vegetation in the catchment area, its species composition and absorption of biogenic substances during their migration.

The Eastern part of the Gulf of Finland was adopted as the object of testing of the developed method. this is due to the fact that eutrophication processes are actively manifested within its water area.

The volume of the background biogenic load on the Gulf of Finland, formed during the decomposition of the fall of the natural vegetation cover in the catchment area, was determined based on the specific removal of biogenic substances from plant communities and their absorption during migration “plant community — water object”.

The total background biogenic load on the eastern part of the Gulf of Finland, formed as a result of decomposition of natural vegetation cover, was 170.21 t/year for the northern catchment for nitrogen, 12.14 t/year for phosphorus, and 207.31 t/year for the southern catchment for nitrogen , and 15.68 t/year for phosphorus.

The data obtained do not contradict the results of other authors who study the background biogenic load on the Gulf of Finland.

The method can be effectively used in the development of measures to reduce the nutrient load on water bodies and planning of economic activities in catchments.

KEYWORDS: Gulf of Finland, background biogenic load, GIS “Map 2011”, GI modeling

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее загрязнённой частью Балтийского моря является Финский залив [*Бубличенко и др.*, 2003; *Гальцова и др.*, 2002; *Jesper et al.*, 2017]. Его качество воды во многом определяется выносом биогенных веществ с территорий, расположенных в России, Финляндии и Эстонии [*Поздняков и др.*, 2016; *Румянцев*, *Кондратьев*, 2014; *Степанова*, 2009]. Данный факт требует повышения эффективности контроля над биогенной нагрузкой, формируемой в пределах этих территорий.

К важнейшим направлениям решения данной задачи относится совершенствование научно-методического обеспечения работ по определению выноса биогенных веществ с водосбора Финского залива в его акваторию, особенно из фоновых источников биогенной нагрузки.

[1] Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, Zhdanovskaya str., 13, St. Petersburg, 197198, Russia; *e-mail*: **Osipov-G-K-2005@yandex.ru**

[2] Saint Petersburg Mining University, Vasilievsky isl., 21st line, 2, 199106, St. Petersburg, Russia; *e-mail*: **vfkedr@mail.ru**

Рассматриваемой проблеме посвящены работы [*Кондратьев и др.*, 2011; *Степанова*, 2009 и др.], кратко охарактеризуем особенности изложенных в них подходов.

В работе [*Кондратьев и др.*, 2011] для расчёта фоновой биогенной нагрузки предлагается использовать зависимость, учитывающую связь между слоем стока и средней концентрацией в нём биогенных веществ, поступающих из фоновых источников биогенной нагрузки. Данный подход интересен, однако он сложен в реализации, т.к. в его основу заложены натурные мониторинговые наблюдения на естественных водосборах, которые требуют значительного количества финансовых и временных затрат.

В работе [*Степанова,* 2009] в основу расчёта фоновой биогенной нагрузки заложена связь между фоновой концентрацией фосфора в стоке и продуктивностью растительных сообществ. К сожалению, автор не учитывает особенности растительного покрова конкретных территорий, а оперирует лишь обобщёнными характеристиками для широтных зон.

На основании вышеизложенного следует, что данное исследование весьма актуально. Его целью является разработка методики определения в среде ГИС фонового выноса биогенных веществ в водные объекты при разложении опада лесного растительного покрова.

В основу исследования заложена следующая гипотеза: если будет разработана методика геоинформационного моделирования выноса биогенных веществ из лесного растительного покрова в водные объекты, то будет повышена эффективность контроля над фоновой биогенной нагрузкой, что позволит принимать более обоснованные решения по планированию мероприятий, снижающих вынос биогенных веществ с водосбора в исследуемый водный объект.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Под фоновой биогенной нагрузкой понимается вынос биогенных веществ в водные объекты в результате: разложения опада естественного растительного покрова в пределах необрабатываемых земель, смыва биогенных веществ с территорий, лишённых растительного покрова, атмосферных выпадений биогенных веществ на поверхность водосбора, эрозионных процессов. При этом к естественному растительному покрову необрабатываемых земель относят: леса и лесные насаждения; закустаренные территории; болота, пойменные заболоченные луга; заброшенные сельхозугодия и т.д.

Исходя из вышеизложенного, для определения фоновой биогенной нагрузки, сформированной при разложении опада естественного растительного покрова, необходимо знать видовой состав и пространственное распределение растительности на водосборе. Для решения этой задачи авторы предлагают использовать актуализированную аналоговую картографическую информацию.

Разработанная авторами методика реализуется в пять этапов:

- аналого-цифровое преобразование аналоговых карт в растровый формат и плановая привязка полученного растрового изображения;
- аналого-цифровое преобразование элементов растрового изображения, используемых для производства расчётов, в векторный формат;
- расчёт в среде ГИС фоновых потерь биогенных веществ при разложении опада естественного растительного покрова;
- расчёт фонового поступления биогенных веществ в Финский залив с учётом снижения биогенной нагрузки при её миграции в системе «источник нагрузки − водный объект»;
- представление результатов расчёта в картографическом виде.

Первый этап. На данном этапе собираются необходимые для проведения геоинформационного моделирования цифровые и аналоговые картографические материалы, определяется степень их пригодности для расчёта фоновой биогенной

нагрузки. В качестве основного картографического материала целесообразно использовать актуализированные топографические карты м-ба 1: 50 000. После чего на территории, где отсутствует цифровая картографическая информация, с использованием сканирующих устройств осуществляется преобразование аналоговой картографической информации в растровый формат. Сущность сканирования заключается в последовательном построчном считывании картографического изображения путём перемещения сканерного луча с заданной величиной шага. В итоге получают растровое изображение исходного картографического материала. Затем по координатам углов и центральных точек топографических карт осуществляется плановая привязка отсканированного изображения в среде ГИС «Карта 2011».

Второй этап. На данном этапе с использованием цифровой картографической информации или привязанного растрового изображения создают два векторных слоя: 1) границы водосборов малых рек; 2) границы зон прямого смыва. Для построения границ водосборов малых рек используется цифровая модель рельефа (ЦМР), создаваемая с помощью векторных слоёв рельефа и гидрографии. Построение ЦМР осуществляется с использованием программного обеспечения ГИС «Карта 2011». Для построения границ зон прямого смыва используется векторный слой гидрографии. Границы зон прямого смыва строятся автоматически с помощью процедуры «буферная зона».

Третий этап. При расчёте биогенной нагрузки, сформированной в результате разложении опада естественного растительного покрова, учитывается структура естественных угодий, расположенных в пределах изучаемой территории. Это связано с тем, что содержание биогенных веществ в растительном опаде и их вынос в Финский залив обусловлены видовым составом естественных растительных сообществ.

Основными типами естественных растительных сообществ, произрастающих на водосборе восточной части Финского залива, являются:

- лес хвойный: еловый, сосновый;
- лес мелколиственный: берёзовый, осиновый;
- лес смешанный: хвойно-мелколиственный;
- болото: верховое, низинное;
- луга естественные и заброшенные сельхозугодия.

Для расчёта объёма фоновой биогенной нагрузки, сформировавшейся в результате разложения опада естественного растительного покрова, предлагается использовать следующие зависимости:

$$W' = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} U_{ji} F_j \qquad (1)$$

$$U_{ji} = \alpha_i V_i \qquad (2)$$

$$\alpha_i = \overline{v_i} / \overline{V_i} \qquad (3)$$

где W' — объём фоновой биогенной нагрузки в пределах изучаемого водосбора кг/га; U_{ji} — удельный вынос i-го биогенного вещества из опада j-го типа естественного растительного сообщества, кг/га; F_j — площадь j-го типа естественного растительного сообщества в пределах изучаемого водосбора, га; α_i — коэффициент, характеризующий возможный вынос i-го биогенного вещества при разложении растительного опада; V_{ij} — удельное содержание i-го биогенного вещества в опаде j-го растительного сообщества, кг/га; $\overline{v_i}$ — среднее удельное количество i-го биогенного вещества, вынесенного при разложении опада растительных сообществ, кг/га; $\overline{V_i}$ — среднее удельное содержание i-го биогенного вещества в опаде растительных сообществ, кг/га.

При определении коэффициентов α, использовались два допущения:

1) коэффициенты не зависят от типа растительного сообщества;

2) коэффициенты характеризуют вынос биогенных веществ за пределы растительного сообщества.

При этом среднее удельное содержание биогенных веществ в опаде основных типов растительных сообществ $\overline{V_i}$ было принято по данным работ [*Алексеенко и др.*, 1986; *Германова*, 1994; *Николаев, Гашкова*, 1987; *Хрисанов*, 1990, 1993; Эволюция…, 1988], а среднее удельное количество биогенных веществ, вынесенных при разложении опада основных типов растительных сообществ $\overline{v_i}$, было принято по данным работ [*Никитин*, 1985; *Соколов*, 1983; *Хрисанов, Осипов*, 1990; 1993; Эволюция…, 1988]. Согласно полученным результатам, средний коэффициент α для азота равен 0,04, а для фосфора — 0,02.

Удельное содержание биогенных веществ в опаде основных типов естественных растительных сообществ и их вынос за пределы сообщества приведены в табл. 1 [*Германова*, 1994; *Николаев, Гашкова*, 1987; *Осипов,* 2015; *Соколов*, 1983; *Хрисанов, Осипов*, 1993].

Табл. 1. Удельное содержание биогенных веществ в опаде основных типов естественных растительных сообществ и их вынос
Table 1. Specific content of nutrients in the litter the main types of natural plant communities and their removal

Тип растительного сообщества	**Удельное содержание, кг/га**		**Удельный вынос, кг/га**	
	$N_{общ}$	**$P_{общ}$**	**$N_{общ}$**	**$P_{общ}$**
Лес хвойный:				
Еловый	36,0	2,0	1,44	0,04
Сосновый	16,0	4,3	0,64	0,09
Лес лиственный:				
Берёзовый	60,0	8,8	2,40	0,18
Липовый	38,0	9,0	1,52	0,08
Осиновый	46,0	4,0	1,60	0,06
Ольховый	40,0	3,0	1,00	0,05
Болото:				
Верховое	52,0	10,0	2.08	0,20
Низинное	95,0	12,0	3.80	0,24
Прочие растительные сообщества:				
Луга естественные и заброшенные сельхозугодия	46,0	5,0	1,84	0,10

При определении выноса биогенных веществ из смешанных растительных сообществ использовалось следующее допущение: порода леса, подписанная на карте первой, занимает 60 % его общей площади, а второй — 40 %; это допущение принято, согласно правилам, используемым при составлении топографических карт.

На основе изучения данных государственного учёта лесного фонда и лесотаксационных описаний были сделаны следующие выводы. В пределах исследуемой территории тип растительного сообщества «лес хвойный» состоит на 36 % из сосны и на 64 % из ели; тип растительного сообщества «лес мелколиственный» состоит на 68 % из берёзы и на 31 % из осины и других пород; тип растительного сообщества «лес смешанный» состоит на 70 % из хвойных пород и на 30 % из мелколиственных; тип растительного сообщества «болото» состоит на 95 % из верховых болот и на 5 % из низинных.

Четвёртый блок. При миграции биогенных веществ в системе «источник биогенной нагрузки — водный объект» происходит их активное поглощение растительным покровом. Например, лесные насаждения могут снижать биогенную

нагрузку до 45 %, кроме лесной растительности, на поглощение биогенных веществ оказывают влияние и др. угодья; так, культурный луг шириной 500 м снижает концентрацию фосфора в воде в 28 р. [*Алексеенко и др.*, 1986; *Никитин, Спирина,* 1985; *Хрисанов, Осипов,* 1993]. Таким образом, чем больше поверхностные воды протекают по нераспаханным угодьям, тем меньше выносится ими в водные объекты биогенных веществ.

Исходя из вышеизложенного, для учёта снижения биогенной нагрузки, поступающей в водный объект из зон прямого смыва, предлагается использовать зависимость удалённости угодья от уреза воды [*Хрисанов, Осипов,* 1993]:

$$R'_{N,P} = W'\beta, \qquad (4)$$

где $R'_{N,P}$ — объём выноса биогенных веществ в водный объект с зон прямого смыва с учётом их поглощения при миграции по водосбору, кг/га; β — коэффициент поглощения биогенных веществ почвенно-растительным покровом зон прямого смыва (табл. 2).

Табл. 2. Коэффициент снижения биогенной нагрузки для зон прямого смыва
Table 2. Coefficient of reduction of biogenic load for direct flushing zones

Водность года	**Расстояние от уреза воды, м**				
	0–500	**500–1000**	**1000–2000**	**2000–3000**	**3000–4000**
Многоводный	0,9	0,7	0,5	0,3	0,1
Средней водности	0,7	0,5	0,3	0,1	0
Маловодный	0,5	0,3	0,1	0	0

Для расчёта выноса биогенных веществ в водный объект с водосборов неконтролируемых рек предлагается использовать зависимость, рекомендованную в работе [*Кондратьев и др.*, 2011]:

$$R_{N,P} = W'(1 - \frac{1}{1 + aq^b}), \qquad (5)$$

где $R_{N,P}$ — объём выноса биогенных веществ с водосборов неконтролируемых рек в водный объект с учётом их поглощения при миграции по водосбору, кг/га; q — модуль стока, л/(км^2·сек); a и b — безразмерные эмпирические параметры, значения которых составляют: a = 6,9 и b = –1,1 для азота и a = 26,6 и b = –1,71 для фосфора. Значение модуля стока q связано со слоем стока y (мм/год) эмпирическим соотношением $q = 0{,}03171 \cdot y$.

Пятый блок. В завершении работ на исследуемую территорию в среде ГИС создаются электронные картограммы объёма выноса биогенных веществ в Финский залив в результате разложения опада естественного растительного покрова неконтролируемых рек и зон прямого смыва.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве объектов апробации разработанной методики были выбраны водосборы неконтролируемых бассейнов малых рек и зон прямого смыва восточной части Финского залива.

Границы исследуемых водосборов строились по ЦМР рельефа, созданной по топографической карте м-ба 1: 50 000 и уточнялись в интерактивном режиме.

Для определения видового состава и пространственного распределения естественного растительного покрова в пределах изучаемой территории использовались топографические карты масштаба 1: 50 000, данные государственного учёта лесного фонда и лесотаксационные описания.

Объём фоновой биогенной нагрузки, формируемой при разложении опада естественного растительного покрова на исследуемых водосборах, определялся по зависимости (1), а объём выноса биогенных веществ в Финский залив с учётом их поглощения при миграции по водосбору — по зависимостям (4) и (5).

Для иллюстрации процесса практической реализации разработанной методики подробно остановимся на определении выноса биогенных веществ из опада естественного растительного покрова водосбора р. Воронки в Финский залив. Рассматриваемый водосбор расположен в южной части исследуемой территории; его структура представлена на рис. 1.

Построение границ водосбора и зоны прямого смыва осуществлялось с помощью ГИС «Карта 2011». Затем в среде ГИС была проанализирована структура естественных угодий, расположенных в пределах изучаемой территории. Согласно анализу, 6,55 % территории водосбора занимают болота, 19,75 % — прочие земли, 71,1 % — лесной растительный покров, 1,4 % — озёра и 1,58 % — застроенные территории. При этом в лесном растительном покрове бóльшую часть площади занимают берёзово-осиновые леса — 87,77 %, за ними следуют берёзово-еловые леса — 9,64 %, затем сосново-берёзовые леса — 1,74 % и елово-берёзовые леса — 0,86 % (рис. 2).

Расчёт объёма фоновой биогенной нагрузки, сформировавшейся в результате разложения опада естественного растительного покрова на водосборе р. Воронки, осуществлялся с использованием зависимостей (1) и (3), а расчёт ее снижения — с использованием зависимости (5).

В результате выполненных расчётов фоновая биогенная нагрузка водосбора р. Воронки на акваторию Финского залива, сформированная в результате разложения опада естественного растительного покрова, составила по азоту 28,03 т/год, а по фосфору — 2,93 т/год.

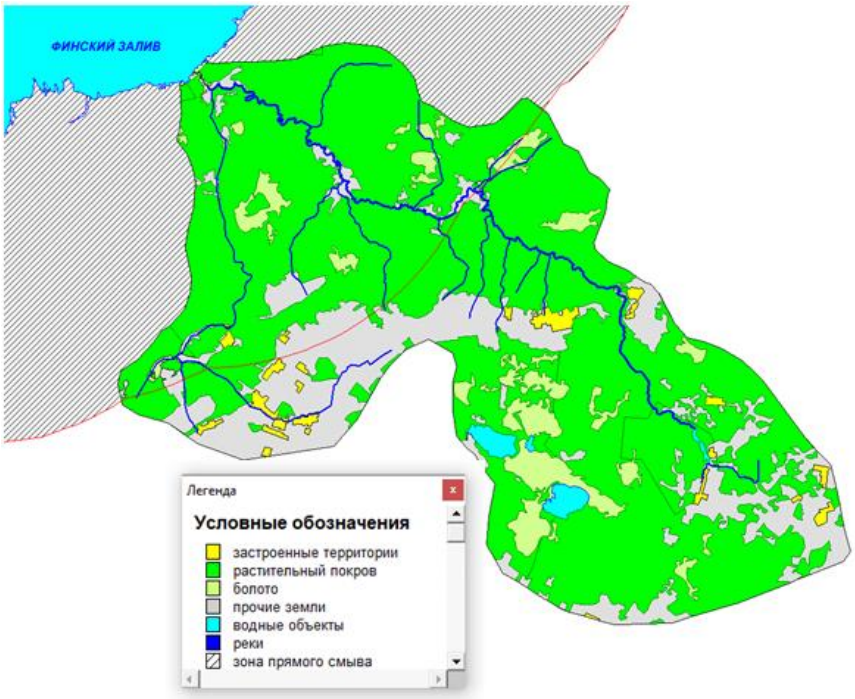


Рис. 1. Структура угодий водосбора р. Воронка
Fig. 1. The structure of the catchment lands of the Voronka river

Рис. 2. Структура лесного растительного покрова на водосборе р. Воронка
Fig. 2. Structure of forest vegetation cover in catchment area of the Voronka river

Табл. 3. Объём фоновой биогенной нагрузки на Финский залив с водосборов неконтролируемых рек
Table 3. Volume of background biogenic load on the Gulf of Finland from catchments of uncontrolled rivers

Коды водосборов рек	Наименования рек	Фоновая биогенная нагрузка, т/год		Коды водосборов рек	Наименования рек	Фоновая биогенная нагрузка, т/год	
		$N_{общ}$	$P_{общ}$			$N_{общ}$	$P_{общ}$
1	Балтиец	3,56	0,23	9	Песчаная	4,19	0,27
2	Воронка	28,03	2,93	10	Полевая	5,53	0,37
3	Гороховка	16,42	1,14	11	Сестра	11,57	0,81
4	Караста	2,19	0,19	12	Систа	21,02	1,52
5	Коваши	20,62	1,54	13	Стрелка	4,45	0,35
6	Красненькая	9,99	0,94	14	Чёрная	3,44	0,26
7	Лебяжья	5,23	0,44	15	Чулковка	2,47	0,16
8	Малиновка	3,16	0,22	16	Шингарка	6,21	0,61

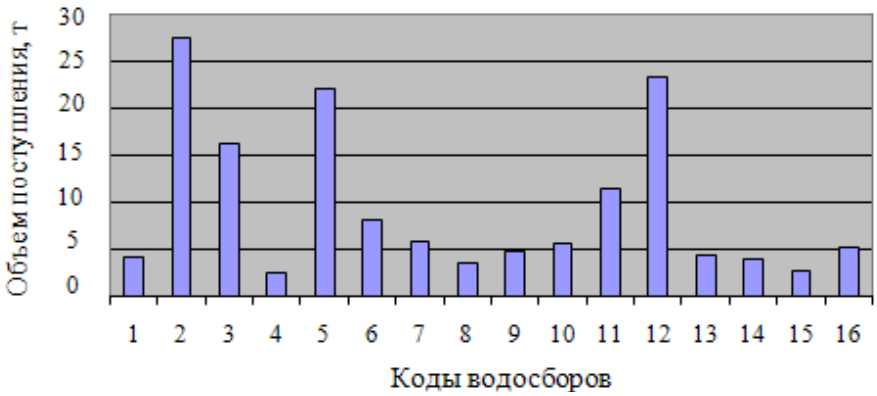


Рис. 3. Распределение фоновой биогенной нагрузки на акваторию Финского залива по азоту по водосборам малых рек
Fig. 3. Distribution of background biogenic load on the water area of the Gulf of Finland by nitrogen in the catchments of small rivers

Аналогичным способом была рассчитана фоновая биогенная нагрузка на акваторию Финского залива, сформированная в результате разложения опада естественного растительного покрова и с других водосборов неконтролируемых малых рек. Полученные результаты приведены в табл. 3 и на рис. 3 и 4.

Расчёт фоновой биогенной нагрузки, сформировавшейся в результате разложения опада естественного растительного покрова на водосборах зон прямого смыва, осуществлялся с использованием зависимостей (1) и (3), а расчет её снижения — с использованием зависимости (4). Полученные результаты приведены в табл. 4.

Суммарная фоновая биогенная нагрузка на восточную часть Финского залива, сформированная в результате разложения опада естественного растительного покрова, составила для северного водосбора по азоту 170,21 т/год, по фосфору 12,14 т/год, а для южного водосбора по азоту 207,31 т/год, а по фосфору 15,68 т/год (рис. 5). Общая площадь водосборов исследуемых малых рек и зон прямого смыва составила 7 184,9 км^2.

Исходя из вышеприведённых данных, удельный вынос азота из лесного растительного покрова водосбора в восточную часть Финского залива составил 52,5 кг·км^2/год, а фосфора — 3,9 кг·км^2/год.

Полученные данные не противоречат результатам других авторов, исследующих фоновую биогенную нагрузку на Финский залив; например, в работе [*Степанова*, 2009, с. 353] удельный вынос фосфора из растительных сообществ в акваторию залива составил 4,3 кг·км^2/год.

Однако следует отметить, что в работе [*Кондратьев и др.*, 2018, с. 115] удельные значения фонового выноса азота и фосфора с водосборов контролируемых притоков Финского залива превышают значения, полученные в процессе апробации разработанной методики, по азоту в 5 р. (275,3 кг·км^2/год), а по фосфору в 3 р. (12,0 кг·км^2/год). Это связано с тем, что в данной работе при определении фоновой биогенной нагрузки на Финский залив учитывался суммарный фоновый вынос биогенных веществ, включающий в себя: вынос из лесного растительного покрова; вынос из земель естественных и антропогенных (измененных) ландшафтов, лишённых растительности; вынос, сформированный в результате атмосферных выпадений на поверхность водосбора; вынос, сформированный в результате эрозионных процессов.

Разработанная авторами методика позволяет оперативно получать информацию о фоновом выносе биогенных веществ при разложении опада естественного растительного покрова в водные объекты на основе ограниченного объёма исходных данных. Заложенные в её основу научно-методические подходы базируются на исследованиях, проведённых ими с 1990 г. по настоящее время [*Арефьев и др.*, 1995; *Осипов*, 2015; *Хрисанов, Осипов,* 1990; 1993], которые были доложены на множестве всероссийских и международных конференций, где получили поддержку и одобрение.

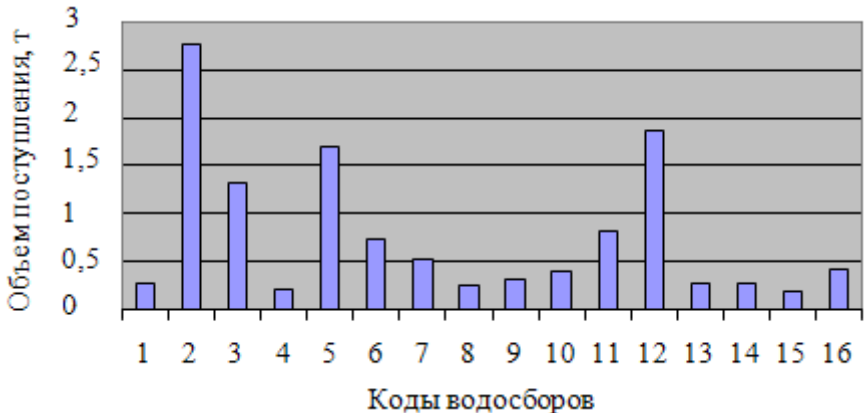


Рис. 4. Распределение фоновой биогенной нагрузки на акваторию Финского залива по фосфору по водосборам малых рек
Fig. 4. Distribution of background biogenic load on the water area of the Gulf of Finland by phosphorus in the catchments of small rivers

Табл. 4. Объём фоновой биогенной нагрузки на Финский залив с водосборов зон прямого смыва
Table 4. Volume of background biogenic load on the Gulf of Finland from catchments of direct flushing zones

Наименование зоны прямого смыва	Фоновый вынос биогенных веществ в Финский залив, т/год	
	$N_{общ}$	$P_{общ}$
Северное побережье	121,62	8,57
Южное побережье	104,21	6,91

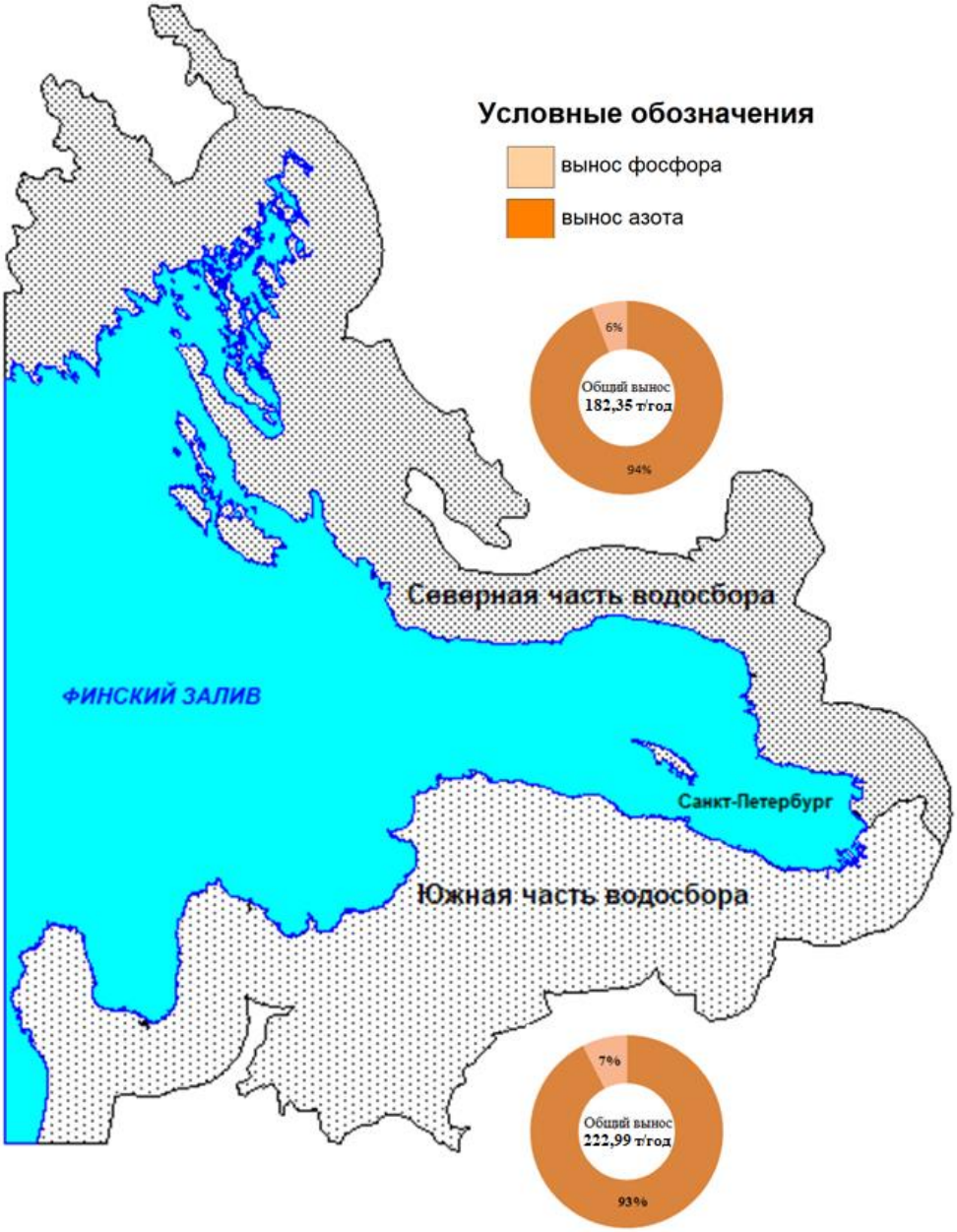


Рис. 5. Суммарная фоновая биогенная нагрузка на восточную часть Финского залива, сформированная в результате разложения опада естественного растительного покрова
Fig. 5. Total background biogenic load on the Eastern part of the Gulf of Finland, formed as a result of the decomposition of the fall of the natural vegetation cover

В предыдущих исследованиях внимание авторов было сосредоточено на отдельных аспектах данной работы, включая разработку имитационной модели динамики биогенных веществ в системе «водосбор − водоток − водохранилище» [*Хрисанов, Осипов,* 1990], разработку подходов к управлению эвтрофированием водоёмов [*Хрисанов, Осипов,* 1993], разработку основ комплексной оценки биогенной нагрузки на прибрежные воды Финского залива [*Арефьев и др.*, 1995], разработку подходов к учёту биогенного загрязнения вод при управлении природно-аграрными системами [*Осипов*, 2015].

В данной статье на основе обобщения результатов ранее выполненных авторами работ сформулированы теоретические положения и научно-методические основы методики геоинформационного моделирования выноса биогенных веществ в Финский залив из лесного растительного покрова.

Полученные авторами результаты полностью соответствуют выдвинутой гипотезе.

ВЫВОДЫ

В процессе выполненного исследования получены следующие результаты:

- разработана методика определения в среде ГИС фонового выноса биогенных веществ из опада лесного растительного покрова водосбора в исследуемый водный объект, позволяющая оперативно получать информацию о влиянии естественной растительности на биогенное загрязнение вод, что даст возможность принимать более обоснованные решения при планировании природоохранных мероприятий;
- на основе литературных источников определено содержание биогенных веществ в опаде основных типов естественных растительных сообществ водосбора восточной части Финского залива и их вынос с поверхностным стоком;
- предложены подходы к определению снижения объёма биогенной нагрузки при её миграции в системе «растительное сообщество — водный объект»;
- определён в среде ГИС вынос азота и фосфора из лесного растительного покрова водосборов малых рек и зон прямого смыва в восточную часть Финского залива;
- разработанная методика может быть успешно применена для мониторинга фоновой биогенной нагрузки на водный объект.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на адаптацию разработанной методики для других регионов с учётом специфики их физико-географических условий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 19-05-00683-а.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, grant No 19-05-00683-a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеенко В.А., Гришина Л.А., Кудрявцева Н.А., Марунич С.В., Брехов П.Т.* Изучение геохимических потоков азота и фосфора на опытном полигоне Таёжный Лог (Валдай). Вестник Московского Университета. Серия 17. Почвоведение, 1986. № 1. С. 21–26.

2. *Арефьев Н.В., Осипов Г.К., Кукушкин В.А., Атрашенок В.П.* Комплексная оценка рекреационной и азотной нагрузки на прибрежные воды Финского залива. Материалы международного симпозиума. Исследования по инженерной гидравлике. Гданьск, Польша, 1995. С. 112–118.

3. *Бубличенко А.Г., Бубличенко Ю.Н., Гальцова В.В., Дмитриев В.В., Доронина А.Ю., Иванов В.В., Кулангиева Л.В., Ланге Е.К., Лукьянов С.В., Пнюшков А.В., Резников А.И.,*

Степанов О.В., Шилин М.Б., Волкова Е.А., Исаченко Г.А., Храмцов В.Н. Природная среда побережья и акватории Финского залива (район порта «Приморск»). СПб.: Бостон-Спектр, 2003. 128 с.
4. *Гальцова В.В., Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т., Новикова О.В.* Оценка экологического состояния Финского залива: подходы, методы, результаты. Материалы итоговой сессии Учёного совета. Информационные материалы. СПб.: РГГУ, 2002. С. 189–191.
5. *Германова Н.И.* Деструкция в хвое-листового опада в лесных насаждениях среднетаёжной подзоны. Структурно-функциональная организация лесных почв среднетаёжной подзоны Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1994. С. 92–100.
6. *Кондратьев С.А., Казьмина М.В., Шмакова М.В., Маркова Е.Г.* Метод расчёта биогенной нагрузки на водные объекты. Региональная экология. СПб.: НИЦЭБ РАН, 2011. С. 50–59.
7. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Брюханов А.Ю., Викторова Н.В., Ершова А.А., Обломкова Н.С.* К оценке биогенного стока в Финский залив Балтийского моря. Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета, 2018. № 51. С. 109–120.
8. *Никитин А.П., Спирина А.Г.* Роль лесных насаждений в защите водоёмов от заиления и загрязнения. Водные ресурсы, 1985. № 1. С. 109–113.
9. *Николаев С.В., Гашкова М.Я.* Разложение в воде хвои и листьев основных лесообразующих пород. Межвузовский сборник научных трудов. Л.: ЛТА, 1987. С. 46–49.
10. *Осипов А.Г.* Методика оценки экологической безопасности структуры землепользования по критерию биогенного загрязнения вод при создании и реконструкции природно-аграрных систем. Информация и космос, 2015. № 4. С. 106–112.
11. *Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А., Тарбаева В.М., Шмакова М.В., Брюханов А.Ю., Воробьёва Е.А., Обломкова Н.С.* Научное обоснование выполнения рекомендаций ХЕЛКОМ по снижению биогенной нагрузки на Финский залив со стороны России. Вестник СПбГУ. Серия 7. Геология. География, 2016. С. 53–65.
12. *Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А.* Формирование биогенной нагрузки на Балтийское море с Российской территории и возможности её снижения в соответствии с требованиями плана действий ХЕЛКОМ. Региональная экология. СПб.: НИЦЭБ РАН, 2017. С. 65–73.
13. *Румянцев В.А., Кондратьев С.А.* О соответствии биогенной нагрузки с российской территории на Финский залив требованиям плана действий по Балтийскому морю ХЕЛКОМ. Общество. Среда. Развитие, 2014. № 3. С. 159–162.
14. *Соколов А.А.* Влияние леса на вынос минеральных элементов в водотоки. Лесоведение, 1983. № 5. С. 8–14.
15. *Степанова Е.В.* Оценка фоновой составляющей стока валового фосфора с водами контролируемых и неконтролируемых рек бассейна Балтийского моря. Казань: Молодой учёный, 2009. № 11. С. 352–355.
16. *Хрисанов Н.И., Осипов Г.К.* Имитационная модель динамики биогенных веществ в системе «водосбор-водоток-водохранилище». Важнейшие аспекты антропогенного воздействия на качество воды, почвы и мероприятия по охране флоры и фауны. Сборник научных трудов. М.: ВНИИГиМ, 1990. С. 44–48.
17. *Хрисанов Н.И., Осипов Г.К.* Управление эвтрофированием водоёмов. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. 278 с.
18. Эволюция круговорота фосфора и эвтрофирование природных вод. Л.: Наука, 1988. 208 с.
19. *Jesper H.A., Jacob C., Daniel J.C., Karsten D., Fleming-Lehtinen V., Gustafsson B., Josefson A.B., Norkko A., Villnäs A., Murray C.* Long-term temporal and spatial trends in eutrophication status of the Baltic Sea. Biological Reviews, 2017. P. 135–149.

REFERENCES

1. *Alekseenko V.A., Grishina L.A., Kudryavceva N.A., Marunich S.V., Brehov P.T.* Study of geochemical flows of nitrogen and phosphorus at the taiga Log (Valdai) test site. Herald of Moscow University. Series 17. Soil science, 1986. No 1. P. 21–26 (in Russian).
2. *Aref'ev N.V., Osipov G.K., Kukushkin V.A., Atrashenok V.P.* Comprehensive assessment of recreational and nitrogen load on coastal waters of the Gulf of Finland. Proceedings of the international Symposium. Research on engineering hydraulics. Gdansk, Poland, 1995. P. 112–118 (in Russian).
3. *Bublichenko A.G., Bublichenko Yu.N., Galtsova V.V., Dmitriev V.V., Doronina A.Yu., Ivanov V.V., Kulangieva L.V., Lange E.K., Lukyanov S.V., Pnyushkov A.V., Reznikov A.I., Stepanov O.V., Shilin M .B., Volkova E.A., Isachenko G.A., Khramtsov V.N.* Natural environment of the coast and water area of the Gulf of Finland (port area "Primorsk"). St. Petersburg: Boston-Specter, 2003. 128 p (in Russian).
4. *Galtsova V.V., Dmitriev V.V., Frumin G.T., Novikova O.V.* Assessment of the ecological state of the Gulf of Finland: approaches, methods, results. Materials of the final session of the Academic Council. Information material. St. Petersburg: RSUH, 2002. P. 189–191 (in Russian).
5. *Germanova N.I.* Destruction in coniferous-leaf litter in forest plantations of the middle taiga subzone. Structural and functional organization of forest soils of the middle taiga subzone of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1994. P. 92–100 (in Russian).
6. Evolution of phosphorus cycle and eutrophication of natural waters. Leningrad: Nauka, 1988. 208 p (in Russian).
7. *Jesper H.A., Jacob C., Daniel J.C., Karsten D., Fleming-Lehtinen V., Gustafsson B., Josefson A.B., Norkko A., Villnäs A., Murray C.* Long-term temporal and spatial trends in eutrophication status of the Baltic Sea. Biological Reviews, 2017. P. 135–149.
8. *Khrisanov N.I., Osipov G.K.* Management of eutrophication of reservoirs. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1993. 278 p. (in Russian).
9. *Khrisanov N.I., Osipov G.K.* Simulation model of the dynamics of biogenic substances in the system "catchment-watercourse-reservoir". The most important aspects of anthropogenic impact on water quality, soil quality and measures for the protection of flora and fauna. Proceedings. Moscow: ARSRIHELR (All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov), 1990. P. 44–48 (in Russian).
10. *Kondratiev S.A., Kazmina M.V., Shmakova M.V., Markova E.G.* Method for calculating the biogenic load on water objects. Regional Ecology. St. Petersburg: RCES RAS (Research Center for Environmental Safety of RAS), 2011. P. 50–59 (in Russian).
11. *Kondratiev S.A., Shmakova M.V., Bryuhanov A.Yu., Viktorova N.V., Ershova A.A., Oblomkova N.S.* On the assessment of biogenic runoff to the Gulf of Finland of the Baltic sea. Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University, 2018. No 51. P. 109–120 (in Russian).
12. *Nikitin A.P., Spirina A.G.* The role of forest plantations in protecting water bodies from silting and pollution. Water Resources, 1985. No 1. P. 109–113 (in Russian).
13. *Nikolaev S.V., Gashkova M.Ya*. Decomposition in water of needles and leaves of the main forest-forming breeds. Intercollegiate collection of scientific papers. Leningrad: Forestry academy, 1987. P. 46–49.
14. *Osipov A.G.* Methods of assessment of ecological safety of land use structure by the criterion of biogenic water pollution in the creation and reconstruction of natural and agricultural systems. Information and Space, 2015. No 4. P. 106–112 (in Russian).
15. *Pozdnyakov Sh.R., Kondratiev S.A., Tarbaeva V.M., Shmakova M.V., Bryuhanov A.Yu., Vorobeva E.A., Oblomkova N.S.* Scientific substantiation of the implementation of HELCOM

recommendations to reduce the biogenic load on the Gulf of Finland from Russia. Vestnik of Saint Petersburg University. Series 7. Geology. Geography, 2016. P. 53–65 (in Russian).
16. *Pozdnyakov Sh.R., Kondratiev S.A.* formation of the biogenic load on the Baltic sea from the Russian territory and the possibility of its reduction in accordance with the requirements of the HELCOM action plan. Regional Ecology. St. Petersburg: RCES RAS (Research Center for Environmental Safety of RAS), 2017. P. 65–73 (in Russian).
17. *Rumyancev V.A., Kondratiev S.A.* On the compliance of the biogenic load from the Russian territory to the Gulf of Finland with the requirements of the HELCOM Baltic sea action plan. Society. Environment. Development, 2014. No 3. P. 159–162 (in Russian).
18. *Sokolov A.A.* The influence of the forest on the removal of mineral elements in watercourses. Russian Journal of Forest Science, 1983. No 5. P. 8–14 (in Russian).
19. *Stepanova E.V.* Assessment of the background component of gross phosphorus runoff with the waters of controlled and uncontrolled rivers in the Baltic sea basin. Kazan: Young Scientist, 2009. No 11. P. 352–355 (in Russian).

УДК: 502.53:528.946556.5:911.9 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-151-161**

В.А. Добрякова[1], Н.Н. Москвина[2], А.Б. Добряков[3], Л.Ф. Жегалина[4], И.Р. Идрисов[5]

СТАТИСТИКА GETIS-ORD GI* ДЛЯ АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ В БАССЕЙНЕ РЕКИ ТРОМЪЁГАН

АННОТАЦИЯ

Информативность и эффективность экологического исследования территории можно повысить при помощи методов многомерного анализа и картирования полученных результатов. В статье представлены анализ и результаты картографирования пространственных и временных тенденций загрязнения углеводородами бассейна р. Тромъёган за период 2006–2018 гг. с применением инструментария ArcGIS Pro. Информационной основой исследования являются данные локального экологического мониторинга лицензионных участков распределённого фонда недр Ханты-Мансийского автономного округа − Югры.

Анализ загрязнения выполнен на основе подробного изучения географии исходных данных с привлечением расчётов статистических показателей (минимальное, среднее, максимальное расстояния между точками отбора проб, индекс Getis-Ord Gi*). Построены тематические карты по усреднённым за год данным. Проанализирована пространственно-временная динамика концентрации углеводородов в поверхностных водах за 2006–2018 гг. с применением инструмента «Анализ возникновения горячих точек». Временной кластерный срез среднегодовой концентрацией углеводородов по показателю Getis-Ord Gi* позволил выявить тенденции в динамике показателей. Составлены карты среднегодовой концентрации углеводородов и представлены результаты пространственно-временного анализа среднегодовой концентрации углеводородов в поверхностных водах.

Выявление закономерностей в больших массивах многолетних данных и учёт пространственной компоненты являются необходимыми элементами современных экологических исследований. Анализ временных рядов среднегодовых концентраций в бассейне р. Тромъёган показал чёткую тенденцию в динамике содержания углеводородов. Полученные выводы могут служить основой для принятия управленческих решений в области экологического мониторинга на лицензионных участках распределённого фонда недр Ханты-Мансийского автономного округа − Югры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: статистика Getis-Ord Gi*, пространственно-временной анализ, ГИС, анализ возникновения горячих точек, углеводородное загрязнение в воде

---

[1] Тюменский государственный университет, ул. Володарского, д. 6, 625003, Тюмень, Россия; *e-mail:* **v.a.dobryakova@utmn.ru**

[2] Тюменский государственный университет, ул. Володарского, д. 6, 625003, Тюмень, Россия; *e-mail:* **n.n.moskvina@utmn.ru**

[3] Уральское главное управление Центрального банка Российской Федерации, отделение по Тюменской области, ул. Володарского, д. 48, 625000, Тюмень, Россия; *e-mail:* **dobryakov_andrey@mail.ru**

[4] Балтийский федеральный университет имени И. Канта, ул. А. Невского, д. 14, 236016, Калининград, Россия; *e-mail:* **LZhegalina@kantiana.ru**

[5] Тюменский государственный университет, ул. Володарского, д. 6, 625003, Тюмень, Россия; *e-mail:* **i.r.idrisov@utmn.ru**

Valentina A. Dobryakova[1], **Natalya N. Moskvina**[2], **Andrey B. Dobryakov**[3], **Lilia F. Zhegalina**[4], **Ildar R. Idrisov**[5]

GETIS-ORD GI* STATISTICS FOR HYDROCARBONS CONTENT ANALYSIS IN THE TROMJEGAN RIVER BASIN

ABSTRACT

The information content and effectiveness of ecological research of the territory can be improved using the methods of multivariate analysis and mapping of the results. The article presents the analysis and mapping results of spatial and temporal trends of hydrocarbon pollution in the Tromjegan river basin for the period 2006–2018 using the tools of ArcGIS Pro. The informational and basic research is the data of local environmental monitoring of licensed blocks of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Ugra.

Pollution analysis was carried out on the basis of a detailed study of the geography of the source data using statistical calculations (minimum, average, maximum distances between sampling points, Getis-Ord Gi* index). Thematic maps were constructed using data averaged over the year. The spatial and temporal dynamics of hydrocarbons concentration in surface waters for 2006–2018 is analyzed using the “Hot Spot Analysis” tool. A temporary cluster section of hydrocarbons average annual concentration according to the Getis-Ord Gi* indicator allowed us to identify trends in the dynamics of indicators. Maps of hydrocarbons average annual concentration were compiled and the results of a spatial-temporal analysis of hydrocarbons average annual concentration in surface waters were presented.

The identification of patterns in large arrays of long-term data and the consideration of the spatial component are necessary elements of modern environmental research. Analysis of the time series of average annual concentrations in the Tromjegan river basin showed a clear trend in the dynamics of hydrocarbon pollution. The findings can be the basis for making managerial decisions in the environmental monitoring of licensed blocks of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug − Ugra.

KEYWORDS: Getis-Ord Gi* statistics, space-time analysis, GIS, analysis of hot spots genesis, hydrocarbon water pollution

ВВЕДЕНИЕ

Выявление закономерностей в больших массивах многолетних данных и учёт пространственной компоненты являются необходимыми элементами современных экологических исследований.

Экологический мониторинг районов нефтедобычи ежегодно накапливает огромное количество данных геохимического состояния природных сред на значительной территории. Одним из главных показателей является загрязнение углеводородами поверхностных вод.

В настоящее время база данных локального экологического мониторинга Ханты-Мансийского автономного округа − Югры насчитывает более 1,8 млн измерений, в т.ч.

[1] Tyumen State University, Volodarskiy str., 6, 625003, Tyumen, Russia; *e-mail:* **v.a.dobryakova@utmn.ru**
[2] Tyumen State University, Volodarskiy str., 6, 625003, Tyumen, Russia; *e-mail:* **n.n.moskvina@utmn.ru**
[3] Tyumen Regional Division of the Ural Main Branch of the Central Bank of the Russian Federation, Volodarskiy str., 48, 625000, Tyumen, Russia; *e-mail:* **dobryakov_andrey@mail.ru**
[4] Immanuel Kant Baltic Federal University, Proletarskaya str., 131, 236029, Kaliningrad, Russia; *e-mail:* **lzhegalina@kantiana.ru**
[5] Tyumen State University, Volodarskiy str., 6, 625003, Tyumen, Russia; *e-mail:* **i.r.idrisov@utmn.ru**

более 1,1 млн по поверхностным водам[1]. Анализ этой информации затруднён неравномерностью распределения точек отбора проб по площади и нерегулярностью отбора во времени.

Информативность и эффективность экологического исследования территории можно повысить при помощи методов многомерного анализа и картирования полученных результатов. ArcGIS Pro позволяет решать подобные задачи.

Водосбор р. Тромъёган расположен в Сургутском административном районе автономного округа. Длина водотока составляет 581 км, площадь водосбора — 55 600 км^2. Тромъёган впадает в р. Обь через протоку Санина примерно в 50 км к востоку от г. Сургута. Река судоходна на протяжении 250 км от устья. Её основные притоки — Моховая, Аган, Ортъягун, Энтль-Имиягун, Нятлонгаягун [*Лёзин*, 1999].

Водосборный бассейн отличается слабой дренированностью и почти повсеместным распространением олиготрофных сфагновых и мезотрофных мохово-травяных болот. Заболоченность и заозёренность достигает 80 и 20 % соответственно [*Москвина, Козин*, 2001].

В бассейне р. Тромъёган разрабатывается около 30 месторождений углеводородного сырья. Крупнейшие из них: Фёдоровское (нижнее течение), Тевлинско-Русскинское, Конитлорское и Котухтинское (среднее течение), Холмогорское, Выинтойское (верхнее течение) и др. В районах добычи создана развитая сеть коридоров коммуникаций, вахтовых посёлков, кустовых площадок.

На территории исследования расположены г. Когалым и г. Радужный, пос. Новоаганск, нац. пос. Русскинская, Тром-Аган. Общая численность проживающих — более 74 тыс. чел.

На качество вод р. Тромъёган влияют полугидроморфные ландшафты водосборной территории, обусловливая малое количество взвешенных частиц, кислую водную среду (средний показатель Ph 6–6,3), низкую прозрачность вод, высокое содержание железа, большое количество органики и пониженное содержание кислорода.

По данным Ханты-Мансийского ЦГМС — филиала ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС» — среднегодовые концентрации нефтепродуктов равны 0,7 ПДК. УКИЗВ (удельный комбинаторный индекс загрязнённости воды) составляет 3,85, качество воды относится к классу 4А — «грязная».

Перед авторами статьи стояла задача подобрать и апробировать инструменты ArcGIS Pro для анализа многолетнего массива данных (2006–2018 гг.), которые позволяют определить и наглядно представить пространственно-временную динамику углеводородного загрязнения речного бассейна р. Тромъёган в районе нефтедобывающего комплекса.

Целью представленной работы является анализ пространственно-временных изменений в динамике углеводородного загрязнения в поверхностных водах с применением локального индекса Getis-Ord Gi*.

Углублённые исследования в области систем управления экологическими рисками, включая региональное экологическое планирование, экологический мониторинг чрезвычайных ситуаций и реагирование на чрезвычайные ситуации, являются на сегодняшний день актуальными задачами [*Getis, Ord*, 1996; *Hart, Zandbergen*, 2014; *Peng et al*., 2013]. Карты «горячих точек» являются наглядным инструментом в вопросах планирования и управления экологической политики [*Crossman, Bryan*, 2009; *De Groot et al*., 2010; *Maes et al*., 2013].

[1] Доклад «Об экологической ситуации в Ханты-Мансийском автономном округе − Югре в 2018 году». Электронный ресурс: https://prirodnadzor.admhmao.ru/doklady-i-otchyety/doklad-ob-ekologicheskoy-situatsii-v-khanty-mansiyskom-avtonomnom-okruge-yugre/2876367/2018-god

В зарубежной научной литературе освещены многочисленные результаты практических и аналитических исследований, гл. обр. социально-демографических, где успешно был применён анализ горячих точек [*Chainey,* 2010; *Griffith, Getis,* 2017; *Hart, Zandbergen,* 2014; *Wubuli et al.,* 2015].

В российской научной литературе встречаются отдельные исследования в области естественных наук с применением статистики Getis-Ord Gi*, например, при выявлении закономерностей распространения заболеваний сельскохозяйственных животных [*Коренной и др.,* 2017]. Имеется опыт работы по анализу пространственно-временных кластеров заболеваемости в области онкологии [*Архипова, Черногубова,* 2017; 2019]. Исследований, связанных со статистической обработкой больших массивов экологических данных, не встречено. Отдельные аспекты в области мониторинга атмосферного воздуха рассматриваются в статье Н.М. Рашевского и др. [2019]. Группой авторов данной статьи ранее проведён анализ пространственных и временных тенденций загрязнения углеводородами бассейна р. Большой Балык за период 2006–2017 гг. [*Добрякова и др*., 2020].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Информационную основу исследования составляют данные локального экологического мониторинга лицензионных участков недр Ханты-Мансийского автономного округа − Югры. Единицами исследования являются 27 445 проб воды бассейна р. Тромъёган на территории Югры, отобранные за период с 2006 по 2018 г.

Анализ пространственно-временных изменений концентрации углеводородов в поверхностных водах бассейна р. Тромъеган за период 2006–2018 гг. выполнен с помощью двух инструментов ArcGIS Pro: «Создать куб Пространство-Время» и «Анализ возникновения горячих точек».

Инструмент «Создать куб Пространство-Время» создаёт многомерную структуру данных (трёхмерный куб, netCDF) из пространственно-временных бинов, где x-, y-измерения представляют пространство, а t-измерение представляет время**.** В пределах каждого бина подсчитывается количество точек и обобщённые статистические показатели для указанного атрибута (у нас — среднее по концентрации углеводородов).

Для определения размера основания бина рассчитывалось максимальное расстояние до соседних точек (инструмент «Вычислить диапазон расстояний до числа соседних объектов»). Инструмент применялся ко всем точкам наблюдений за весь период. По итогам выбран размер ячейки в основании бина 13 км, высота бина — 1 год.

Инструмент «Анализ возникновения горячих точек» использует созданный куб в качестве входных данных и на его основе выявляет статистически значимые тренды анализируемого показателя во времени.

Алгоритм работы инструмента следующий:

- расчёт пространственно-временной статистики Getis-Ord Gi*; каждому бину на основе пространственно-временных отношений с другими бинами присваивается квалификационная категория;
- проверка «столбца» бинов на наличие временного тренда с использованием статистики Манна-Кендалла [Теория статистики, 2005];
- классификация «столбцов» бинов в соответствии с выявленным трендом.

Важный параметр для работы инструмента — величина окрестности бина, используемая для расчёта статистики. Она определяется двумя параметрами: временным шагом окрестности и интервалом расстояния. В нашем исследовании временной шаг, высота бина — 1 год, окрестность бина — 27 км.

Определение тренда значений куба выполнено по результатам сравнения рассчитанного среднего по концентрации загрязнителя для окрестности конкретного бина с глобальным средним (рассчитанным для всей территории за весь период времени).

Результаты работы инструмента представлены на рис. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для формирования первоначального представления о распределении углеводородов в бассейне р. Тромъёган построены карты среднегодовых концентраций в пробах за период 2006–2018 гг.

Чтобы продемонстрировать динамику изменений, на карту вынесены данные трёхлетних периодов со следующими границами — 2006, 2009, 2012, 2015, 2018 гг. Выбор диапазона отображения данных основан на сравнении с нормативным показателем предельно-допустимой концентрации (ПДК) — 0.05 мг/дм^3 (рис. 1).

Максимальные концентрации фиксируются в период с 2006 по 2009 г. в долине р. Тромъёган и на его правых притоках. Кратность превышения установленных нормативов достигает 4–6 р. Повышенные концентрации нефтепродуктов в 2012 г. сосредоточены в среднем течении р. Аган, с кратностью превышения ПДК в 4–6 р.

В последующие годы наблюдений (2015–2018 гг.) превышения предельно допустимых концентраций отмечаются в верховьях правых притоков р. Аган, у северной границы автономного округа. При этом значения превышают ПДК в 2–3 р.

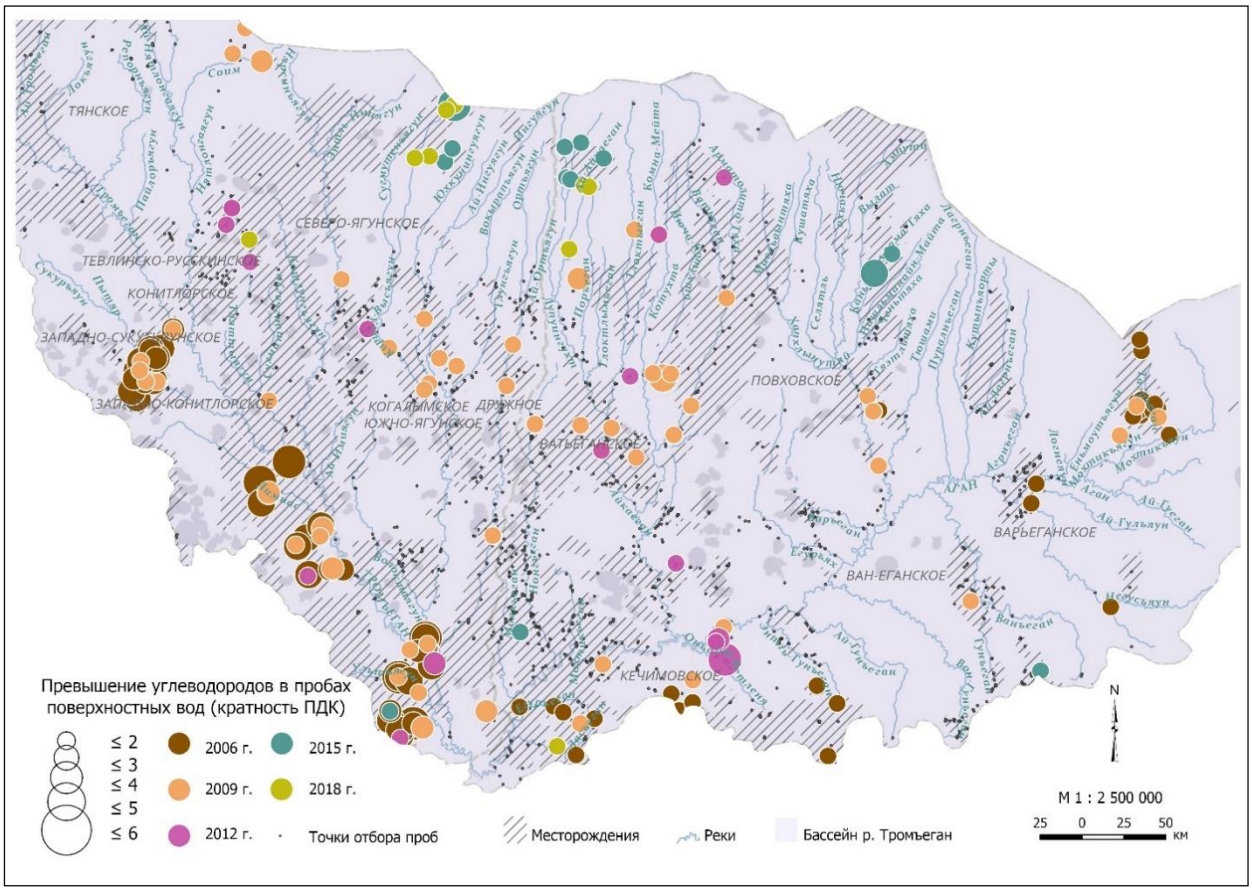


Рис. 1. Изменение среднегодовой концентрации углеводородов в поверхностных водах бассейна р. Тромъёган за период 2006–2018 гг.
Fig. 1. Changing of annual average hydrocarbon concentration in surface water of Tromjegan river basin for the period 2006–2018

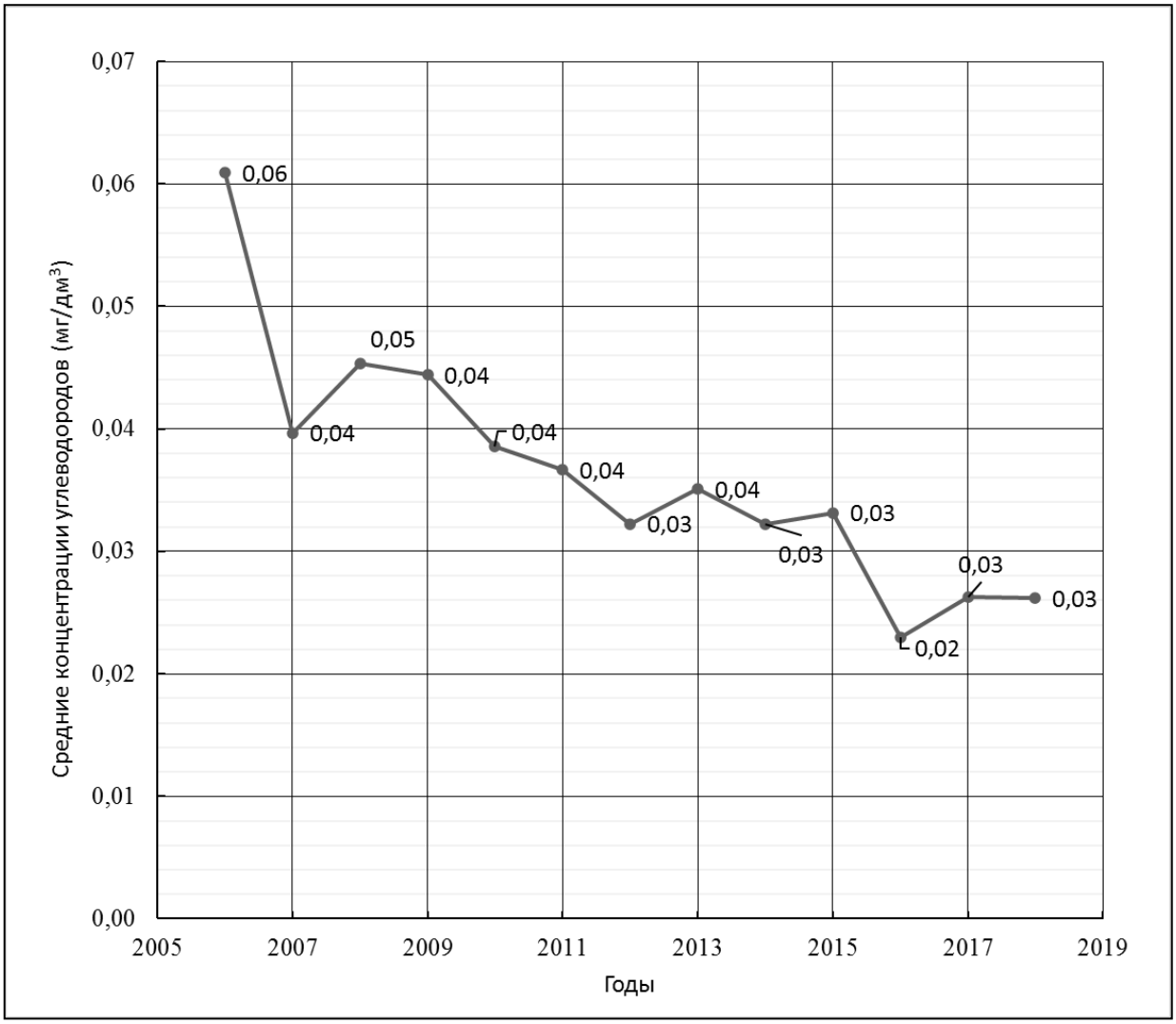


Рис. 2. График изменения среднегодовой концентрации углеводородов в поверхностных водах бассейна р. Тромъеган за период 2006–2018 гг.
Fig. 2. Chart of changes of hydrocarbons annual average concentration in the surface waters of Tromjegan river basin for the period 2006–2018

Отмечается снижение среднегодовых концентраций углеводородов в бассейне р. Тромъёган за анализируемый период. В качестве дополнительной информации для анализа построен график изменения среднегодовой концентрации углеводородов (рис. 2).

На большей части бассейна р. Тромъёган отмечается разнонаправленная динамика содержания углеводородов в воде (рис. 3).

В бассейне р. Аган концентрации углеводородов снижены, в сравнении со средними значениями на территории исследования. Анализ временных рядов позволяет проследить динамику непрерывной серии бинов с более низкими значениями (последовательные и постоянные холодные точки). В этом же районе отмечаются спорадические холодные точки, в которых фиксируются значения в интервале среднего или ниже, но никогда выше среднего.

В долинах рр. Сукуръяун, Лимпас, Ортъягун и в устьевой части р. Тромъёган картируются колеблющиеся холодные точки, регистрирующие снижение средних

показателей за последний период при относительно высоких значениях предыдущих лет наблюдений.

В целом анализ временных рядов среднегодовых концентраций в бассейне р. Тромъёган показывает чёткую тенденцию к снижению содержания углеводородов.

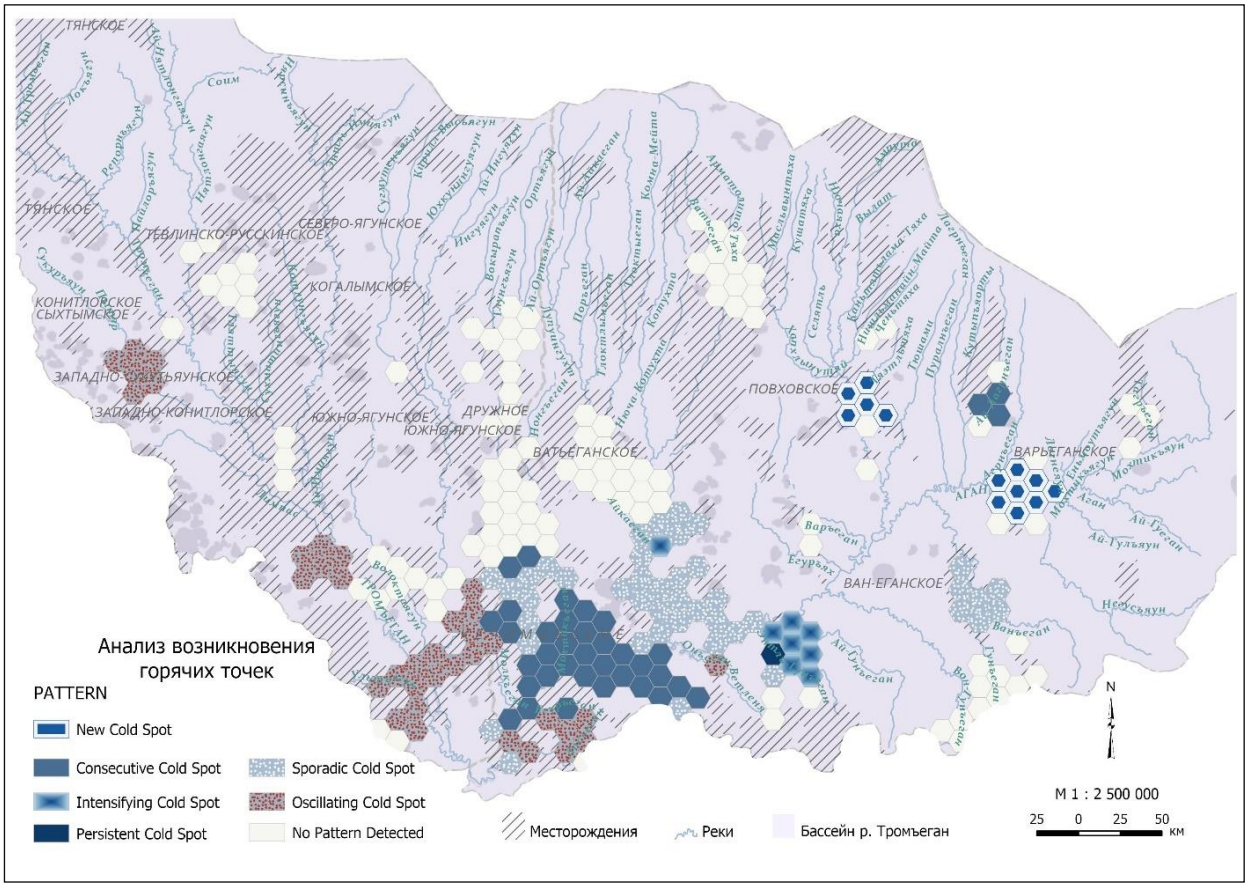


Рис. 3. Результаты пространственно-временного анализа среднегодовой концентрации углеводородов в поверхностных водах бассейна р. Тромъёган за период 2006–2018 гг.
Fig. 3. Results of space-time analysis of annual average hydrocarbon concentration in surface water of Tromjegan river basin for the period 2006–2018

ВЫВОДЫ

Представленная работа — результат обработки накопленного за более чем 12-летний период объёма статистической экологической информации с помощью динамического пространственно-временного анализа и определения многолетних трендов с использованием инструментов ArcGI Pro.

Временной кластерный срез среднегодовой концентрации углеводородов по показателю Getis-Ord Gi* позволил выявить стабильную тенденцию к снижению содержания загрязнителя.

По результатам ежегодного анализа зафиксированы наиболее высокие значения содержания углеводородов в период с 2006 по 2009 гг. — с превышением предельно допустимой концентрации (ПДК) в 4–6 р. В последующие годы отмечено снижение среднегодовой концентрации загрязняющего вещества, за исключением истоков правых притоков р. Аган в 2012 г., где фиксируется разовое повышение.

Пространственно-временной анализ выявил разнонаправленную динамику содержания углеводородов на большей части бассейна исследования. При этом в бассейне

р. Аган, в долинах притоков и в устье р. Тромъёган концентрации углеводородов снижены в сравнении со средними значениями территории исследования, и тенденция к снижению сохраняется.

Полученные выводы могут служить основой для принятия управленческих решений в области экологического мониторинга на лицензионных участках распределённого фонда недр. Результаты исследования свидетельствуют о достаточно грамотной и стабильной политике в области управления экологическими рисками, ведущей к улучшению экологического состояния территории Ханты-Мансийского автономного округа — Югры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Архипова О.Е., Черногубова Е.А.* «Горячие точки» заболеваемости злокачественными новообразованиями в Ростовской области: пространственно-временной анализ. Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. Ростов-на-Дону: ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», 2019. Т. 1. № 4. С. 207–211.

2. *Архипова О.Е., Черногубова Е.А.* Пространственно-временной анализ распределения рака предстательной железы (РПЖ) в районах Ростовской области. Материалы III Всероссийской конференции по молекулярной онкологии. Успехи молекулярной онкологии. М.: АБВ-пресс, 2017. Т. 4. № S4. С. 14.

3. *Добрякова В.А., Москвина Н.Н., Жегалина Л.Ф.* Статистика Getis-Ord Gi* при обработке многолетних данных содержания углеводородов в бассейне реки Большой Балык. Геодезия и картография, 2020. Т. 81. № 5. DOI:10.22389/0016-7126-2020-959.

4. *Коренной Ф.И., Петрова О.Н., Гуленкин В.М., Караулов А.К.* Применение аналитических инструментов ArcGIS для выявления пространственно-временных закономерностей распространения особо опасных заболеваний сельскохозяйственных животных. ГИС и здоровье обществ, 2017. № 1 (80). Электронный журнал: https://www.esri-cis.ru/news/arcreview/detail.php?ID=24666&SECTION_ID=1098.

5. *Лёзин В.А.* Реки Ханты-Мансийского автономного округа. Справочное пособие. Тюмень: Вектор Бук, 1999. 160 с.

6. *Москвина Н.Н., Козин В.В.* Ландшафтное районирование Ханты-Мансийского автономного округа. Ханты-Мансийск: Полиграфист, 2001. 40 с.

7. *Рашевский Н.М., Санжепов Б.Х., Синицин А.А., Барихашвили В.Р.* Поддержка принятия решений при мониторинге качеств атмосферного воздуха на селитебной территории. Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура, 2019. Вып. 2 (75). С. 206–214.

8. Теория статистики: Учебник. М.: Инфра, 2005. 476 с.

9. *Chainey S.* Advanced hotspot analysis: spatial significance mapping using Gi*. UCL Jill Dando Institute of Crime Science. London: University College London, 2010.

10. *Crossman N.D., Bryan B.A.* Identifying cost-effective hotspots for restoring natural capital and enhancing landscape multifunctionality. Ecological Economics, 2009. No 68 (3). P. 654–668. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2008.05.003.

11. *De Groot R.S., Alkemade R., Braat L. Hein L., Willemen L.* Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. Ecological Complexity, 2010. No 7(3). P. 260–272. DOI: 10.1016/j.ecocom.2009.10.006.

12. *Ding L., Chen K.L., Liu T., Chen S.G., Wang X.* Spatial-temporal hotspot pattern analysis of provincial environmental pollution incidents and related regional sustainable management in China in the period 1995–2012. Sustainability, 2015. No 7. P. 14385–14407. DOI:10.3390/su71014385.

13. *Getis A., Ord J.K.* Local spatial statistics: An overview. In Spatial Analysis: Modeling in GIS Environment. New York, NY, USA: John Wiley & Sons Inc., 1996. P. 261–278.
14. *Griffith D., Getis A.* Spatial filtering. Encyclopedia of GIS. Springer, Cham impacts of urban patterns on aquatic ecosystems: an empirical analysis in Puget lowland sub-basins. Landscape and Urban Planning, 2017. No 80. P. 345–361.
15. *Hart T.C., Zandbergen P.A.* Kernel density estimation and hotspot mapping: Examining the influence of interpolation method, grid cell size, and bandwidth on crime forecasting. Policing: An International Journal of Police Strategies and Management, 2014. V. 37. P. 305–323.
16. *Maes J., Teller A., Erhard M., Liquete C., Braat L., Berry P., Egoh B., Puydarrieux P., Fiorina C., Santos F., Paracchini M.L., Keune H., Wittmer H., Hauck J., Fiala I., Verburg P.H., Conde S., Schagner J.P., San Miguel J., Estreguil C., Ostermann O., Barredo J.I., Pereira H.M., Stott A., Laporte V., Meiner A., Olah B., Royo Gelabert E., Spyropoulou R., Petersen J.E., Maguire C., Zal N., Achilleos E., Rubin A., Ledoux L., Brown C., Raes C., Jacobs S., Vandewalle M., Connor D., Bidoglio G.* Mapping and assessment of ecosystems and their services: An analytical framework for ecosystem assessments under action 5 of the EU biodiversity strategy to 2020. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013. 57 p. DOI:10. 2788/720519.
17. *Peng J.F., Song Y.H., Yuan P., Xiao S.H., Han L.* A novel identification method of the environmental risk sources for surface water pollution accidents in chemical industrial parks. Journal of Environmental Sciences – China, 2013. No 25. P. 1441–1449.
18. *Wubuli A., Xue F., Jiang D., Yao X., Upur H., Wushouer Q.* Socio-demographic predictors and distribution of pulmonary tuberculosis (TB) in Xinjiang, China: A spatial analysis. PLoS One, 2015. V. 10. P. 1−22.

REFERENCES

1. *Arkhipova O.E., Chernogubova E.A.* “Hot spots” of the incidence of malignant neoplasms in the Rostov region: spatio-temporal analysis. Ecology. Economy. Computer science. Series: System analysis and modeling of economic and ecological systems. Rostov-on-Don: Federal State Budgetary Institution “Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”, 2019. V. 1. No 4. P. 207–211 (in Russian).
2. *Arkhipova O.E., Chernogubova E.A.* Spatial-temporal analysis of the distribution of prostate cancer (PCa) in the regions of the Rostov region. Proceedings of the III All-Russian Conference on Molecular Oncology. Advances in Molecular Oncology. Moscow: ABV-Press, 2017. V. 4. No S4. P. 14 (in Russian).
3. *Chainey S.* Advanced hotspot analysis: spatial significance mapping using Gi*. UCL Jill Dando Institute of Crime Science. London: University College London, 2010.
4. *Crossman N.D., Bryan B.A.* Identifying cost-effective hotspots for restoring natural capital and enhancing landscape multifunctionality. Ecological Economics, 2009. No 68 (3). P. 654–668. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2008.05.003.
5. *De Groot R.S., Alkemade R., Braat L. Hein L., Willemen L.* Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. Ecological Complexity, 2010. No 7(3). P. 260–272. DOI: 10.1016/j.ecocom.2009. 10.006.
6. *Ding L., Chen K.L., Liu T., Chen S.G., Wang X.* Spatial-temporal hotspot pattern analysis of provincial environmental pollution incidents and related regional sustainable management in China in the period 1995–2012. Sustainability, 2015. No 7. P. 14385–14407. DOI:10.3390/ su71014385.
7. *Dobryakova V.A., Moskvina N.N., Zhegalina L.F.* Statistics Getis-Ord Gi* in adaptation of perennial hydrocarbon content data in river Bolshoy Balyk basin. Geodesy and Cartography, 2020. V. 81. No 5. DOI:10.22389/0016-7126-2020-959 (in Russian).

8. *Getis A., Ord J.K.* Local spatial statistics: An overview. In Spatial Analysis: Modeling in GIS Environment. New York, NY, USA: John Wiley & Sons Inc., 1996. P. 261–278.
9. *Griffith D., Getis A.* Spatial filtering. Encyclopedia of GIS. Springer, Cham impacts of urban patterns on aquatic ecosystems: an empirical analysis in Puget lowland sub-basins. Landscape and Urban Planning, 2017. No 80. P. 345–361.
10. *Hart T.C., Zandbergen P.A.* Kernel density estimation and hotspot mapping: Examining the influence of interpolation method, grid cell size, and bandwidth on crime forecasting. Policing: An International Journal of Police Strategies and Management, 2014. V. 37. P. 305–323.
11. *Korennoy F.I., Petrova O.N., Gulenkin V.M., Karaulov A.K.* The use of ArcGIS analytical tools to identify spatial and temporal patterns of the spread of especially dangerous diseases of farm animals. GIS and Public Health, 2017. No 1 (80). Electronic journal: https://www.esri-cis.ru/news/arcreview/detail.php?ID=24666&SECTION_ID=1098 (in Russian).
12. *Lezin V.A.* The rivers of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug. Reference guide. Tyumen: Vector Book, 1999. 160 p. (in Russian).
13. *Maes J., Teller A., Erhard M., Liquete C., Braat L., Berry P., Egoh B., Puydarrieux P., Fiorina C., Santos F., Paracchini M.L., Keune H., Wittmer H., Hauck J., Fiala I., Verburg P.H., Conde S., Schagner J.P., San Miguel J., Estreguil C., Ostermann O., Barredo J.I., Pereira H.M., Stott A., Laporte V., Meiner A., Olah B., Royo Gelabert E., Spyropoulou R., Petersen J.E., Maguire C., Zal N., Achilleos E., Rubin A., Ledoux L., Brown C., Raes C., Jacobs S., Vandewalle M., Connor D., Bidoglio G.* Mapping and assessment of ecosystems and their services: An analytical framework for ecosystem assessments under action 5 of the EU biodiversity strategy to 2020. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013. 57 p. DOI:10. 2788/720519.
14. *Moskvina N.N., Kozin V.V.* Landscape zoning of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug. Khanty-Mansiysk: Polygraphist, 2001. 40 p. (in Russian).
15. *Peng J.F., Song Y.H., Yuan P., Xiao S.H., Han L.* A novel identification method of the environmental risk sources for surface water pollution accidents in chemical industrial parks. Journal of Environmental Sciences – China, 2013. No 25. P. 1441–1449.
16. *Rashevsky N.M., Sangepov B.Kh., Sinitsyn A.A., Barikhashvili V.R.* Decision support for monitoring atmospheric air quality in residential areas. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture, 2019. Iss. 2 (75). P. 206–214 (in Russian).
17. Theory of statistics: Textbook. Moscow: Infra, 2005. 476 p. (in Russian).
18. *Wubuli A., Xue F., Jiang D., Yao X., Upur H., Wushouer Q*. Socio-demographic predictors and distribution of pulmonary tuberculosis (TB) in Xinjiang, China: A spatial analysis. PLoS One, 2015. V. 10. P. 1−22.

УДК: 551.24:550.83 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-161-171**

В.В. Стогний[1], Г.А. Стогний[1]

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ МАКРОРЕЛЬЕФА ВЕРХОЯНО-КОЛЫМСКОЙ ОРОГЕННОЙ ОБЛАСТИ (НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ)

АННОТАЦИЯ

Верхояно-Колымская орогенная область является основным элементом морфоструктуры западной части Верхояно-Чукотской горной страны. Территория орогенной области охватывает Верхоянскую систему горных хребтов на западе, систему хребтов Черского и Момского на северо-востоке и хребет Сунтар-Хаята на юге. Приведены результаты спектрально-статистического анализа цифровых моделей современного рельефа Верхояно-Колымской орогенной области с различными радиусами осреднения и разделения гравитационного поля на разночастотные составляющие, отвечающие различным глубинным уровням литосферы, выполненные с целью выявления пространственных изменений геоморфологических и геофизических параметров орогенной области, а также условий формирования её горных сооружений.

Показано, что горным системам соответствуют линейные гравитационные минимумы, а Верхояно-Колымской положительной региональной аномалии низкочастотной составляющей рельефа — Верхоянский региональный гравитационный минимум амплитудой до 100 мГал и размером в поперечнике 1100−1200 км.

Для морфоструктуры Верхояно-Колымской орогенной области характерен прямой рельеф, что позволяет глубинное строение горных сооружений и их образование рассматривать в рамках соответствующих им складчатых структур. Горообразование Верхояно-Колымской орогенной области анализируется на базе предложенной модели её глубинного строения, а именно как результат гранитизации кристаллического фундамента и нижнего осадочного слоя под влиянием флюидов мантийной астенолинзы на глубине 45−120 км. Реоморфические процессы кристаллического фундамента обусловили становление гранитогнейсовых куполов и подъём горных хребтов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: орогенная область, цифровая модель, гравитационное поле, геоморфология

Valery V. Stogny[2], Galina A. Stogny[2]

POSSIBLE MECHANISM FOR FORMING MACRORELIEF OF VERKHOYANSK-KOLYMA OROGENIC REGION (BASED ON THE ANALYSIS OF GEOPHYSICAL FIELDS)

ABSTRACT

The Verkhoyansk-Kolyma orogenic region is the main element of the morphostructure of the Western part of the Verkhoyano-Chukotka mountain country. The territory of the orogenic region covers the Verkhoyansk system of mountain ranges in the West, the system of Chersky and Momsky ridges in the North-East and Suntar-Khayata ridge in the South. The results of

[1] Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, 350040, Краснодар, Россия; *e-mail:* **stogny_vv@mail.ru**

[2] Kuban State University, Stavropolskaya str., 149, 350040, Krasnodar, Russia; *e-mail:* **stogny_vv@mail.ru**

spectral-statistical analysis of the Verkhoyansk-Kolyma orogenic region relief digital models in the various radiuses averaging and separation of the gravitational field at different frequency components, corresponding to different depth levels of the lithosphere, is made to identify the spatial changes in geomorphological and geophysical parameters of the orogenic region, and also conditions of its mountain facilities formation.

It is shown that the mountain systems correspond to linear gravitational minima, and the Verkhoyano-Kolyma positive regional anomaly of the low-frequency component of the relief-Verkhoyansk regional gravitational minimum with an amplitude of up to 100 mGal and a diameter of 1100−1200 km.

The morphostructure of the Verkhoyansk-Kolyma orogenic region is characterized by a straight relief, which allows the deep structure of mountain structures and their formation to be considered within the framework of their corresponding folded structures. On the example of the Verkhoyansky meganticlinory deep structure, the model of the Verkhoyansky ridge formation is substantiated. Orogenesis of the Verkhoyansk-Kolyma orogenic region is considered on the basis of the proposed model of the deep structure, namely as a result of granitization of the crystalline basement and lower sedimentary layer under the influence of mantle fluids actinolite at depths of 45−120 km. Rheomorphic processes of the crystalline basement resulted in the formation granite-gneiss domes and the rise of mountain ranges.

KEYWORDS: orogenic region, digital model, gravitational field, geomorphology

ВВЕДЕНИЕ

Верхояно-Колымская орогенная область является основным элементом морфоструктуры западной части Верхояно-Чукотской горной страны. Территория орогенной области охватывает Верхоянскую систему горных хребтов на западе, систему хребтов Черского и Момского на северо-востоке и хребет Сунтар-Хаята на юге. Верхоянская система горных хребтов включает хребты Хараулахский, Верхоянский и Сетте-Дабан и представляет собой асимметричный свод с крутым западным и более пологим восточным крыльями [Тектоника …, 2001]. Хребты Черского и Момский разделены Момской и Верхнеселеняхской межгорными впадинами, а на северо-востоке эта горная система граничит с Зырянским предгорным прогибом.

Имеется несколько схем структурно-геоморфологического районирования Верхояно-Колымской орогенной области. Г.Ф. Уфимцев [1999] Верхояно-Колымскую орогенную область отнёс к возрожденному орогену, в пределах которого Верхоянская система горных хребтов представляет собой сводовое поднятие, а система хребтов Черского и Момского — сводово-глыбовую зону линейного коробления и тектонического скучивания. По Г.Э. Каскевич [2003], орогенной области соответствуют рамки Лено-Колымской горной страны, интерпретируемой как мегасвод первого порядка, включающий горные сооружения (Верхоянский, Черского) и разделяющую их Яно-Индигирскую редуцированную межгорную впадину; при этом Верхоянское горное сооружение объединяет Верхоянскую и Сунтар-Хаятинскую системы горных хребтов, а горное сооружение Черского рассматривается как асимметричный мегасвод второго порядка. В.Н. Смирнов [2012] хребты Верхоянский, Черского и Момский отнёс к Яно-Колымской орогенической системе, а хребты Сетте-Дабан и Сунтар-Хаята — к Охотско-Чукотской орогенической системе. Согласно [Новейшая тектоника …, 2000], границы Верхояно-Колымской орогенной области были оформлены в эоцене вследствие обрушения Верхояно-Чукотского протоорогенного свода с образованием системы впадин, а мощные восходящие тектонические движения, проявившиеся в конце плиоцена, способствовали формированию наблюдаемых ныне горных сооружений. По В.Б. Спектору с соавторами [2000], Верхояно-Колымская орогенная область в позднем мезозое и в кайнозое развивалась полициклически, проходя в течение цикла путь от

горного сооружения до выровненной поверхности; при этом снижение и выравнивание поверхностей хребтов происходило гл. обр. за счёт изостатического погружения и в меньшей степени за счёт экзарации и аккумуляции осадков.

С позиции тектоники плит, формирование горных хребтов Верхояно-Колымской орогенной области связывается с взаимодействием Евразийской и Северо-Американской литосферных плит и раскрытием Евразийского океанического бассейна в кайнозое; при этом чередование эпох сжатия и растяжения земной коры орогенной области объясняется изменением полюса вращения плит [Тектоника …, 2001]. Современная граница между Евразийской и Северо-Американской плитами проводится вдоль хребта Гаккеля и далее — вдоль хребта Черского [*Fujita et al.*, 1997; *Parfenov*, 1991].

Приведённый краткий обзор показывает существенные различия в подходах исследования проблемы условий горообразования. На современном этапе выявление региональных закономерностей современного рельефа Верхояно-Колымской орогенной области и механизма формирования макрорельефа этого региона с учётом строения литосферы и внутриплитной геодинамики актуально, что определило цель и задачи исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью выявления пространственных изменений геоморфологических и геофизических параметров Верхояно-Колымской орогенной области и условий формирования её горных сооружений выполнен спектрально-статистический анализ цифровых моделей современного рельефа с радиусами осреднения 5, 10, 20 и 45 км и разделение гравитационного поля на разночастотные составляющие, отвечающие различным (10, 20 и 50 км) глубинным уровням организации литосферы. Спектрально-статистический анализ цифровых моделей современного рельефа и разделение гравитационного поля на разночастотные составляющие проведён в пределах территории, ограниченной (120−126) − (152−162)° в.д., 58−72° с.ш. (рис. 1). Также анализировались данные Мировой Гравиметрической модели MGM2012 (электронный ресурс), гравиметрические карты в редукции Буге и Фая, а также изостатических аномалий Эри−Хейсанена.

При анализе закономерностей связи особенностей рельефа с характером геофизических полей Верхояно-Колымской орогенной области и отдельных его участков использовались топографические, геологические и гравиметрические карты м-ба от 1: 50 000 до 1: 1 000 000, а также региональные схемы теплового потока, изостазии, неотектонических движений и современной сейсмичности. Базовым геофизическим материалом при выявлении региональных глубинных неоднородностей литосферы служили материалы гравиметрических съёмок м-ба 1: 200 000, использовались также данные Интернет-ресурсов Мировых моделей гравитационного[1] и магнитного[2] полей. При интерпретации гравитационного поля с целью изучения структуры литосферы одним из наиболее эффективных подходов является разделение исследуемого поля на разночастотные составляющие с их дальнейшим анализом.

Гравитационное поле отражает главным образом современное тектоническое строение литосферы, поэтому результаты его интерпретации использовались как индикатор при разработке геодинамических моделей формирования Верхояно-Колымской орогенной области, в т.ч. при изучении роли глубинных факторов в формировании горных хребтов и впадин. Комплексная интерпретация имеющихся материалов включала

[1]World Gravity model. Электронный ресурс: http://bgi.obs-mip.fr/data-products/Grids-and-models/wgm2012 (дата обращения 15.12.2019)

[2]World Magnetic model. Электронный ресурс: https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/soft.shtml (дата обращения 15.12.2019)

методы анализа и синтеза исходных моделей. Итоговые синтетические модели базировалась на интерпретации полученных данных спектрально-статистической обработки гравиметрических и топографо-геодезических материалов и косвенных признаков (положительная аномалия геоида, повышенный тепловой поток Верхоянской аномалии, высокая рассеянная сейсмичность, изостатически скомпенсированная большая часть территории исследования).

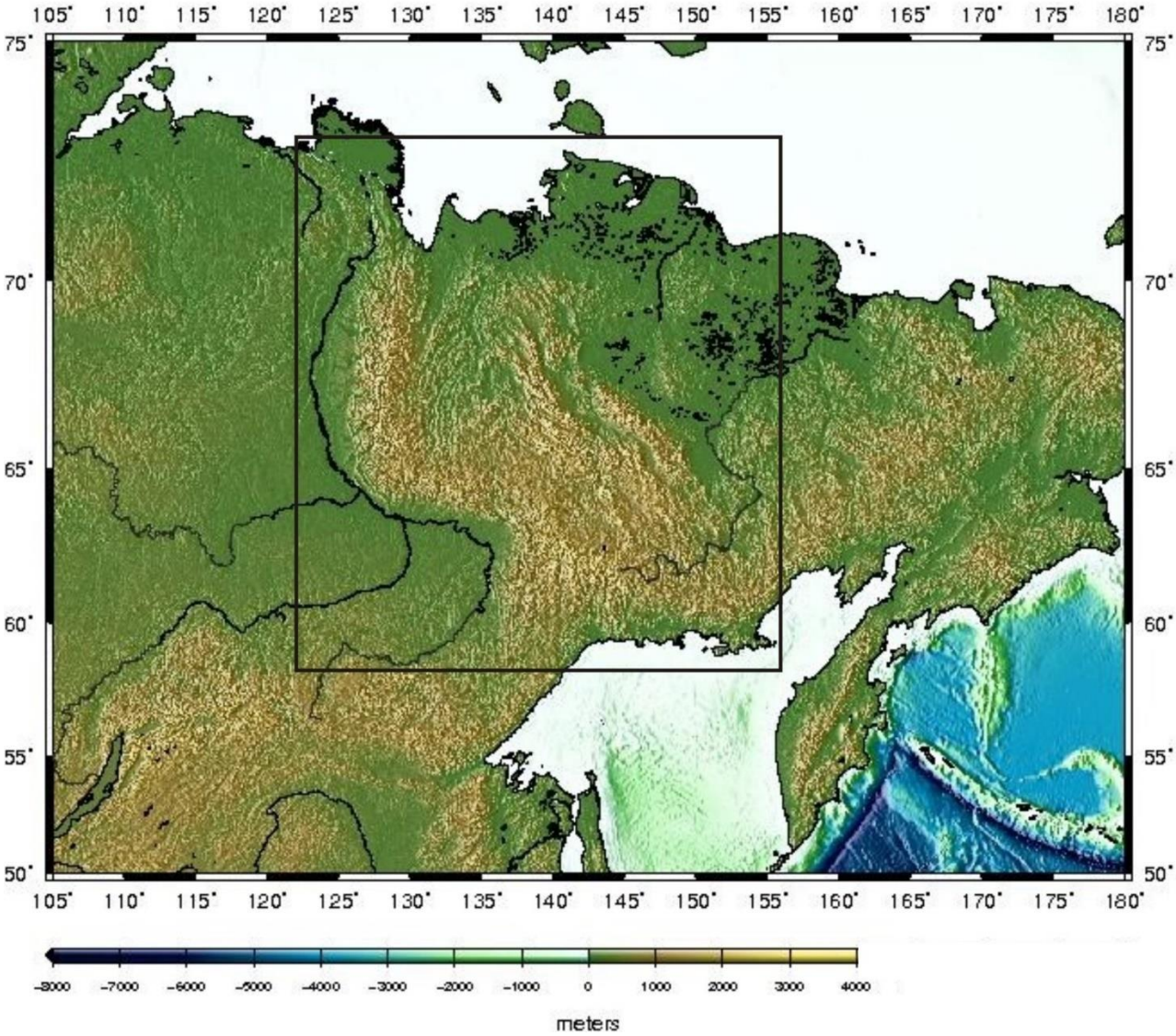


Рис. 1. Карта рельефа северо-востока России[1]. Прямоугольник — регион исследования
Fig. 1. Relief map of the North-East of Russia[1]. The rectangle is the region of study

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Верхояно-Колымской орогенной области в низкочастотной составляющей рельефа (рис. 2) соответствует одноименная положительная региональная аномалия, а в низкочастотной составляющей гравитационного поля (рис. 3) — Верхоянский региональный минимум. В соответствии с этим можно предположить, что и региональная

[1]World Gravity model. Электронный ресурс (Web resource): http://bgi.obs-mip.fr/data-products/Grids-and-models/wgm2012 (дата обращения (accessed) 15.12.2019)

составляющая гравитационного поля, отражающая верхнемантийный уровень литосферы, и низкочастотная составляющая рельефа, эпицентры минимума и максимума которых довольно близки, являются проявлением общих глубинных процессов. Мощность земной коры исследуемого региона изменяется от 30 до 45 км [*Mackey et al*., 1998]. Следует отметить, что Верхояно-Колымской орогенной области соответствует аномалия теплового потока, превышающая 60 мВт/м^2 при его фоновых значениях 45−50 мВт/м^2, закономерности которой ввиду немногочисленных определений теплового потока в её пределах пока не выявлены [*Балобаев*, 1991].

Предполагается, что положительная аномалия теплового потока обусловлена влиянием верхнемантийной (40−130 км) неоднородности, интерпретируемой как Верхоянская астенолинза [*Стогний, Стогний,* 2000], либо теплогенерацией коллизионных процессов [*Дучков, Соколова*, 2004].

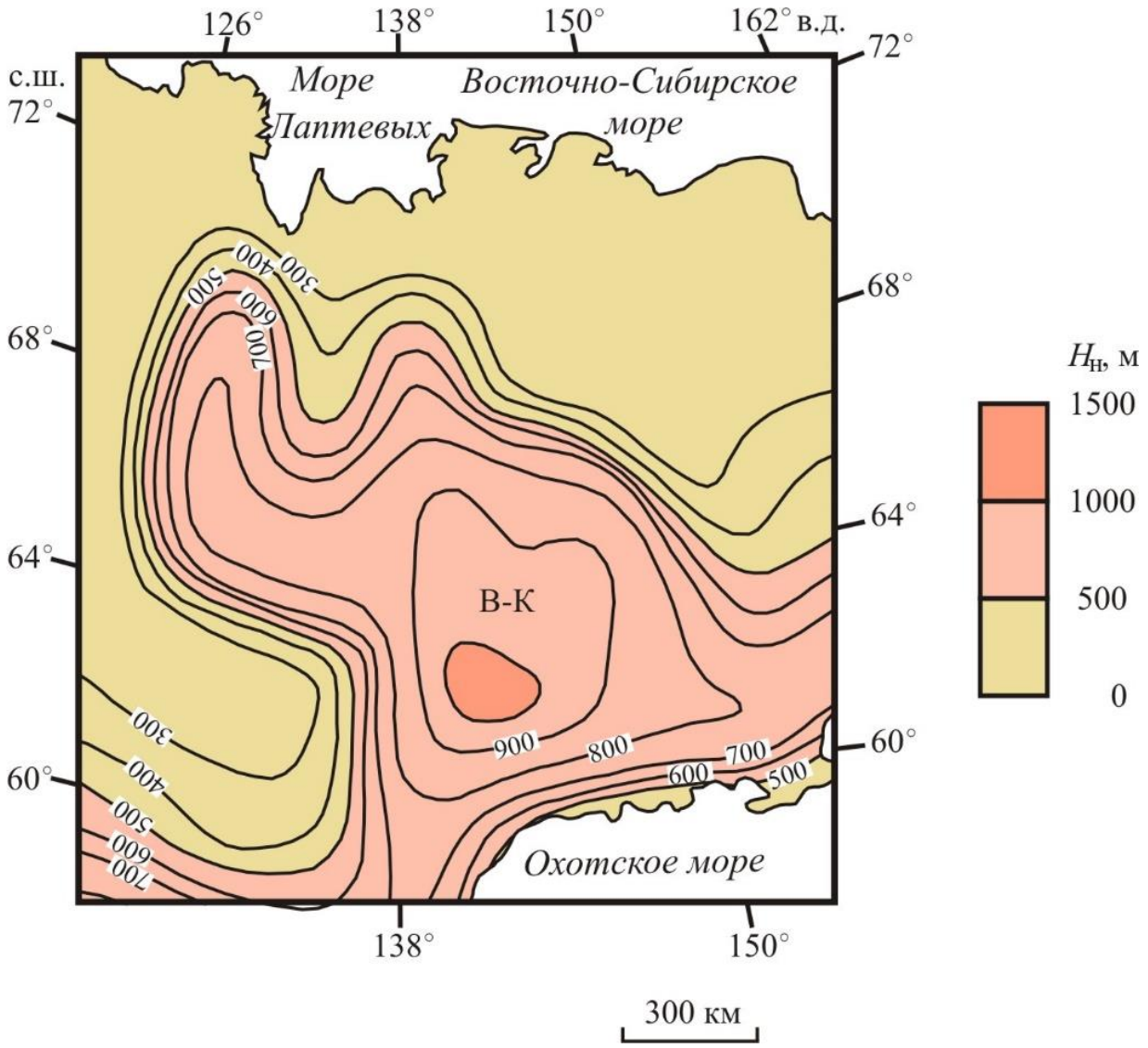


Рис. 2. Низкочастотная (радиус осреднения 50 км) составляющая рельефа Верхояно-Колымской орогенной области.
В-К — Верхояно-Колымский максимум рельефа
Fig. 2. Low-frequency (averaging radius of 50 km) component of the Verkhoyansk-Kolyma orogenic region relief.
V-K — Verkhoyano-Kolyma maximum relief

В структуре среднечастотной составляющей рельефа при радиусе осреднения 20 км (рис. 4) линейными максимумами проявляются горные хребты: Верхоянский, Черского, Момский и Сунтар-Хаята. Сетте-Дабанский горный хребет соответствует западной градиентной зоне Сунтар-Хаятинского максимума рельефа. Хребет Черского представлен двумя смещёнными в субширотном направлении сегментами. Северный сегмент имеет север-северо-западное простирание, а южный — северо-западное, аналогичное простиранию Момского хребта. Строение северной части Верхояно-Колымской орогенной области в общих чертах аналогично альпийскому двустороннему орогену по Коберу.

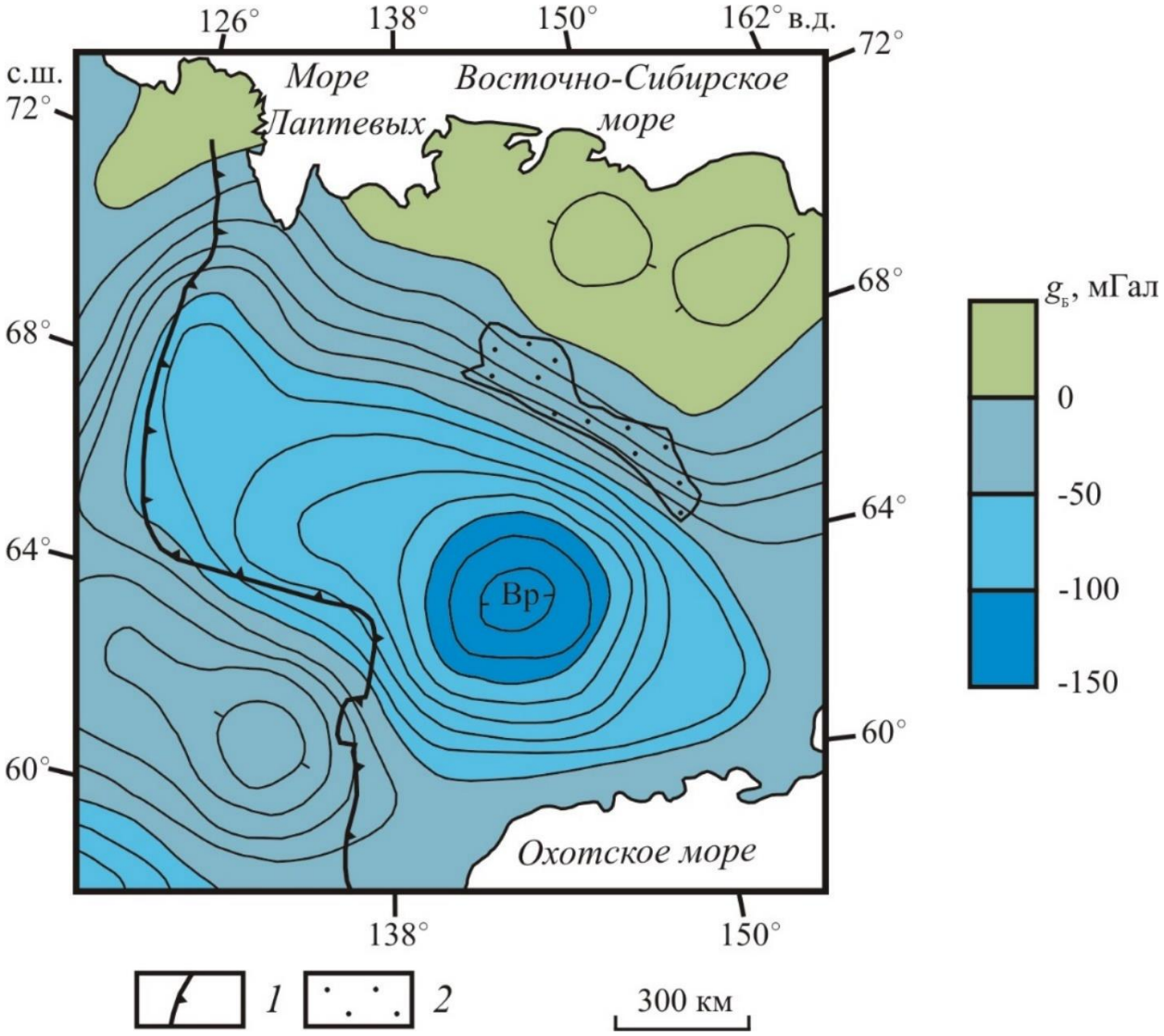


Рис. 3. Низкочастотная составляющая гравитационного поля Верхояно-Колымской орогенной области: 1 — граница Сибирской платформы с Верхояно-Колымской орогенной областью; 2 — Зырянская впадина. Вр — Верхоянская гравитационная аномалия

Fig. 3. The low-frequency component of the Verkhoyansk-Kolyma orogenic region gravitational field: 1 — the border of the Siberian platform with the Verkhoyan-Kolyma orogenic region; 2 — Zyryansk depression. Vr — Verkhoyansk gravitational anomaly

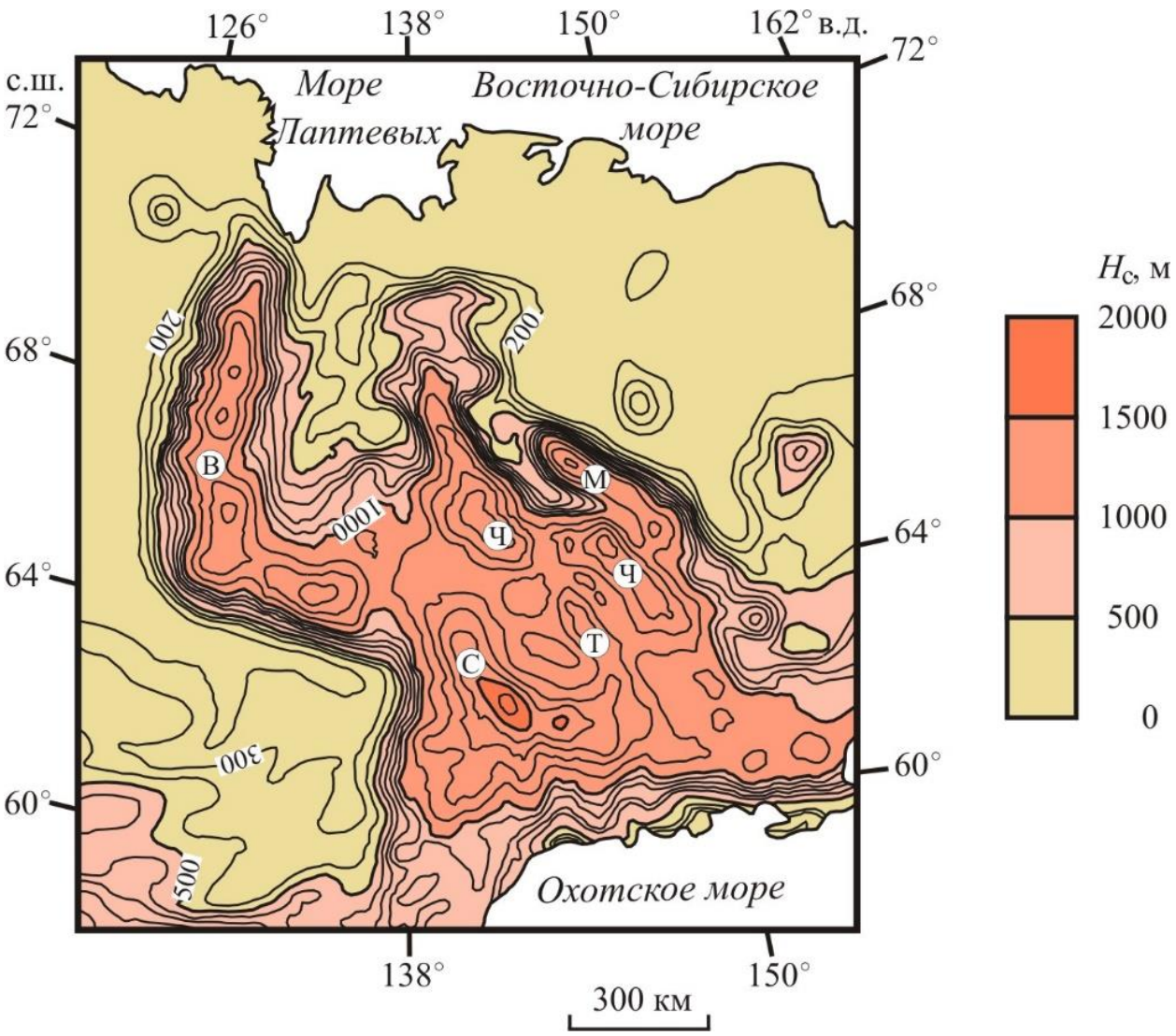


Рис. 4. Среднечастотная (радиус осреднения 20 км) составляющая рельефа Верхояно-Колымской орогенной области. Горные хребты: В — Верхоянский, М — Момский, С — Сунтар-Хаята, Т — Тас-Кыстабыт, Ч — Черского
Fig. 4. Mid-frequency (averaging radius of 20 km) component of the Verkhoyansk-Kolyma orogenic region relief. Mountain ranges: V — Verkhoyansk, M — Momsky, S — Suntar-Khayatinsky, T — Tas-Kystabyt, Ch — Chersky

В структуре среднечастотной составляющей гравитационного поля (рис. 5) Верхоянский хребет проявляется субдолготной линейной зоной пониженных значений, включающей локальные Хараулахский, Орулганский и Эчийский минимумы. Сунтар-Хаятинской горной системе в плане отвечает одноимённый гравитационный минимум. Северному и южному сегментам хребта Черского соответствуют Адычанский и Нерский гравитационные минимумы. Момский хребет не находит однозначного отражения в поле силы тяжести, северной его части соответствует локальный максимум, а южной — локальный минимум. Сопоставление структуры среднечастотной составляющей гравитационного поля и рельефа показывает, что крупным горным системам Верхояно-Колымской орогенной области соответствуют линейные гравитационные минимумы, интерпретируемые как зоны разуплотнения верхней части земной коры. С наличием разуплотнения в верхней части земной коры горных хребтов связано их современное

поднятие. Горные хребты Верхоянский, Черского, Сунтар-Хаятинский и Момский испытывают поднятия со скоростью от 2 до 4 мм/год [*Бочаров и др.*, 1982].

Для морфоструктуры Верхояно-Колымской орогенной области характерен прямой рельеф. Особенно наглядно это проявлено в пределах Верхоянского хребта, являющегося прямой унаследованной морфоструктурой Верхоянского мегаантиклинория, сложенного палеозойскими карбонатно-терригенными породами. Унаследованность морфоструктуры Верхояно-Колымской орогенной области от тектонических и геологических особенностей территории является благоприятным фактором оценки пространственных изменений геоморфологических и геофизических параметров орогенной области, а также условий формирования её горных сооружений.

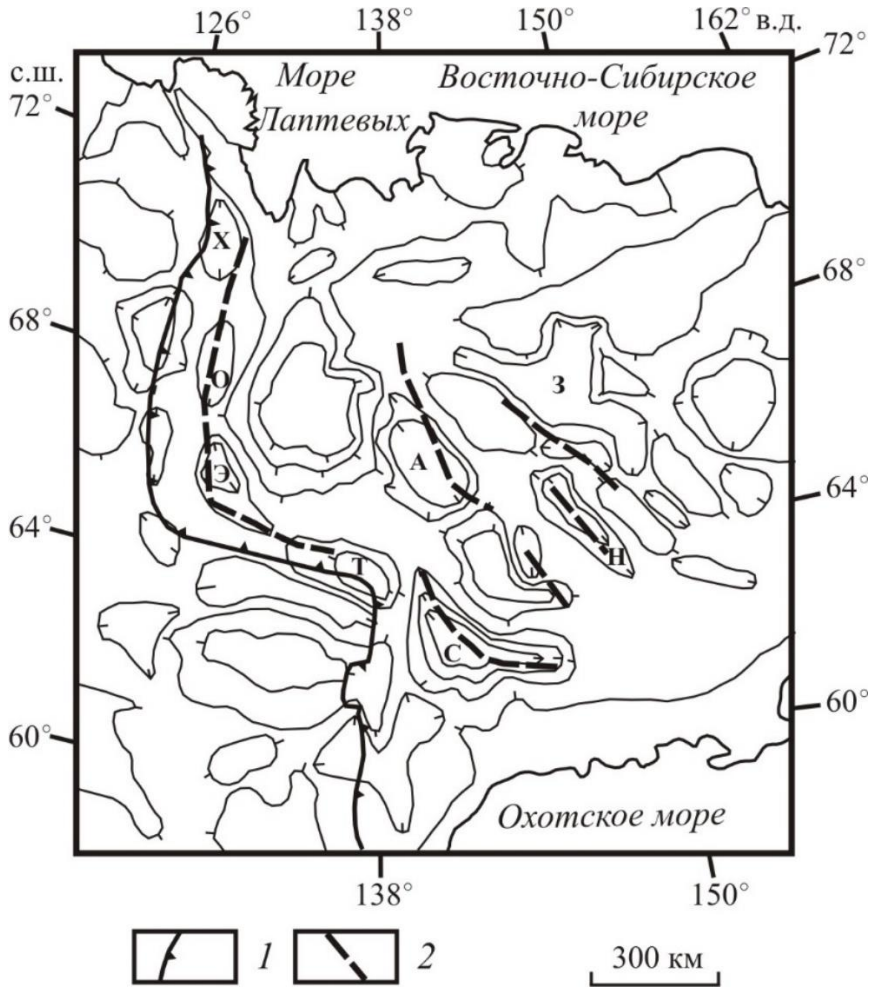


Рис. 5. Среднечастотная составляющая гравитационного поля Верхояно-Колымской орогенной области: 1 — граница Сибирской платформы с Верхояно-Колымской орогенной областью; 2 — оси среднечастотной составляющей горных систем. Гравитационные минимумы: А — Адычанский, З — Зырянский, Н — Нерский, О — Орулганский, С — Сунтар-Хаятинский, Э — Эчийский, Х — Хараулахский. Гравитационный максимум: Т — Томпонский

Fig. 5. The mid-frequency component of the gravitational field Verkhoyansk-Kolyma orogenic region: 1 — border of the Siberian platform with the Verkhoyan-Kolyma orogenic region; 2 — axis of the mid-frequency component of mountain systems. Gravity minima: A — Adychansky, Z — Zyryansky, N — Nersky, O — Orulgansky, S — Suntar-Khayatinsky, E — Echiy, Kh — Kharaulakhsky. Gravity maximum: T — Tomponsky

В работе [*Гриненко, Стогний,* 1992] показано, что Куранахский антиклинорий Верхоянского мегаантиклинория является «штамповой» структурой, сформированной на Эчийском гранитогнейсовом куполе консолидированной земной коры. С учётом предложенной модели глубинного строения земной коры Верхоянского хребта, его образование рассматривается как результат гранитизации в мезозойский тектоно-магматический этап кристаллического фундамента и нижнего осадочного слоя с формированием гранитогнейсовых куполов под влиянием флюидной составляющей Верхоянской астенолинзы. К региональным критериям выделения гранитогнейсовых куполов отнесены области проявления реоморфических процессов в верхней части кристаллического фундамента глубиной до 10 км, отражающиеся гравитационными минимумами амплитудой до 30 мГал и размером в поперечнике до 100 км [*Стогний, Стогний,* 2004].

Анализ пространственных изменений геоморфологических и геофизических параметров, а также данных по тепловому полю Верхояно-Колымской орогенной области позволяет связать горообразование с процессами глубинной внутриконтинентальной геодинамики. Таким фактором может быть наличие в литосфере на глубинах 40−120 км мантийной Верхоянской неоднородности пониженной плотности — астенолинзы [*Стогний, Стогний,* 2000]. При этом формирование Сунтар-Хаятинской горной системы, по нашему мнению, происходило под влиянием флюидной и термической составляющей центральной части данной неоднородности, что и обусловило её блоковую структуру. Происхождение горных хребтов Верхоянской системы и системы Черского связано с тектоническими напряжениями, создаваемыми в литосфере краевой частью Верхоянской астенолинзы. Исходя из предложенной модели строения литосферы, Верхояно-Колымскую орогенную область, в соответствии с классификацией И.П. Герасимова [1946], можно рассматривать как геотектуру.

ВЫВОДЫ

На основе спектрально-статистического анализа цифровых моделей современного рельефа Верхояно-Колымской орогенной области с различными радиусами осреднения и разночастотных составляющих гравитационного поля, отвечающих определённым глубинным уровням литосферы, выявлена связь между региональными геоморфологическими особенностями Верхояно-Колымской орогенной области и структурой гравитационного поля. Показано, что Верхояно-Колымской положительной региональной аномалии низкочастотной составляющей рельефа отвечает Верхоянский региональный гравитационный минимум амплитудой до 100 мГал размером в поперечнике до 1100−1200 км и региональная аномалия теплового потока, превышающая 60 мВт/м^2 при его фоновых значениях 45−50 мВт/м^2. В структуре среднечастотных составляющих рельефа и гравитационного поля крупным горным системам Верхояно-Колымской орогенной области соответствуют линейные гравитационные минимумы, интерпретируемые как зоны разуплотнения верхней части земной коры. Наличием разуплотнения в верхней части (10−20 км) земной коры горных хребтов объясняется их современное поднятие.

Для морфоструктуры Верхояно-Колымской орогенной области характерен прямой рельеф. Особенно наглядно это проявлено в пределах Верхоянского хребта, являющегося прямой унаследованной морфоструктурой Верхоянского мегаантиклинория. Унаследованность морфоструктуры Верхояно-Колымской орогенной области от тектонических и геологических особенностей территории является благоприятным фактором оценки пространственных изменений геоморфологических и геофизических параметров орогенной области, а также условий формирования её горных сооружений. Региональные закономерности пространственных изменений геоморфологических и геофизических параметров позволяют горообразование Верхояно-Колымской орогенной

области связать с процессами глубинной внутриконтинентальной геодинамики. К основным факторам горообразования следует отнести формирование гранитогнейсовых куполов в процессе гранитизации кристаллического фундамента и нижнего осадочного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Балобаев В.Т.* Геотермия мёрзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск: Наука, 1991. 193 с.
2. *Бочаров Г.В., Гусев Г.С., Есипова Л.В.* Карта современных движений территории Якутской АССР. Геотектоника, 1982. № 3. С. 60−63.
3. *Герасимов И.П.* Опыт геоморфологической интерпретации общей схемы строения СССР. Проблемы физической географии. М.-Л.: Издательство Академии наук СССР, 1946. Т. 12. С. 33−46.
4. *Гриненко В.С., Стогний Г.А.* О глубинном строении Куранахского антиклинория (Западное Верхоянье). Надвиги и шарьяжи платформенных и складчатых областей Сибири и Дальнего Востока и их металлогеническое значение. Иркутск, 1992. С. 98−99.
5. *Дучков А.Д., Соколова Л.С.* Геотермический атлас Сибири. Закономерности строения и эволюции геосфер: Материалы VI Международного междисциплинарного научного симпозиума. Хабаровск: ДВО РАН, 2004. С. 45−56.
6. *Каскевич Г.Э.* Принципы и приёмы структурно-геоморфологического районирования орогенных областей Восточной Якутии. Отечественная геология, 2003. № 6. С. 80−83.
7. Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии. М.: Пробел, 2000. 487 с.
8. *Смирнов В.Н.* Верхояно-Чукотская область новейшего горообразования: зональность и основные этапы формирования. Геология и геофизика, 2012. Т. 53. № 5. С. 610−620.
9. *Спектор В.Б., Бакулина Н.Т., Аносова Л.Н.* Плиоценовый цикл горообразования хребта Черского (Северо-Восток России). Тихоокеанская геология, 2000. № 2. С. 32−46.
10. *Стогний Г.А., Стогний В.В.* Гранитогнейсовые купола — рудоконтролирующие структуры Верхояно-Колымской орогенной области. Известия высших учебных заведений. Геология и разведка, 2004. № 4. С. 8−12.
11. *Стогний Г.А., Стогний В.В.* Строение литосферы Верхояно-Колымской орогенной области. Отечественная геология, 2000. № 5. С. 41−44.
12. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 571 с.
13. *Уфимцев Г.Ф.* Тектонический рельеф Евразии. Отечественная геология, 1999. № 2. С. 28–37.
14. *Fujita K., Stone D.B., Layer P.W., Parfenov L.M., Koz'min B.M.* Cooperative program helps decipher tectonics of northeastern Russia. EOS, 1997. V. 78. No 24. P. 252−253.
15. *Mackey K. G., Fujita K., Ruff L.J.* Crustal thickness of northeast Russia. Tectonophysics, 1998. V. 284. P. 283–297.
16. *Parfenov L.M.* Tectonics of the Verkhoyansk-Kolyma Mesozoides in the context of plate tectonics. Tectonophysics, 1991. V. 139. P. 319–342.

REFERENCES

1. *Balobaev V.T.* Geothermometry of Northern Asia lithosphere frozen zone. Novosibirsk: Nauka, 1991. 193 p. (in Russian).
2. *Bocharov G.V., Gusev G.S., Esipova L.V.* Map of modern movements of the Yakutian ASSR. Geotectonics, 1982. No 3. P. 60–63 (in Russian).
3. *Duchkov A.D., Sokolova L.S.* Geothermal Atlas of Siberia. Patterns of the structure and evolution of geospheres: Proceedings of the VI International interdisciplinary scientific symposium. Khabarovsk: FED RAS, 2004. P. 45–56 (in Russian).

4. *Fujita K., Stone D.B., Layer P.W., Parfenov L.M., Koz'min B.M.* Cooperative program helps decipher tectonics of northeastern Russia. EOS, 1997. V. 78. No 24. P. 252−253.
5. *Gerasimov I.P.* Experience of geomorphological interpretation of the general structure of the USSR. Problems of Physical Geography. Moscow-Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1946. V. 12. P. 33−46 (in Russian).
6. *Grinenko V.S., Stogny G.A.* On the deep structure of the Kuranakh anticlinorium (Western Verkhoyanie). Thrusts and shariajas of the platform and folded areas of Siberia and the Far East and their metallogenic significance. Irkutsk, 1992. P. 98–99 (in Russian).
7. *Kaskevich G.E.* Principles and methods of East Yakutia orogenic regions structural-geomorphological zoning. Otechestvennaya Geologiya (Domestic Geology), 2003. No 6. P. 80–83 (in Russian).
8. *Mackey K. G., Fujita K., Ruff L.J.* Crustal thickness of northeast Russia. Tectonophysics, 1998. V. 284. P. 283–297.
9. *Parfenov L.M.* Tectonics of the Verkhoyansk-Kolyma Mesozoides in the context of plate tectonics. Tectonophysics, 1991. V. 139. P. 319–342.
10. *Smirnov V.N.* Verkhoyan-Chukotka region of the latest mountain building: zoning and the main stages of formation. Russian Geology and Geophysics, 2012. V. 53. No 5. P. 610−620 (in Russian).
11. *Spector V.B., Bakulina N.T., Anosova L.N.* Pliocene mountain formation cycle of the Chersky ridge (North-East of Russia). Russian Journal of Pacific Geology, 2000. No 2. P. 32−46 (in Russian).
12. *Stogny G.A., Stogny V.V.* Granite gneiss domes — ore-controlling structures of the Verkhoyansk-Kolyma orogenic region. Proceedings of higher educational establishments. Geology and exploration, 2004. No 4. P. 8−12 (in Russian).
13. *Stogny G.A., Stogny V.V.* The structure of the Verkhoyansk-Kolyma orogenic region lithosphere. Otechestvennaya Geologiya (Domestic Geology), 2000. No. 5. P. 41−44 (in Russian).
14. Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia). Moscow: IAPC "Nauka/Interperiodica", 2001. 571 p. (in Russian).
15. The latest tectonics, geodynamics and seismicity of Northern Eurasia. Moscow: Probel, 2000. 487 p. (in Russian).
16. *Ufimtsev G.F.* Tectonic relief of Eurasia. Otechestvennaya Geologiya (Domestic Geology), 1999. No 2. P. 28–37.

УДК: 912.648+574.22+574.9 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-172-188**

Т.А. Автаева[1], А.В. Скрипчинский[2], Д.В. Иванов[3], Р.А. Суходольская[4]

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАРКЕРНЫХ ВИДОВ ЖУЖЕЛИЦ НА ОСНОВЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

АННОТАЦИЯ

Изменение климата и связанные с ним изменения природных экосистем являются важнейшими международными проблемами XXI в. В связи с этим моделирование динамики ареалов растений и животных на основе анализа их связей с климатическими параметрами и характеристиками среды становится актуальной задачей. Моделирование географического распространения видов невозможно без геоинформационного анализа, позволяющего выявить как границы факторов, влияющих на распространение вида, так и особенности его ареала.

В работе приводится авторское дополнение к существующей методике эколого-географического моделирования на основе ГИС-технологий, позволяющих визуализировать динамику ареалов в некотором промежутке времени и в связи с изменением биоклиматических параметров.

Моделирование пространственного распространения двух маркерных видов жужелиц даёт возможность экстраполировать фрагментарные данные о конкретных местонахождениях на значительные территории. Созданные геоинформационные модели прогнозируемых ареалов выявили их изменения по разным климатическим сценариям на 2050 и 2070 гг.

На основании эколого-геоинформационного моделирования было установлено, что на формирование современного ареала *Zabrus tenebrioides* оказывает значимое влияние средняя суточная амплитуда температуры за каждый месяц, максимальная температура наиболее тёплого месяца и минимальная температура наиболее холодного месяца. На распространение *Pterostichus oblongopunctatus* оказывают влияние средняя годовая температура, средняя суточная амплитуда температуры за каждый месяц, средняя температура наиболее сухого квартала, средняя температура самой тёплой четверти года и сумма осадков в самом сухом месяце года. Проведённый геоинформационный анализ позволил выявить зависимость количества точек находок видов и значений биоклиматических факторов, созданы карты и графики диапазона комфортности обитания видов. Выявлены основные тренды изменения ареала *Pterostichus oblongopunctatus* в условиях изменяющегося климата по «мягкому» и «жёсткому» сценариям. Под влиянием климатических изменений сокращается площадь ареалов и меняется их структура.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: биоклиматические параметры, ГИС-моделирование, пространственное распространение, маркерные виды жужелиц, геоинформационные системы

[1] Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук, Отдел биологических исследований, Старопромысловское ш., д. 21 А, 364051, Грозный, Чеченская Республика, Россия; *e-mail*: **avtaeva1971@mail.ru**

[2] Северо-Кавказский федеральный университет, Институт математики и естественных наук, ул. Пушкина, д. 1, 355009, Ставрополь, Россия; *e-mail:* **ron1975@list.ru**

[3] Институт проблем экологии и недропользования АН Республики Татарстан, ул. Даурская, 28420087, Казань, Россия; *e-mail*: **water-rf@mail.ru**

[4] Институт проблем экологии и недропользования АН Республики Татарстан, ул. Даурская, 28420087, Казань, Россия; *e-mail:* **sukhodolskayaraisa@gmail.com**

Tamara A. Avtaeva[1], **Andrey V. Skripchinsky**[2], **Dmitriy V. Ivanov**[3], **Raisa A. Sukhodolskaya**[4]

MODELING THE SPATIAL DISTRIBUTION OF MARKER SPECIES OF GROUND BEETLES BASED ON GIS TECHNOLOGIES

ABSTRACT

Climate change and related changes in natural ecosystems are the most important international issues of the twenty-first century. In this regard, modeling the dynamics of plant and animal habitats based on the analysis of their relationships with climate parameters and environmental characteristics becomes an urgent task. Modeling the geographical distribution of species is not possible without geoinformation analysis, which allows you to identify both the boundaries of factors that affect the distribution of the species, and the features of its range.

The paper presents the author's addition to the existing method of ecological and geographical modeling based on GIS technologies that allow to visualize the dynamics of areas in a certain period of time and in connection with changes in bioclimatic parameters.

Modeling the spatial distribution of two marker species of ground beetles makes it possible to extrapolate fragmentary data on specific locations over large territories. The created geoinformation models of the predicted areas revealed their changes for different climate scenarios for 2050 and 2070.

Based on ecological and geoinformation modeling, it was found that the formation of the modern range of *Zabrus tenebrioides* is significantly influenced by the average daily temperature amplitude for each month, the maximum temperature of the warmest month and the minimum temperature of the coldest month. The distribution of *Pterostichus oblongopunctatus* is influenced by the average annual temperature, the average daily temperature amplitude for each month, and the average temperature of the driest quarter; the average temperature of the warmest quarter of the year and the amount of precipitation in the driest month of the year. The geoinformation analysis made it possible to identify the dependence of the number of points of species finds and the values of bioclimatic factors. Maps and graphs of the range of species comfort were created. The main trends of changes in the range of *Pterostichus oblongopunctatus* under changing climate conditions in the "soft" and "hard" scenarios are revealed. Under the influence of climate change, the area of habitats is reduced and their structure is changed.

KEYWORDS: bioclimatic parameters, GIS modeling, spatial distribution, marker species of ground beetles, geoinformation system

ВВЕДЕНИЕ

Анализ закономерностей географического распространения биологических объектов является фундаментальной научной проблемой, которая тесно связана с историей формирования биосферы. В то же время исследования такого рода могут играть ключевую роль в прогнозировании динамических изменений экосистем в контексте глобальной и локальной эволюции природной среды. Познание этих закономерностей предоставляет возможности оценки перспектив дальнейшего существования видов и

[1] Kh.I. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Department of Biological Research, Staropromyslovskoe Hwy, 21A, Grozny, Chechen Republic, Russia; *e-mail:* **avtaeva1971@mail.ru**

[2] North Caucasus Federal University, Institute of Mathematics and Natural Sciences, Pushkin str., 1, 355009, Stavropol, Russia; *e-mail:* **ron1975@list.ru**

[3] Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, Daurskaya str., Kazan, Russia; *e-mail*: **water-rf@mail.ru**

[4] Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, Daurskaya str., Kazan, Russia; e-mail: **sukhodolskayaraisa@gmail.com**

типов биоценозов, а также характера их ареалов под влиянием различных факторов. В настоящее время в связи с разработкой новых методов появилась возможность моделирования динамики ареалов видов растений и животных на основе анализа связей с климатическими параметрами, геосистемными характеристиками и структурой основных местообитаний [*Guisan, Zimmermann,* 2000; *Douma et al.,* 2012 и др.]. Ряд моделей также охватывает особенности распространения видов в зависимости от условий природопользования и инвазионных характеристик [*Guisan, Thuiller,* 2005]. В современных исследованиях большое внимание уделяется моделированию географического распространения биологических видов методом максимальной энтропии на базе программного пакета MaxEnt [*Phillips, Dudik,* 2008].

Распространение видов, как и сообществ живых организмов, в значительной степени определяется их экологическими потребностями и особенностями пространственного распределения важнейших лимитирующих их распространение факторов среды по земной поверхности. Основными зональными экологическими факторами, лимитирующими распространение биологических объектов, являются прежде всего климатические факторы среды: температура, свет, влажность.

Методы экологического моделирования позволяют выделить области, подходящие по своим климатическим характеристикам для обитания вида как в прошлом, так и настоящем. Моделирование будущего распространения необходимо с точки зрения прогноза состояния вида в контексте глобальных изменений климата и ландшафтов. Географическая составляющая экологических моделей реализуется через данные распространения видов и климатических характеристик в виде полей непрерывного распространения.

В последние годы проводится всё больше исследований по данной тематике, как зарубежными исследователями, так и отечественными. Анализ зарубежных источников литературы позволяет заключить, что в настоящее время накоплен значительный опыт моделирования как потенциальных мест обитания видов в настоящее время, так и прогнозных ареалов с учётом различных климатических сценариев [*Yang et al.,* 2013; *Aili et al.,* 2017; *Huyong et al.,* 2020]. В ряде работ приводятся оригинальные картографические модели, иллюстрирующие пространственную трансформацию центроидов экологической пригодности территории в зависимости от сценариев изменения климата [*Portilla Cabrera, Selvaraj,* 2020; *Yuanjun et al.,* 2018].

Ряд работ российских учёных посвящен исследованию пространственного распространения как растительных организмов, так и животных, причём как массовых, так и узкоспециализированных [*Yuanjun et al.,* 2018; *Zhang et al.,* 2019; *Дудов,* 2016; *Рахматуллина и др.,* 2017; *Болотов, Фролов,* 2015].

Существует ряд учебных пособий, в которых авторы приводят подробные инструкции, позволяющие применять ГИС-технологии в экологических исследованиях. Среди них можно выделить пособия, подготовленные и изданные коллегами в Санкт-Петербурге и Томске. В методическом пособии «Биоклиматическое моделирование»[1] детально описываются этапы подготовки данных как для программного продукта MaxEnt, так и для DIVA-GIS, моделирования, оценки и визуализации полученных данных. Геоинформационная система DIVA-GIS используется для анализа данных биоразнообразия и имеет ограниченный функционал пространственного анализа.

В работе Афонина, Соколовой (2018)[2] значительная часть пособия посвящена теоретическим основам геоинформационных технологий и эколого-географического

[1] *Олонова М.В., Гудкова П.Д.* Биоклиматическое моделирование: задания для практической работы и методические указания к их выполнению. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2017. 50 с.

[2] *Афонин А.Н., Соколова Ю.В.* Эколого-географический анализ и моделирование распространения биологических объектов с использованием ГИС. Учебное пособие (Практикум). СПб: ВВМ, 2018. 121 с.

анализа и моделирования. В практикуме авторами детально рассматриваются особенности технологии работы с QGIS. Данное пособие рассчитано на людей, не имеющих навыков работы с геоинформационными системами.

Таким образом, в современной науке широкое распространение получило моделирование пространственного распространения видов, позволяющее установить связь местонахождений видов в природе и факторов окружающей среды и прогнозировать таким образом распространение видов. В связи с этим активизация исследований в этом направлении на территории России имеет первостепенное значение. Целью нашего исследования является интерпретация, апробация и внедрение существующей методики применительно к насекомым (на примере жуков-жужелиц).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для моделирования пространственного распределения были выбраны 2 массовых вида жужелиц (*Coleoptera, Carabidae*): *Zabrus tenebrioides* и *Pterostichus oblongopunctatus*.

Zabrus tenebrioides — опасный вредитель зерновых культур, который способен нанести большой урон посевам ячменя, пшеницы, ржи, кукурузы. Вредят как сами жуки, так и их личинки. В работе нами сделана попытка провести анализ распространения хлебной жужелицы в пространстве экологических факторов среды и выявить основные лимитирующие факторы, а также сформулировать закономерности распространения данного вида. На материале собственных полевых сборов, данных базы Global Biodiversity Information Facility (GBIF)[1] и анализе литературных источников получено 279 точек обитания хлебной жужелицы.

Pterostichus oblongopunctatus (Fabricius, 1787) — транспалеарктический вид, распространённый от Северной и Центральной Европы до Кавказа и Сибири на восток до Japan [*Kryzhanovskij et al.,* 1995; *Hurka,* 1996; *Bousquet,* 2003]. Это один из обычных лесных видов жужелиц на юге лесной, в лесостепной и на севере степной зон Евразии. На юге ареала он достоверно увеличивает численность в условиях 40–100 % сомкнутости крон деревьев, на суглинистых почвах, при средних уровнях минерализации почвенного раствора. Встречаемость вида в лесных экосистемах степной зоны Украины — 19,5 % всех обследованных лесных экосистем региона [*Brygadyrenko,* 2016].

В процессе эколого-географического моделирования можно выделить три этапа: сбор информации о распространении видов, моделирование и геоинформационный анализ полученных результатов. Технология выполнения моделирования пространственного распределения изученных видов включала ряд шагов:

I. *Сбор информации.*

1. Сбор данных по точкам из открытой глобальной базы GBIF по результатам полевых сборов и литературным данным. Чем больше точек, тем точнее модель. Особое внимание важно обратить на точность координат.
2. Формирование базы данных в программе Excel и перевод её в формат csv.

II. *Моделирование.*

3. Моделирование в MaxEnt по разным климатическим сценариям. Выявление наиболее значимых для данного вида факторов. Моделирование по значимым факторам.

III. *Геоинформационный анализ.*

4. Создание точечного слоя на основе растра.
5. На основании полученного точечного слоя были построены полигоны, отражающие диапазон комфортности обитания данного вида.
6. Совмещение полигонального слоя диапазонов комфортности обитания вида с точками находок и определение их количества.
7. Построение карт по наиболее значимым биоклиматическим параметрам и

[1] GBIF.org (14 August 2018) GBIF Occurrence Download https://doi.org/10.15468/dl.example-donotcite

графиков, отражающих зависимость значений фактора от количества точек присутствия вида.

8. Построение карт прогнозируемых ареалов по климатическим сценариям и расчёт их площади.

На этапе сбора информации использовались данные из открытой базы данных GBIF, литературные данные и собственные полевые сборы. На данном этапе очень важен объём точек присутствия вида и их качество [*Санданов,* 2019]. В нашей работе производилась проверка исходных точек нахождения видов в программе Google Earth Pro, путем создания точечного слоя из текстового файла. В последствие точки присутствия были переведены в формат *.kml и визуализированы (рис. 1). За счёт такой проверки были выявлены ошибки в координатах точек, за счет их ручного ввода.

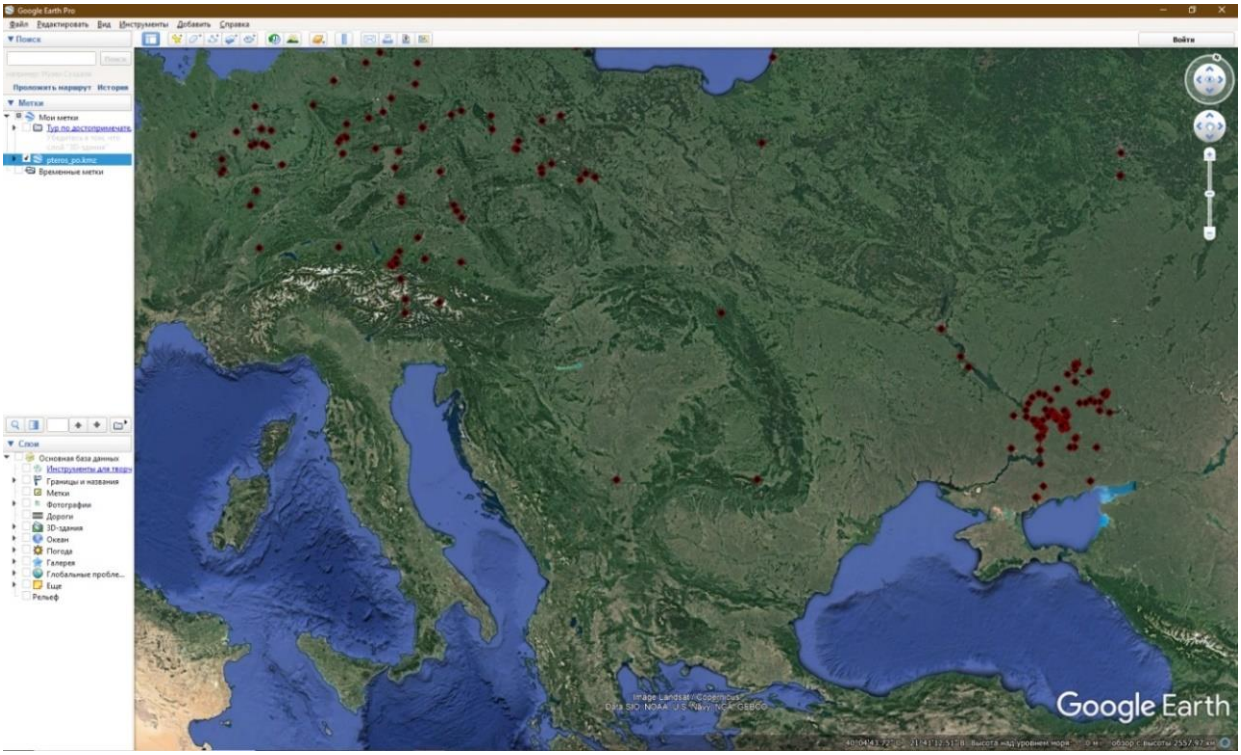


Рис. 1. Проверка пространственного расположения точек в программе Google Earth Pro
Fig. 1. Check the spatial location of the points in the program Google Earth Pro

На этапе моделирования в программе MaxEnt мы останавливаться не будем, поскольку особенности работы с ней описаны подробно в литературе. Более подробно рассмотрим методику геоинформационного анализа результатов моделирования, базирующиеся на программном обеспечении QGIS.

При моделировании нами использованы программа MaxEnt 3.4.1. и климатические данные WorldClim[1], полученные путём интерполяции среднемесячных климатических данных метеостанций планеты. Они представляют собой набор растровых изображений (GRID), в каждой ячейке которых содержится информация о том или ином климатическом показателе.

В качестве переменных при моделировании использовали 19 «биоклиматических» показателей (БКП) из базы WorldClim с пространственным разрешением 30 секунд (~ 1 км [2]).

[1] WorldClim — Global Climate Data. Free climate data for ecological modeling and GIS. Электронный ресурс: www.worldclim.org (дата обращения 24.10.2019)

Для анализа изменения ареала *P. oblongopunctatus* использованы биоклиматические данные за 1960–1990 гг. (version 1.4 WorldClim), биоклиматические данные за 1970–2000 гг. (version 2 WorldClim), а также два сценария «низких эмиссий» RCP 2.6 и «высоких эмиссий» RCP 8.5 из четырёх прогнозных сценариев RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5, получивших название «representative concentrations pathways». При моделировании нами были использованы 19 «биоклиматических показателей» из базы WorldClim.

Полученные данные в виде растровых моделей в формате *.asc были экспортированы в формат *.GeoTiff. В дальнейшем растры были преобразованы в точечный слой, имеющий несколько миллионов объектов, с использованием инструментов Saga. На основании точечного слоя создавался полигональный слой с использованием модуля Contur. Нами выбирались диапазоны комфортности обитания с шагом 0,1, что позволило создавать детальные карты (рис. 2).

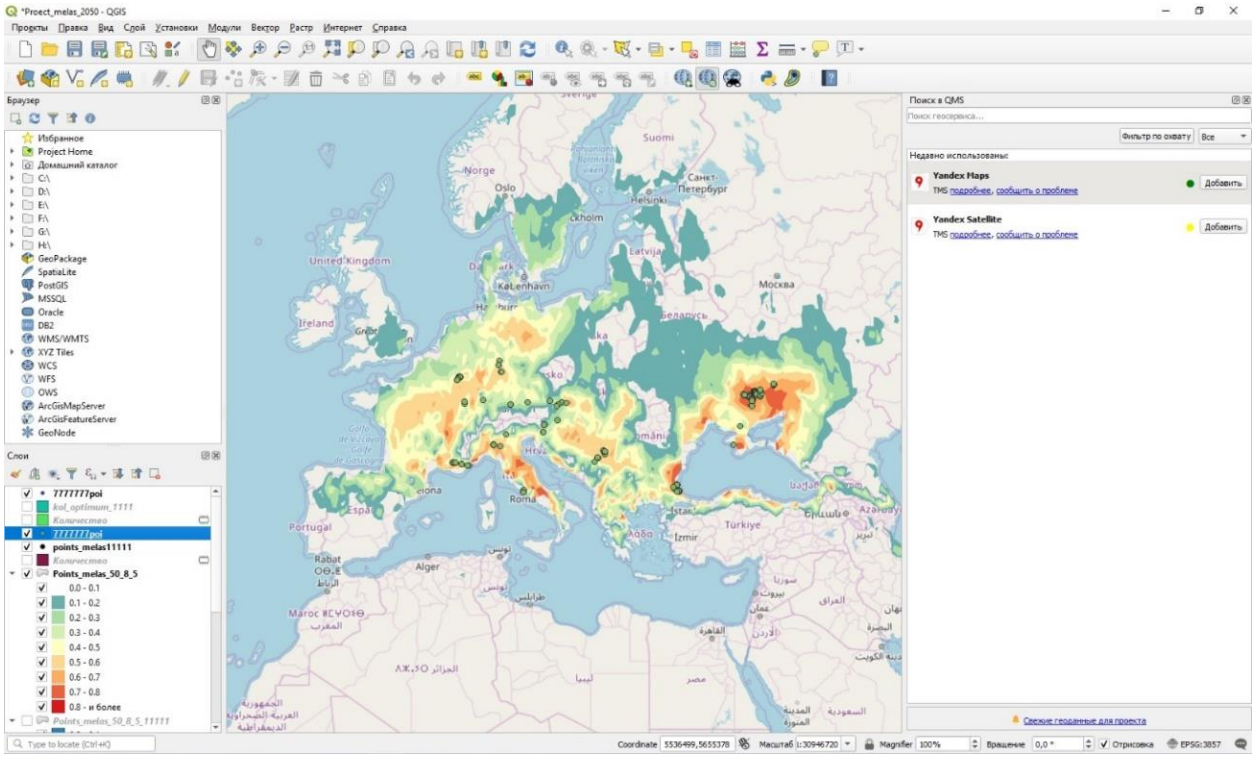
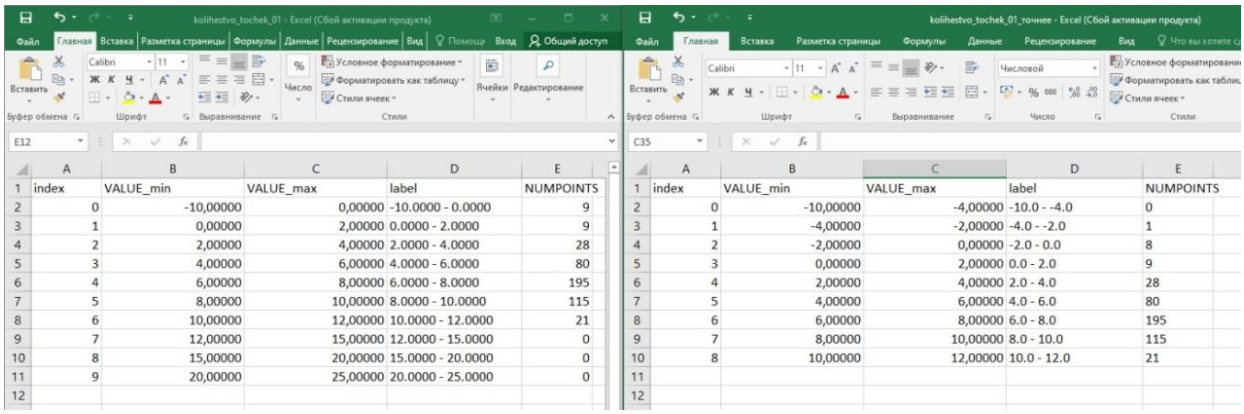


Рис. 2. Полигональный слой в QGIS с диапазоном комфортности обитания
Fig. 2. Polygon layer in QGIS with a range of comfort

Следующим этапом анализа явилось совмещение точек находок вида с созданными диапазонами комфортности. Для подсчёта количества точек в полигонах нами использовался инструмент анализа в QGIS. В дальнейшем в программе Excel мы работали с файлом в формате *.dbf из созданного нами *.shp файла.

При создании карт по наиболее значимым биоклиматическим параметрам использовалась технология, описанная выше. Для уточнения создаваемых карт использовался алгоритм, позволяющий уточнять значения климатических факторов. Суть его заключается в следующем. Созданные нами диапазоны значений климатических факторов не всегда были корректными, поскольку заранее «предугадать» значения факторов не представляется возможным. Количество точек находок вида не всегда находилось в указанных нами диапазонах. После первичного построения диапазонов нами производилась их корректировка и строились графики, отражающие связь наиболее точных значений фактора от количества находок вида (рис. 3).



index	VALUE_min	VALUE_max	label	NUMPOINTS
0	-10,00000	0,00000	-10.0000 - 0.0000	9
1	0,00000	2,00000	0.0000 - 2.0000	9
2	2,00000	4,00000	2.0000 - 4.0000	28
3	4,00000	6,00000	4.0000 - 6.0000	80
4	6,00000	8,00000	6.0000 - 8.0000	195
5	8,00000	10,00000	8.0000 - 10.0000	115
6	10,00000	12,00000	10.0000 - 12.0000	21
7	12,00000	15,00000	12.0000 - 15.0000	0
8	15,00000	20,00000	15.0000 - 20.0000	0
9	20,00000	25,00000	20.0000 - 25.0000	0

а

index	VALUE_min	VALUE_max	label	NUMPOINTS
0	-10,00000	-4,00000	-10.0 - -4.0	0
1	-4,00000	-2,00000	-4.0 - -2.0	1
2	-2,00000	0,00000	-2.0 - 0.0	8
3	0,00000	2,00000	0.0 - 2.0	9
4	2,00000	4,00000	2.0 - 4.0	28
5	4,00000	6,00000	4.0 - 6.0	80
6	6,00000	8,00000	6.0 - 8.0	195
7	8,00000	10,00000	8.0 - 10.0	115
8	10,00000	12,00000	10.0 - 12.0	21

б

Рис. 3. Рассчитанные диапазоны значений фактора и количество точек находок вида: а — исходное; б — с учётом корректировки

Fig. 3. The calculated ranges of the factor values and the number of points of finds of the species: a — the original; b — taking into account the adjustment

В программе QGIS по данным, полученным по каждому климатическому сценарию, строили ареалы видов по прогнозу на 2050 и 2070 гг. в связи с изменением климата. Для этого использовали два пороговых значения — верхнее значение равно 1, а нижнее пороговое значение соответствует пороговому значению для 10 процентилей обучающей выборки (указано в таблице пороговых значений программы MaxEnt).

С использованием модуля Contour были построены полигоны, где минимальным явилось значение для 10 процентилей и максимальное значение 1. Таким образом, были созданы ареалы 2000, 2050 и 2070 гг. Впоследствии для их анализа были рассчитаны их площади и построены карты с использованием различных растровых картографических подложек модуля QuickMapServices.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методом максимальной энтропии в программе MaxEnt были получены карты наиболее вероятных областей распространения *Zabrus tenebrioides* и *Pterostichus oblongopunctatus*. Выявлены наиболее значимые абиотические факторы, играющие решающую роль в распространении обоих видов.

Так, было установлено, что на формирование современного ареала *Zabrus tenebrioides* влияет средняя годовая температура воздуха (42,6 %), средняя суточная амплитуда температуры за каждый месяц, максимальная температура наиболее тёплого месяца и минимальная температура наиболее холодного месяца. Температура почвы тесно связана с температурой воздуха и её понижение до -3 С° ограничивает распространение жуков. Одним из определяющих факторов является сумма активных температур. Чтобы проследить эту зависимость нами был использован растровый слой суммы активных температур[1] и слой с точками находок (рис. 4).

Основное количество точек находок вида размещается в зоне континентального климата, где суммы эффективных температур лежат в диапазоне 2907−3634 °С. Часть точек размещается в прибрежной зоне с характерным морским климатом. Диапазон суммы эффективных температур лежит в пределах от 4360 до 5087 °С. Возможно, что более высокие суммы эффективных температур компенсируются за счёт повышенной влажности.

[1] O-GIS. Электронный ресурс: http://app.o-gis.org/o-gis/web/app.php/ (дата обращения 10.09.2019)

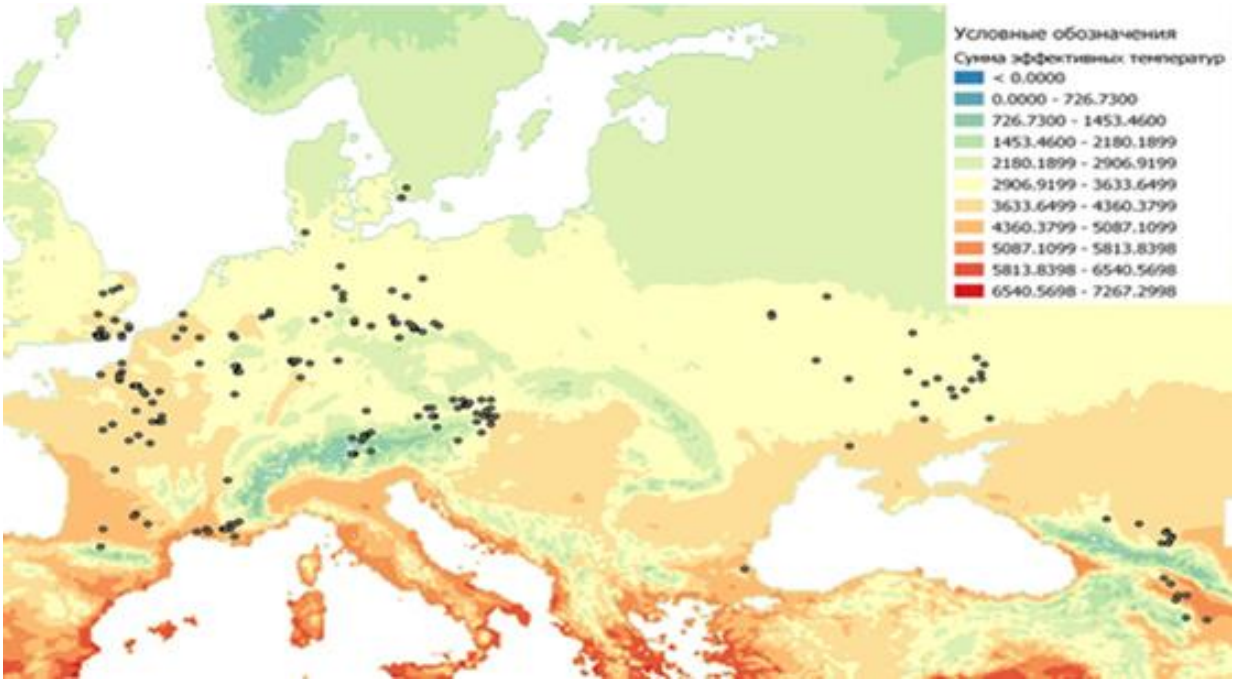


Рис. 4. Зависимость пространственного распределения хлебной жужелицы от суммы активных температур
Fig. 4. The dependence of the spatial distribution of bread ground beetles on the sum of active temperatures

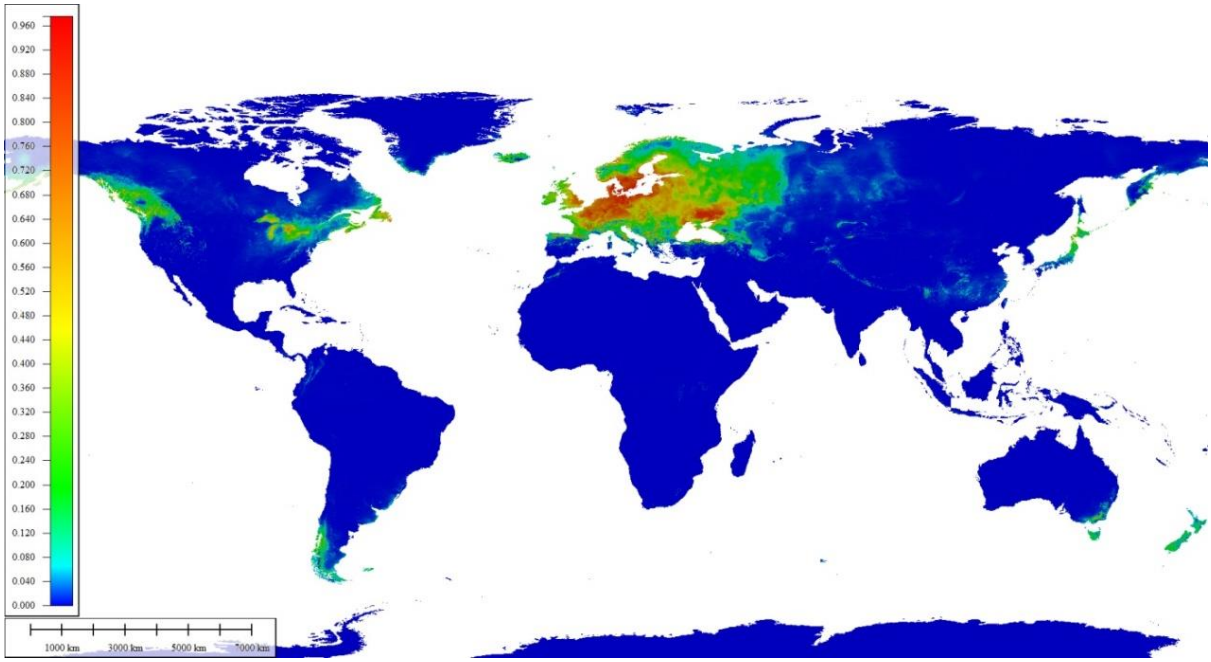


Рис. 5. Карта потенциального распространения P. oblongopunctatus.
Цветовая шкала диапазона комфортности обитания:
красный и оранжевый — наиболее благоприятные территории обитания (0.96−0.64);
жёлтый и зелёный — благоприятные территории (0.60−0.16);
голубой – менее благоприятные (0.16−0.04); синий — неблагоприятные (0.3−0)
Fig. 5. Map of the potential distribution of P. oblongopunctatus.
Color scale of the range of habitability: red and orange — the most favorable habitat areas (0.96−0.64); yellow and green — favorable territories (0.60−0.16);
dusty blue — less favorable (0.16−0.04); dark blue — unfavorable (0.3−0)

Границы современного ареала *Zabrus tenebrioides* согласуются с данными литературных источников. Наиболее оптимальные климатические условия для вида отмечены в западной и центральной Европе, в районе восточных берегов Северной Америки, в центральной и восточной части Южной Америки, центральной Африке, в юго-восточной части Австралии, западном и южном Китае, центральной России, Белоруссии, Украине, Казахстане, Иране, Туркмении, Узбекистане (70−90 %) (рис. 5).

Наибольшее влияние на современное распространение *Pterostichus oblongopunctatus* оказывают средняя годовая температура, средняя суточная амплитуда температуры за каждый месяц, средняя температура наиболее сухого квартала, средняя температура самой тёплой четверти года и сумма осадков в самом сухом месяце года.

Важным показателем надежности модели является Area Under the Curve (AUC), который составил 0,975. Полученная нами модель распространения *P. oblongopunctatus* соответствует современным представлениям о границах ареала данного вида.

По данным точечного слоя построены полигоны, отражающие диапазон значений наиболее значимых факторов, влияющих на распространение данного вида. Визуализация диапазона значений фактора и точек находок позволяет выявить наиболее благоприятные для вида значения (рис. 6, 7, 8).

Для каждого фактора из таблицы атрибутов был произведен расчёт количества точек находок вида в полигонах. Так, при анализе среднегодовой температуры большинство точек местообитания расположены в пределах от 4 до 10° (390 из 510 точек). Вероятно, это оптимальная среднегодовая температура для данного вида.

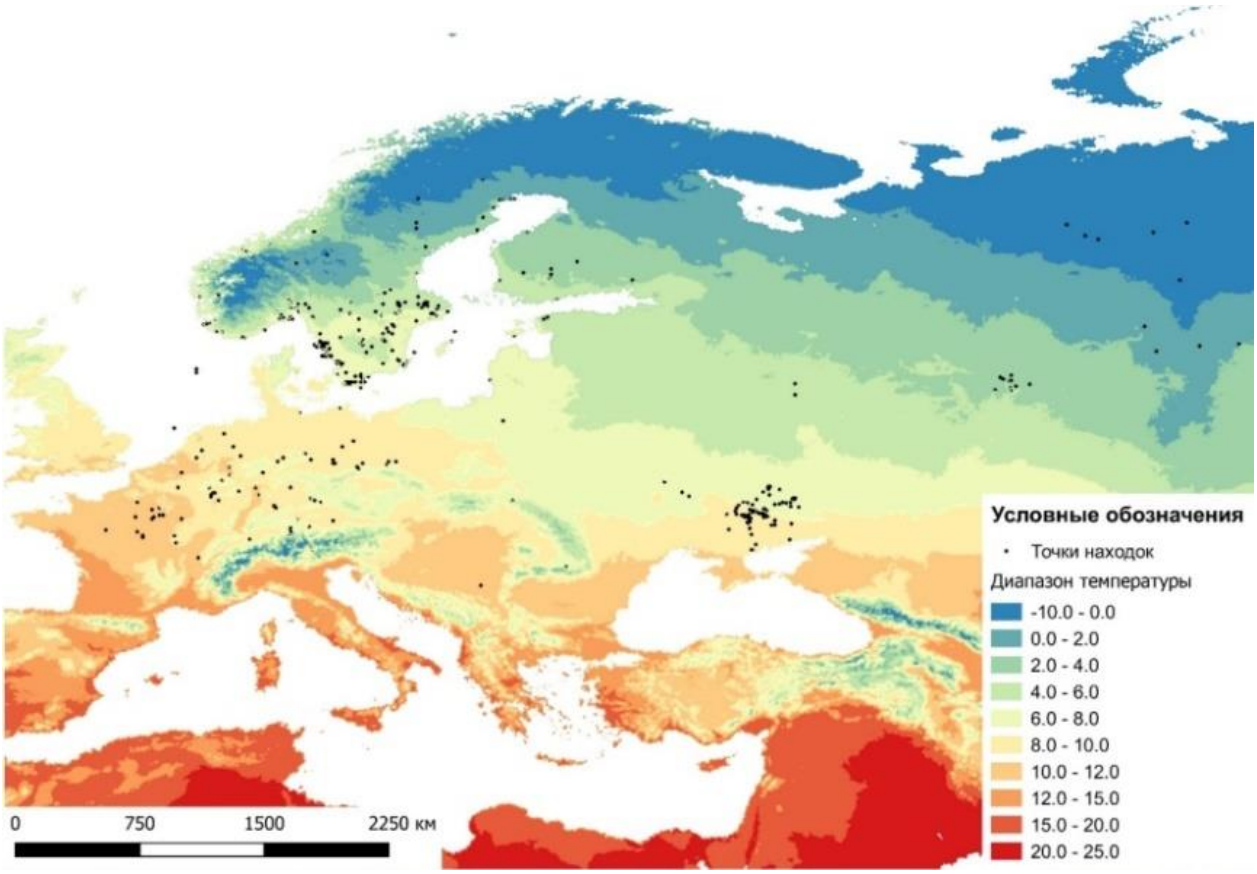


Рис. 6. Диапазоны среднегодовой температуры и точки находок
Fig. 6. Ranges of average annual temperature and points of finds

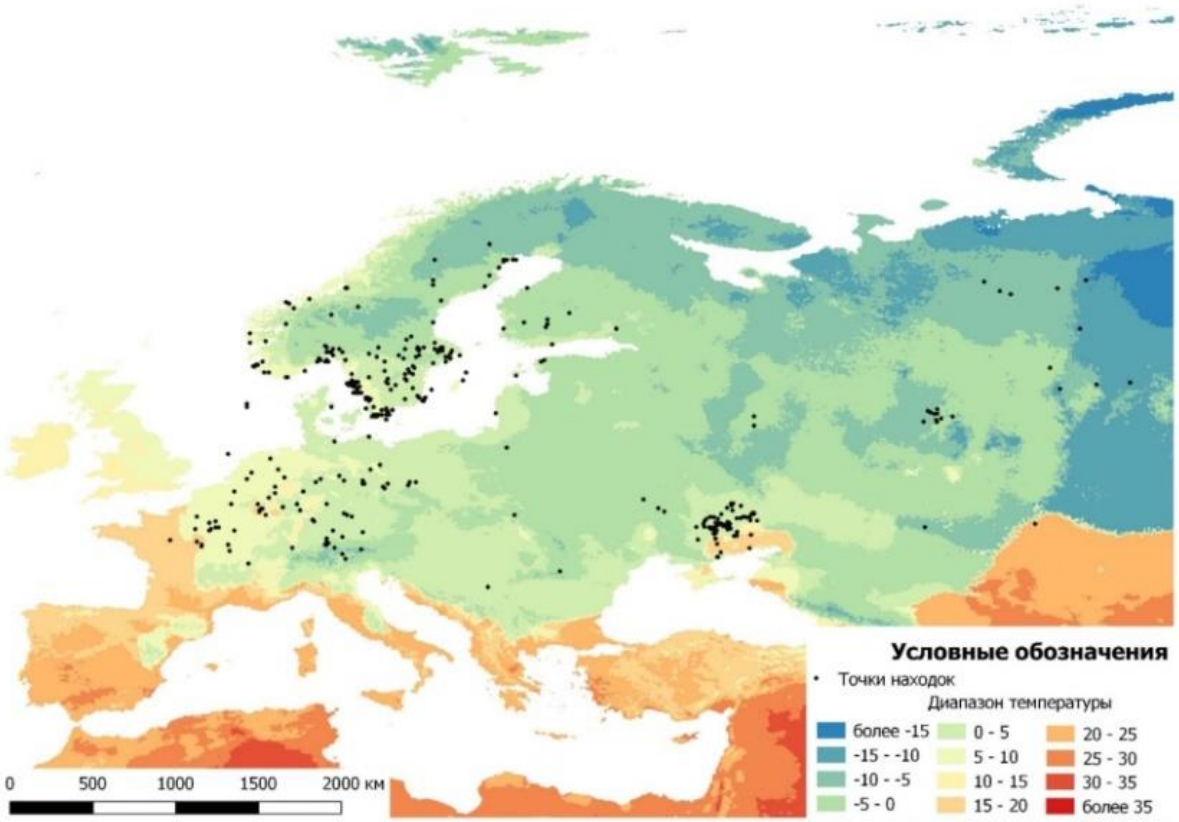


Рис. 7. Диапазоны температуры самого холодного квартала и точки находок
Fig. 7. Temperature range of the coldest quarter and points of finds

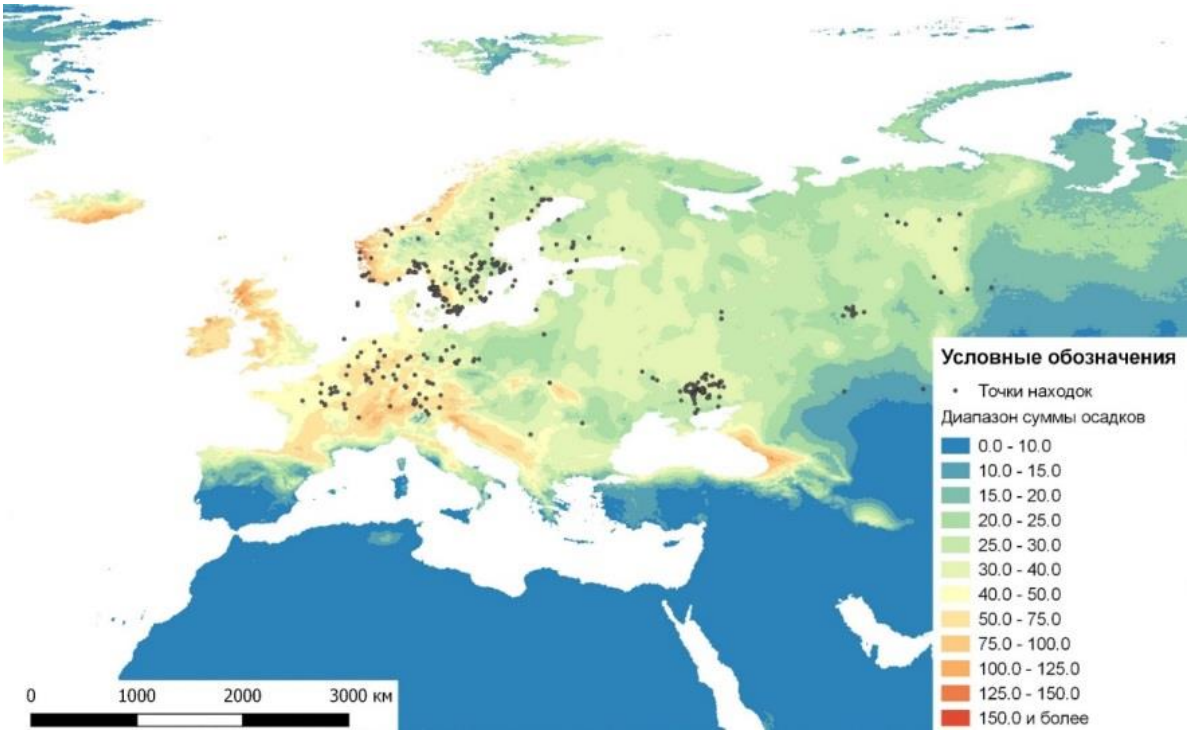
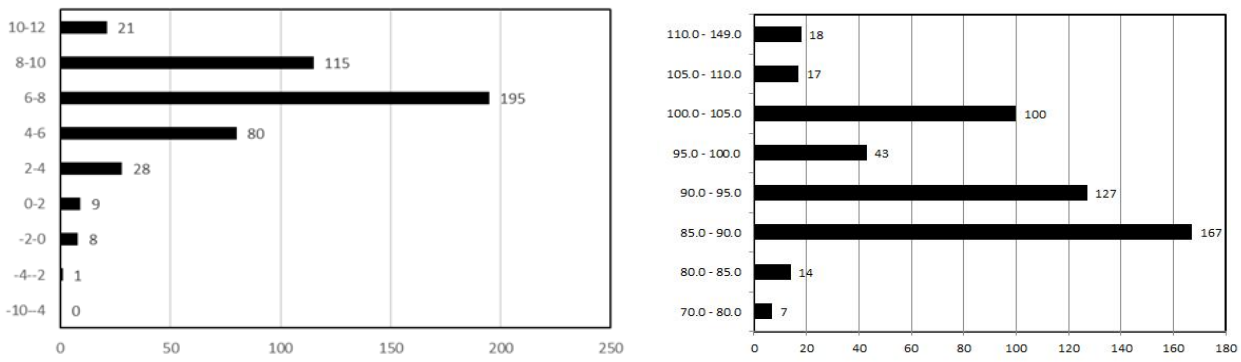


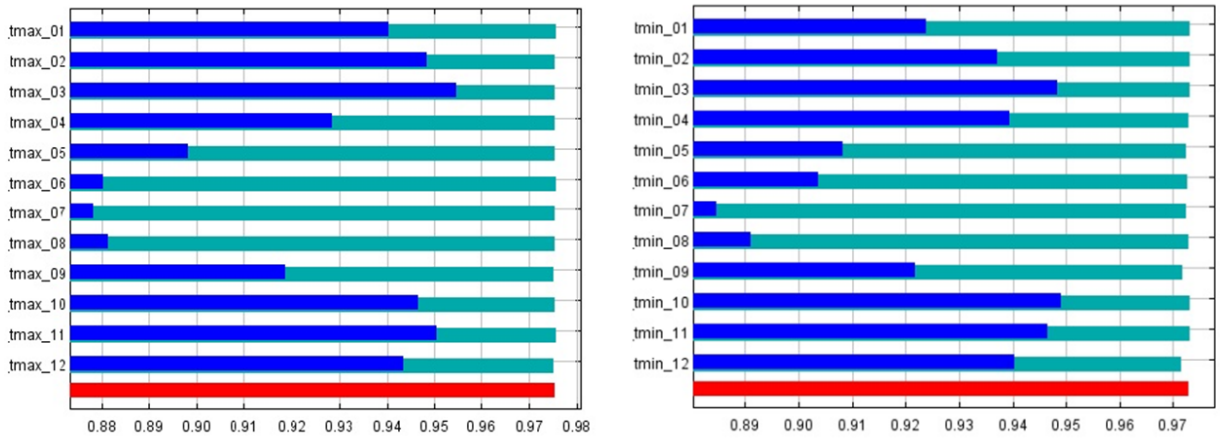
Рис 8. Диапазон суммы осадков и точки находок
Fig. 8. Precipitation range and find points



а, a *б, b*

Рис. 9. Распределение количества точек нахождения P. oblongopunctatus (ось абсцисс) в зависимости от факторов (ось ординат, °C): а — средней годовой температуры воздуха; б — средней температуры самой тёплой четверти года

Fig. 9. Distribution of the number of location points of P. oblongopunctatus (abscissa axis) from depending on factors (ordinate axis, °C): a — the average annual air temperature; b — the average temperature of the warmest quarter of the year



а, a *б, b*

Рис. 10. Столбчатая диаграмма влияния ежемесячной средней максимальной температуры на жизненный цикл P. oblongopunctatus. Ось абсцисс — показатель значимости фактора; ось ординат: а — средняя максимальная температура с января по декабрь; б — средняя минимальная температура с января по декабрь

Fig. 10. Bar graph of the contribution of the monthly average maximum temperature to the life cycle of P. oblongopunctatus. Abscissa axis — indicator of the significance of the factor; ordinate axis: a — average maximum temperature from January to December; b — average minimum temperature from January to December (ordinate axis)

Наиболее благоприятная температура наиболее тёплого квартала лежит в пределах от 9 до 10,5° (437 из 510 точек). На основе полученных данных построены диаграммы (рис. 9).

Известно, что жизненный цикл жуков привязан к температурному режиму и длине светового дня. В программе MaxEnt проведена оценка вклада минимальных и максимальных среднемесячных температур на реализацию жизненного цикла *P. oblongopunctatus*. Для этого был использован приём jackknife. Результаты анализа

показаны на столбчатых диаграммах (рис. 10).

Синие столбцы показывают роль переменной при построении модели. Чем короче голубой столбец, тем больше уникальной информации содержит переменная. В данном случае наиболее значимыми являются максимальные температуры холодного периода: январь−март, сентябрь−декабрь. Аналогичная картина наблюдается и для минимальных температур. Это подтверждается тем фактом, что на развитие гонад значительное влияние оказывает длина светового дня и температура, в связи с чем наблюдается строгая приуроченность к определённым сезонным срокам. Гонады у самцов *P. oblongopunctatus* созревают в условиях короткого дня, т.е. осенью перед зимовкой и во время неё, а у самок — только после смены короткого дня на длинный, т.е. весной сразу после зимовки [*Thiele,* 1966; *Thiele, Konen,* 1975; *Kreckwitz,* 1980].

Получены модели прогнозных ареалов по разным сценариям на 2050 и 2070 гг. Их визуализация позволила оценить возможные изменения ареала в связи с глобальным потеплением климата.

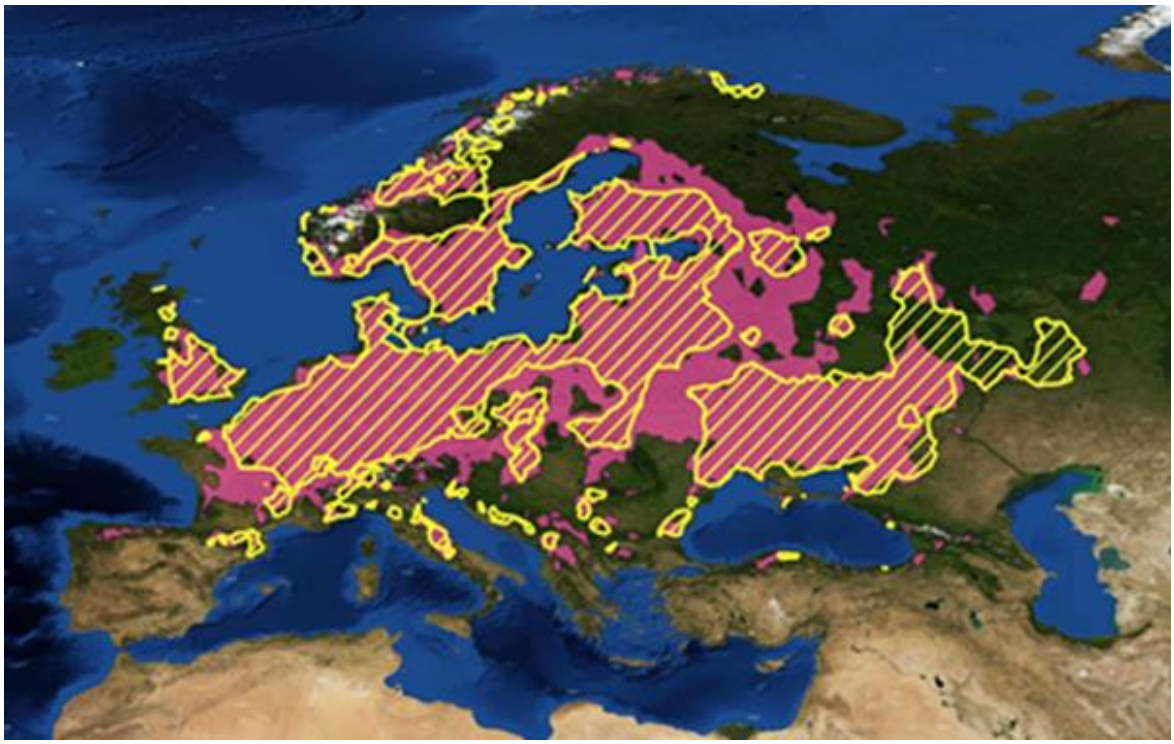


Рис. 11. Изменение площади ареала к 2050 г. по сценарию RCP 2.6: сплошная заливка — современный ареал, заштрихованные участки — ареал 2050 г.
Fig. 11. Change in the area of the range by 2050 according to the RCP 2.6 scenario: solid fill — modern area, shaded areas — area of 2050

Для анализа возможных изменений ареала было создано 5 слоёв: современный ареал, ареал на 2050 г. и ареал на 2070 г. по сценарию 2.6; ареал на 2050 и 2070 гг. по сценарию 8.5. Для каждого слоя выбрали цвет и заливку так, чтобы при наложении слоёв легко можно было увидеть произошедшие изменения (рис. 11–13).

Полученные карты наглядно демонстрируют прогнозируемые изменения. Наблюдается распад сплошного ареала на части, т.е. меняется тип ареала. Современный сплошной становится дизъюнктивным. Ареал 2070 г. по сценарию 8.5 распадается на 5 частей. Распространение жужелиц относительно мало зависит от пищевого фактора. Как правило, ареалы жужелиц определяются взаимодействием исторических причин, климатических и эдафических условий, а также способностью к расселению

[*Абдурахманов, Магомедова,* 2008]. Вероятно, разрыв ареала связан с изменением климатических условий, что приводит к вымиранию вида на большей части ареала, но который сохраняется в отдельных изолированных друг от друга районах.

Рис. 12. Изменение площади ареала к 2070 г. по сценарию RCP 2.6: сплошная заливка — ареал на 2070 г., заштрихованные участки — ареал 2050 г.
Fig. 12. Change in the area of the range by 2070 according to the RCP 2.6 scenario: solid fill — area for 2070, shaded areas — area of 2050

Рис. 13. Изменение площади ареала к 2070 г. по сценарию RCP 8.5: сплошная заливка — ареал 2050 г., заштрихованные участки — ареал 2070 г.
Fig. 13. Change in the area of the range by 2070 according to the RCP 8.5 scenario: solid fill — area of 2050, shaded areas — area of 2070

ВЫВОДЫ

Несмотря на широкое использование в научной практике методов моделирования, данное направление пока недостаточно представлено в энтомологических исследованиях. Развитие этих исследований позволит понять закономерности пространственного распределения видов-вредителей сельского хозяйства, редких и нуждающихся в охране реликтовых видов, оценить динамику их распространения в связи с изменениями климата и антропогенной нагрузкой. Данные исследования помогут разработать практические рекомендации по охране редких видов.

Полученная нами модель распространения *P. oblongopunctatus* соответствует современным представлениям о границах ареала данного вида. Выявленные значимые биоклиматические факторы подтверждаются ранее установленными данными. Выявленная динамика изменений ареала в связи с изменением климата позволяет заключить о его распаде на составные части, что приведёт к вымиранию вида на большей части ареала и сохранении его в отдельных изолированных друг от друга районах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 16-37-60068.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, grant No 16-37-60068.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абдурахманов Г.М., Магомедова М.З.* Особенности географического распространения эндемичных видов жужелиц рода Carabus на Кавказе. Юг России: экология, развитие, 2008. № 3. С. 45–52.

2. *Болотов И.И., Фролов А.А.* Моделирование ареала и анализ вклада факторов в климатическую нишу Parnassius mnemosyne L. 1758 (Lepidoptera: Papilionidae). Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Естественные науки, 2015. № 1. С. 56–67.

3. *Дудов С.В.* Моделирование распространения видов по данным рельефа и дистанционного зондирования на примере сосудистых растений Нижнего горного пояса хр. Тукурингра (Зейский заповедник, Амурская область). Журнал общей биологии, 2016. Т. 77. № 1. С. 16–28.

4. *Рахматуллина И.Р., Рахматуллин З.З., Латыпов Э.Р.* Моделирование условий произрастания и анализ вклада факторов в формирование высокобонитетных насаждений сосны обыкновенной (Pinus sylvestris L.) в программе MaxEnt (на примере Бугульминско-Бебелеевской возвышенности в пределах Республики Башкортостан). Лесное хозяйство, 2017. № 3. С. 104–111.

5. *Санданов Д.С.* Современные подходы к моделированию разнообразия и пространственному распределению видов растений: перспективы их применения в России. Вестник Томского государственного университета, 2019. № 46. С. 82–114. DOI: 10.17223/19988591/46/5.

6. *Bousquet Y.* Tribe Pterostichini. Catalogue of Palearctic Coleoptera. V. 1. Archostemata – Myxophaga – Adephaga. Stenstrup, Denmark: Apollo Books, 2003. P. 462–521.

7. *Brygadyrenko V.V.* Evaluation of ecological niches of abundant species of Poecilus and Pterostichus (Coleoptera: Carabidae) in forests of steppe zone of Ukraine. Entomologica Fennica, 2016. No 27(2). P. 81–100.

8. *Dicken P.* Global shift: mapping the changing contours of the world economy. 7th edition. London: Guilford Press, 2015. 618 p.

9. *Douma J.C., Witte J.-Ph.M., Aerts R., Bartholomeus R.P., Ordonez J.C., Venterink H.O., Wassen M.J., Van Bodegom P.M.* Towards a functional basis for predicting vegetation patterns; incorporating plant traits in habitat distribution models. Ecography, 2012. V. 35. P. 294–305.
10. *Guisan A., Thuiller W.* Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. Ecological Letters, 2005. V. 8. P. 993–1009.
11. *Guisan A., Zimmermann N.E.* Predictive habitat distribution models in ecology. Ecological Modelling, 2000. V. 135. P. 147–186.
12. *Hurka K.* Carabidae of the Czech and Slovak Republics. Zlin, Czech Republic: Kabourek, 1996. 565 p.
13. *Huyong Y., Lei F., Yufei Z., Li F., Di W., Chaoping Z.* Prediction of the spatial distribution of Alternanthera philoxeroides in China based on ArcGIS and MaxEnt. Global Ecology and Conservation. Elsevier BV, March 2020, e00856. V. 21. 15 p. DOI: 10.1016/j.gecco.2019. e00856.
14. *von Kreckwitz H.* Sind Nahrungsmenge und Korpergewich von Bedeutung fur die Gonadenreifung des Carabiden Pterostichus nigrita Payk. in verschiedenen Photoperioden? Zoologischer Anzeiger. Jena, Germany: Elsevier, 1980. Bd. 204. H. 3/4. P. 157–164.
15. *Kryzhanovskij O.L., Belousov I.A., Kabak I.I., Kataev B.M., Makarov K.V., Shilenkov V.G.* A checklist of the ground-beetles of Russia and adjacent lands (Insecta, Coleoptera, Carabidae). Sofia, Bulgaria: Pensoft Publishers, 1995.
16. *Phillips S.J., Dudic M.* Modelling of species distribution with Maxent: new extentions and a comprehensive evaluation. Ecography, 2008. V. 31. P. 161–175.
17. *Pithan F., Mauritsen T.* Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. Nature Geoscience, 2014. V. 7. P. 181–184. DOI: 10.1038/ NGEO2071.
18. *Portilla Cabrera C.V., Selvaraj J.J.* Geographic shifts in the bioclimatic suitability for Aedes aegypti under climate change scenarios in Colombia. Heliyon, January 2020. V. 6. Iss. 1. P. e03203. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e03101.
19. *Qin A., Liu B., Guo Q., Bussmann R.W., Ma F., Jian Z., Xu G., Pei Sh.* Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of Thuja sutchuenensis Franch., an extremely endangered conifer from southwestern China. Global Ecology and Conservation, April 2017. Amsterdam: Elsevier. V. 10. P. 139–146. DOI: 10.1016/j.gecco. 2017.02.004.
20. *Thiele H.-U.*, Einflusse der Photoperiode auf die Diapause von Carabiden. Zeitschrift für Angewandte Entomologie, 1966. Bd. 58. P. 143–149.
21. *Thiele H.-U., Konen H.* Interaction between photoperiodism and temperature with respect to the control of dormancy in the adult stage of *Pterostichus oblongopunctatus* F. (Coleoptera, Carabidae). II. The development of the reproductionpotential during the winter months in the field. Oecologia (Berlin), 1975. V. 19. P. 339–343.
22. *Tufte E.R.* Beautiful evidence. Cheshire, CT: Graphics Press, 2006. 213 p.
23. *Yang X.Q., Kushwaha S.P.S., Saran S., Xu J., Roy P.S.* Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. Ecological Engineering, 2013. No 51. P. 83–87. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoleng. 2012.12.004.
24. *Yuanjun Z., Wei W., Hao L., Baizhu W., Xiaohui Y., Yanshu L.* Modelling the potential distribution and shifts of three varieties of Stipa tianschanica in the eastern Eurasian Steppe under multiple climate change scenarios. Global Ecology and Conservation, October 2018. Elsevier. V. 16. e00501. DOI: 10.1016/j.gecco.2018.e00501.
25. *Zhang L., Jing Z., Li Z., Liu Y., Fang S.* Predictive modeling of suitable habitats for Cinnamomum Camphora (L.) Presl using maxent model under climate change in China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 31 Aug 2019. V. 16. Iss. 17. P. 3185. DOI: 10.3390/ijerph16173185.

REFERENCES

1. *Abdurahmanov G.M., Magomedova M.Z.* Features of the geographical distribution of endemic species of ground beetles of the genus Carabus in the Caucasus. South of Russia: ecology, development, 2008. No 3. P. 45–52 (in Russian).
2. *Bolotov I.I., Frolov A.A.* Range modeling and analysis of the contribution of factors to the climate niche of Parnassius mnemosyne L. 1758 (Lepidoptera: Papilionidae). Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Natural Sciences, 2015. No 1. P. 56–67 (in Russian).
3. *Bousquet Y.* Tribe Pterostichini. Catalogue of Palearctic Coleoptera. V. 1. Archostemata – Myxophaga – Adephaga. Stenstrup, Denmark: Apollo Books, 2003. P. 462–521.
4. Brygadyrenko V.V. Evaluation of ecological niches of abundant species of Poecilus and Pterostichus (Coleoptera: Carabidae) in forests of steppe zone of Ukraine. Entomologica Fennica, 2016. No 27(2). P. 81–100.
5. Dicken P. Global shift: mapping the changing contours of the world economy. 7th edition. London: Guilford Press, 2015. 618 p.
6. Douma J.C., Witte J.-Ph.M., Aerts R., Bartholomeus R.P., Ordonez J.C., Venterink H.O., Wassen M.J., Van Bodegom P.M. Towards a functional basis for predicting vegetation patterns; incorporating plant traits in habitat distribution models. Ecography, 2012. V. 35. P. 294–305.
7. Dudov S.V. Modeling of species distribution based on terrain and remote sensing data on the example of vascular plants of the Lower mountain zone of the Tukuringra ridge (Zeysky reserve, Amur region). Zhurnal obshchej biologii (Journal of General Biology), 2016. No 1. V. 77. P. 16–28 (in Russian).
8. *Guisan A., Thuiller W.* Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. Ecological Letters, 2005. V. 8. P. 993–1009.
9. *Guisan A., Zimmermann N.E.* Predictive habitat distribution models in ecology. Ecological Modelling, 2000. V. 135. P. 147–186.
10. *Hurka K.* Carabidae of the Czech and Slovak Republics. Zlin, Czech Republic: Kabourek, 1996. 565 p.
11. *Huyong Y., Lei F., Yufei Z., Li F., Di W., Chaoping Z.* Prediction of the spatial distribution of Alternanthera philoxeroides in China based on ArcGIS and MaxEnt. Global Ecology and Conservation. Elsevier BV, March 2020, e00856. V. 21. 15 p. DOI: 10.1016/j.gecco.2019.e00856.
12. *von Kreckwitz H.* Sind Nahrungsmenge und Korpergewich von Bedeutung fur die Gonadenreifung des Carabiden Pterostichus nigrita Payk. in verschiedenen Photoperioden? Zoologischer Anzeiger. Jena, Germany: Elsevier, 1980. Bd. 204. H. 3/4. P. 157–164 (in German).
13. *Kryzhanovskij O.L., Belousov I.A., Kabak I.I., Kataev B.M., Makarov K.V., Shilenkov V.G.* A checklist of the ground-beetles of Russia and adjacent lands (Insecta, Coleoptera, Carabidae). Sofia, Bulgaria: Pensoft Publishers, 1995.
14. *Phillips S.J., Dudic M.* Modelling of species distribution with Maxent: new extentions and a comprehensive evaluation. Ecography, 2008. V. 31. P. 161–175.
15. *Pithan F., Mauritsen T.* Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. Nature Geoscience, 2014. V. 7. P. 181–184. DOI: 10.1038/NGEO2071.
16. *Portilla Cabrera C.V., Selvaraj J.J.* Geographic shifts in the bioclimatic suitability for Aedes aegypti under climate change scenarios in Colombia. Heliyon, January 2020. V. 6. Iss. 1. P. e03203. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e03101.
17. *Qin A., Liu B., Guo Q., Bussmann R.W., Ma F., Jian Z., Xu G., Pei Sh.* Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of Thuja sutchuenensis Franch., an extremely endangered conifer from southwestern China. Global Ecology and

Conservation, April 2017. Amsterdam: Elsevier. V. 10. P. 139–146. DOI: 10.1016/j.gecco. 2017.02.004.
18. *Rakhmatullina I.R., Rakhmatullin Z.Z., Latypov E.R.* Modeling of growth conditions and analysis of the contribution of factors to the formation of high-priority stands of common pine (Pinus sylvestris L.) in the MaxEnt program (on the example of the Bugulminsko-Bebeleyevskaya upland within the Republic of Bashkortostan). Forestry, 2017. No 3. P. 104–111 (in Russian).
19. *Sandanov D.S.* Modern approaches to modeling the diversity and spatial distribution of plant species: prospects for their use in Russia. Tomsk State University Journal, 2019. No 46. P. 82–114. DOI: 10.17223/19988591/46/5 (in Russian).
20. Thiele H.-U., Einflusse der Photoperiode auf die Diapause von Carabiden. Zeitschrift für Angewandte Entomologie, 1966. Bd. 58. P. 143–149 (in German).
21. *Thiele H.-U., Konen H.* Interaction between photoperiodism and temperature with respect to the control of dormancy in the adult stage of *Pterostichus oblongopunctatus* F. (Coleoptera, Carabidae). II. The development of the reproductionpotential during the winter months in the field. Oecologia (Berlin), 1975. V. 19. P. 339–343.
22. *Tufte E.R.* Beautiful evidence. Cheshire, CT: Graphics Press, 2006. 213 p.
23. *Yang X.Q., Kushwaha S.P.S., Saran S., Xu J., Roy P.S.* Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. Ecological Engineering, 2013. No 51. P. 83–87. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoleng. 2012.12.004.
24. Yuanjun Z., Wei W., Hao L., Baizhu W., Xiaohui Y., Yanshu L. Modelling the potential distribution and shifts of three varieties of Stipa tianschanica in the eastern Eurasian Steppe under multiple climate change scenarios. Global Ecology and Conservation, October 2018. Elsevier. V. 16. e00501. DOI: 10.1016/j.gecco.2018.e00501.
25. *Zhang L., Jing Z., Li Z., Liu Y., Fang S.* Predictive modeling of suitable habitats for Cinnamomum Camphora (L.) Presl using maxent model under climate change in China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 31 Aug 2019. V. 16. Iss. 17. P. 3185. DOI: 10.3390/ijerph16173185.

УДК: 912.43 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-189-200**

Н.А. Бондаренко[1], Т.В. Любимова[2], В.В. Стогний[3]

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ

АННОТАЦИЯ

Разнообразие природных условий территория Краснодарского края способствует развитию хозяйственного комплекса. Вместе с тем на территории Краснодарского края могут развиваться опасные экзогенные и сейсмогенные процессы, поэтому проблема оценки потенциальных рисков как основы устойчивого развития региона актуальна. Основные задачи исследования сводились к оценке наличия и степени активности тех или иных геологических процессов, определяющих безопасность объектов строительства, составлению комплекта карт, имеющих теоретическое и прикладное значение, а также применение методики интегральной оценки риска, алгоритм которой адаптирован для использования современных геоинформационных систем.

Итоговая карта интегральной оценки потенциального геологического риска показала, что изучаемая территория из-за различий в природных (экономических, социальных) показателях отражает неодинаковый потенциал опасностей. Всего было выделено 4 района, отличающихся друг от друга по степени потенциального геологического риска и возможным или обязательным мероприятиям по управлению рисками.

Рассматриваемые в работе потенциальные риски приурочены к зонам развития опасных геологических процессов и не привязаны к уровню техногенной освоенности того или иного района. Тем не менее установленный потенциальный риск может быть учтён как для расчёта индивидуальных рисков, так и для любых объектов воздействия. При этом уязвимость объекта воздействия будет зависеть от условной вероятности поражения опасными геологическими процессами.

Полученные результаты могут быть востребованы на этапах территориального планирования, принятии планировочных решений, проведении инженерных изысканий и ведении регионального мониторинга опасных геологических процессов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: опасные геологические процессы, интегральная оценка, потенциальные риски, картирование

[1] Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, 350040, Краснодар, Россия; *e-mail:* **nik_bond@mail.ru**
[2] Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, 350040, Краснодар, Россия; *e-mail:* **TV-Luy@yandex.ru**
[3] Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, 350040, Краснодар, Россия; *e-mail:* **stogny@mail.ru**

Nikolay A. Bondarenko[1], **Tatyana V. Lyubimova**[2], **Valery V. Stogny**[3]

INTEGRATED ASSESSMENT OF POTENTIAL GEOLOGICAL RISKS IN THE KRASNODAR REGION

ABSTRACT

A variety of an environment the territory of Krasnodar Krai contributes to the development of an economic complex. At the same time, in the territory of Krasnodar Krai dangerous exogenous and seismogenic processes therefore the problem of assessment of potential risks as bases of sustainable development of the region are relevant can develop. The main objectives of a research came down to assessment of existence and degree of activity of these or those geological processes defining safety of construction objects, to drawing up a set of the cards having theoretical and applied value and also application of a technique of integrated assessment of risk which algorithm is adapted for use of modern geographic information systems.

The final map of the integrated assessment of potential geological risk showed that the studied area reflects different potential hazards due to differences in natural (economic, social) indicators. A total of 4 areas were identified that differ from each other in terms of potential geological risk and possible or mandatory risk management measures.

The potential risks considered in this paper are confined to zones of development of dangerous geological processes and are not linked to the level of technogenic development of a particular area. However, the identified potential risk can be taken into account both for the calculation of individual risks and for any impact objects. In this case, the vulnerability of the affected object will depend on the conditional probability of damage by dangerous geological processes.

The results obtained can be used at the stages of territorial planning, making planning decisions, selecting locations for engineering surveys and conducting regional monitoring of dangerous geological processes.

KEYWORDS: hazardous geological processes, integrated assessment, potential risks, mapping

ВВЕДЕНИЕ

Краснодарский край — один из наиболее развитых в социально-экономическом отношении регионов юга России. В значительной мере этому способствует географическое положение, высокий ресурсный потенциал. Край занимает 3-е место среди регионов России по числу жителей. В его административно-территориальном делении функционирует 38 районов, 26 городов, в т.ч. 15 — краевого подчинения[4]. Наличие Азовского и Чёрного морей, объектов транспортной инфраструктуры способствует развитию промышленности, сельского хозяйства, туризма. Вместе с тем актуальным остается проблема оценки потенциальных рисков как основы устойчивого развития региона на территории Краснодарского края, где имеют место быть различные опасные геологические процессы. Значительную угрозу для экономики и безопасности населения края представляют экзогенные геологические процессы, связанные со склоновыми процессами, подземными водами и др. Территории 1 250 населённых пунктов края подвержены различным видам экзогенных геологических процессов. Так поражённость оползневыми процессами может составлять 10–20 % от площади

[1] Kuban State University, Stavropolskaya str., 149, 350040, Krasnodar, Russia; *e-mail:* **nik_bond@mail.ru**
[2] Kuban State University, Stavropolskaya str., 149, 350040, Krasnodar, Russia; *e-mail:* **TV-Luy@yandex.ru**
[3] Kuban State University, Stavropolskaya str., 149, 350040, Krasnodar, Russia; *e-mail:* **stogny@mail.ru**
[4] Краснодарский край в цифрах. Электронный ресурс: https://economy.krasnodar.ru/macroeconomics/analiz/krasnodar-region-in-figures/ (дата обращения 10.01.2020)

территории. Под воздействием хозяйственной деятельности этот показатель возрастает до 50 %. Так, только в 2018 г. количество населённых пунктов и хозяйственных объектов, испытавших воздействия экзогенных геологических процессов, составило 11[1].

Для подготовки документов территориального планирования (документации по планировке территории и выбора площадки (трассы) строительства) предусматривается по результатам инженерных изысканий составление карты инженерно-геологического районирования территорий и карт территорий, подверженных риску возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера[2].

Но, несмотря на это, на сегодняшний день остаются неразработанными вопросы классификации опасных природных процессов, терминологии в отношении понимания «риск», «оценка риска». Имеется единичный опыт разработки методологических основ оценки риска [*Грохольский*, 2015] при рассмотрении региональных особенностей рисков экзогенных геологических процессов.

Цель работы — оценка потенциальных геологических рисков для территории Краснодарского края. Основные задачи исследования сводились к оценке наличия и степени активности тех или иных геологических процессов, определяющих безопасность объектов строительства, составлению комплекта карт, имеющих теоретическое и прикладное значение, а также применение методики интегральной оценки риска, алгоритм которой адаптирован для использования современных геоинформационных систем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Различные районы изучаемой территории характеризуются своими комплексами опасных природных процессов и явлений. Для степных сельскохозяйственных районов Краснодарского края актуальны вопросы подтопления. На Черноморском побережье при прохождении длительных ливневых дождей на притоках крупных рек Аше, Псезуапсе, Шахе, Мзымта периодически активизируются селевые процессы [*Измайлов и др.,* 1982]. Территория, относящаяся к Крымско-Кавказскому сейсмическому поясу, характеризуется различной степенью вероятности сейсмособытий интенсивностью 8–9 баллов [*Стогний, Стогний,* 2017].

Одним из важных факторов, оказывающих существенное значение на развитие тех или иных опасных экзогенных процессов, является рельеф, на формирование которого оказали влияние тектоническое и геологическое строение, формационная принадлежность пород верхней части разреза, климатические особенности. По сути, современный рельеф отражает суммарное влияние эндогенных и экзогенных процессов на рассматриваемой территории.

Расчленённость рельефа, в т.ч. показатели, характеризующие степень его изменчивости, в их числе — энтропия абсолютных отметок и крутизна склонов, имеют наибольшее значение для целей регионального картирования. На рис. 1 приведена схема районирования изучаемой территории по характеру изменчивости рельефа, выполненная по карте уклонов земной поверхности. В результате были выделены области по характеру изменчивости рельефа: от очень низких (I) до очень высоких (V). Ниже приводится их физико-геологическая характеристика [*Гужин и др*., 1996].

Область I. Это область очень низких значений изменчивости рельефа. Она расположена в западной Приазовской части Краснодарского края и включает восточную часть Таманского полуострова. Северная её часть находится в пределах платформенного крыла Азово-Кубанской впадины Скифской эпигерцинской платформы, южная часть — Западно-Кубанского позднеальпийского прогиба, а в восточной части Таманского

[1] Информационный сайт о состоянии недр РФ. Электронный ресурс: http://www.geomonitoring.ru/map_ufo.html#item3 (дата обращения 10.01.2020)

[2] СП 47.13330.2016 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения.

полуострова — Таманского периклинального прогиба. В геоморфологическом отношении она примерно совпадает с границами Приазовской низменной долиной дельтовых аллювиальных отложений. В её пределах широко развиты лиманы и плавневые зоны. Данная область не подвержена водной эрозии и потенциально расположена к очень слабой ветровой эрозии. Верхняя часть разреза сложена верхнечетвертичными отложениями, представленными песками, галечниками, супесями.

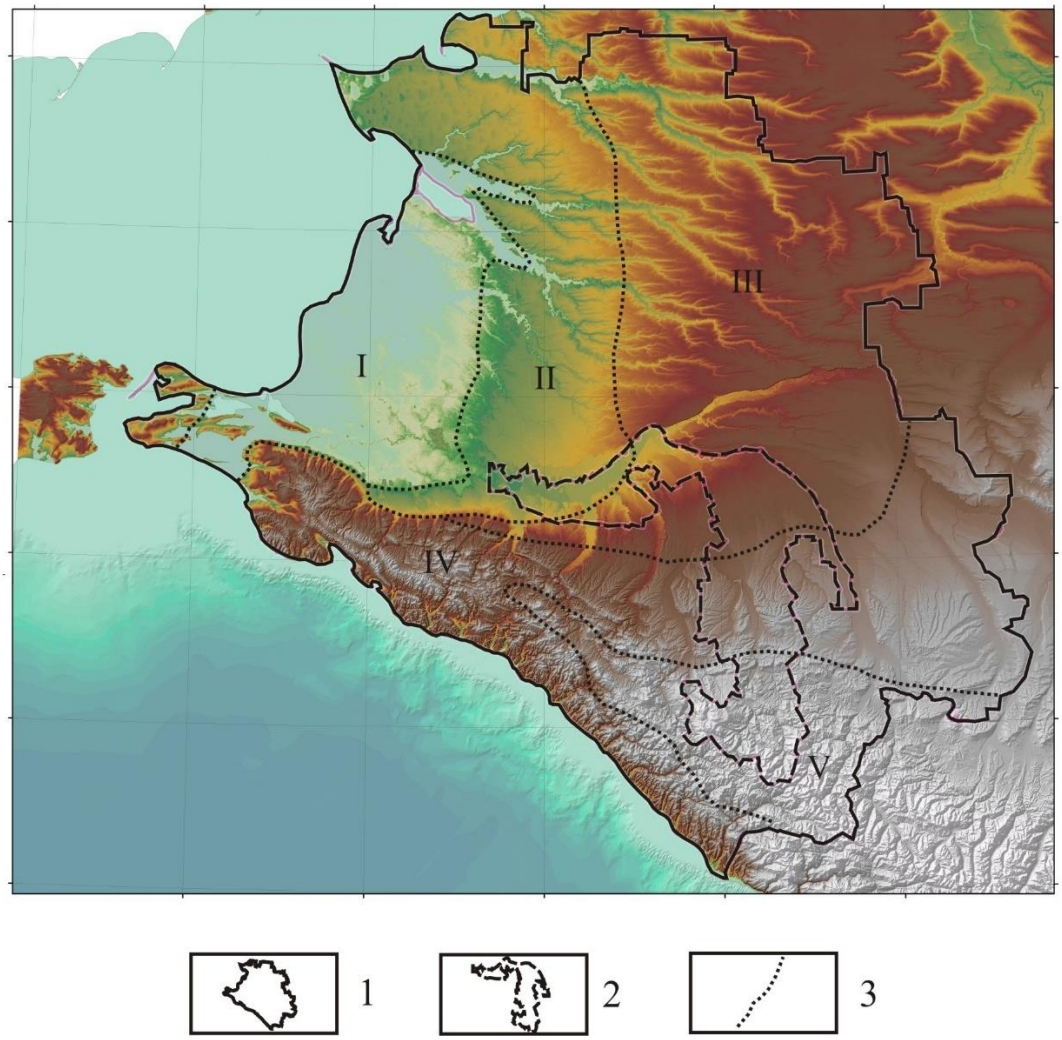


Рис. 1. Схема районирования территории Краснодарского края по характеру изменчивости рельефа.
1−2 — административные границы: 1 — Краснодарского края, 2 — Республики Адыгея; 3 — границы областей по характеру изменчивости рельефа.
I−V — области по характеру изменчивости рельефа: I — очень низкая, II — низкая, III — средняя, IV — высокая, V – очень высокая
Fig. 1. The scheme of zoning of the territory of the Krasnodar territory by the nature of the relief variability.
1–2 — administrative borders: 1 – Krasnodar territory, 2 – Republic of Adygea; 3 — borders of regions by the nature of terrain variability.
I−V — areas by the nature of terrain variability: I – very low, II – low, III – medium, IV – high, V – very high

Область II. Это область низких значений изменчивости рельефа. Она включает зоны аккумулятивно-эрозионной лёссовой плиоцен-четвертичной равнины на субстрате скифских глин и нижнечетвертичной дельты, а также прибрежных террас р. Кубани. Северная её часть находится в пределах платформенного крыла Азово-Кубанской впадины Скифской эпигерцинской платформы, южная часть — Западно-Кубанского позднеальпийского прогиба. Область подвержена слабой (на юге) и средней (на севере) ветровой эрозии, сток рек зарегулирован. Верхняя часть разреза сложена разновозрастными четвертичными отложениями песков, галечников, конгломератов, супесей.

Область III. Здесь преобладают средние значения изменчивости рельефа. В геоморфологическом отношении в своей северной части включает зоны аккумулятивно-эрозионной лёссовой плиоцен-четвертичной равнины на субстрате скифских глин и нижнечетвертичной дельты и прибрежных террас р. Кубани, а в южной части — северные предгорные полого-наклонные и межгорные синклинальные террасированные равнины и террасы. Северная её часть находится в пределах платформенного крыла Азово-Кубанской впадины Скифской эпигерцинской платформы, южная часть — Восточно-Кубанского и Западно-Кубанского прогиба. Она подвержена слабой (на юге) и средней и сильной (на севере) ветровой эрозии, сток рек зарегулирован. В строении верхней части разреза развиты разновозрастные четвертичные отложения песков, галечников, конгломератов, супесей.

Область IV. Это область высоких значений изменчивости рельефа. Она охватывает южную часть территории Краснодарского края и северную часть территории Республики Адыгея. В геоморфологическом отношении она включает в своей северной части предгорные полого-наклонные и межгорные синклинальные террасированные равнины и террасы, а в южной части — среднегорный эрозионно-тектонический рельеф в области развития неогеновых антиклинальных и брахиантиклинальных структур и другие формы. В тектоническом отношении северная часть области расположена в пределах Восточно-Кубанского прогиба, а южная — эпиплатформенной орогенной области Большого Кавказа. Водная эрозия развита от слабой в северной части до сильной и очень сильной в южной части. В южной части области широко развиты породы палеоген-неогеновой и меловой системы, в т.ч. флишевые комплексы. В целом для области характерна большая латеральная и вертикальная изменчивость по составу пород основания и перекрывающих комплексов осадочных пород верхней части разреза.

Область V включает наиболее высокогорные районы Краснодарского края и южную часть территории Республики Адыгея. Это область очень высоких значений изменчивости рельефа. В геоморфологическом отношении она содержит высокогорный ледниково-эрозионно-тектонический рельеф и др. геоморфологические формы высокогорья; водная эрозия очень сильная. В тектоническом отношении она расположена в пределах эпиплатформенной орогенной области Бол. Кавказа, где развиты комплексы пород от протерозоя до юрского возраста включительно.

Большое разнообразие климата на изучаемой территории обусловлено сложными физико-географическими условиями. Здесь можно выделить переходы от континентального сухого климата на северо-востоке края до умеренно-континентального в Прикубанской низменности и тёплого влажного климата предгорий, от холодного климата высокогорий до субтропического на Черноморском побережье. Всего по гидрометеорологическим особенностям выделяют 4 района: Черноморское побережье и южные склоны Северо-Западного (СЗ) Кавказа, Азовское побережье, предгорья и северные склоны СЗ Кавказа, степная часть. Осадки являются основным климатическим фактором, определяющим величину поверхностного и подземного стока. По территории Краснодарского края они распределены крайне неравномерно. Так, количество осадков за год увеличивается на территории в направлении с севера на юг и в среднем составляет на

большей части равнинных районов 500–600 мм, в предгорьях и в прилегающих к ним равнинных территориях оно увеличивается до 700–800 мм, а в горах — до 800–3000 мм. На лето приходится максимум осадков на равнинной территории, а на побережье — на холодную часть года. Всего в Краснодарском крае по особенностям режима увлажнённости выделено 17 районов разного порядка (от 2-го до 4-го). Коэффициенты увлажнённости изменяются от 0,25 до 0,6 и более [*Нагалевский, Чистяков,* 2003].

Приведённая характеристика геоморфологических и климатических параметров позволяет провести анализ региональных пространственно-временных закономерностей формирования опасных геологических процессов и осуществить оценку и районирование территории.

Для оценки опасности того или иного фактора риска в работе использован метод оценки отдельных факторов по баллам. Итоговая оценка формируется в результате простого суммирования оценок баллов всех составляющих их компонентов. Фактически метод балльной оценки заключается в экспертном определении наиболее значимых факторов-критериев, которым присваиваются веса в зависимости от их важности. Количественная оценка выражается в присвоении каждому критерию определённого балла. Итоговая оценка рассчитывается как среднее арифметическое всех баллов по выбранным факторам влияния. Метод балльной оценки удобен тем, что позволяет преодолеть сложность оценивания неоднородных между собой показателей.

Для ряда наиболее значимых факторов в работе были построены частные карты-схемы:

- сейсмичности;
- интенсивности развития форм эрозии временных водотоков;
- густоты овражно-балочной сети;
- распространения специфических грунтов (лессовидных пород);
- поражённости территории просадочными формами рельефа.

Сейсмичность была принята по карте А (10 %) ОСР-97*[1], а также с учётом анализа геолого-геофизических материалов по территории Краснодарского края[2]. Коэффициенты К для отражения степени поражённости территории тем или иным природным процессом или явлением рассчитывались, исходя из суммарной площади территорий, поражённых процессом, выраженной в % (табл. 1).

Для комплексной оценки потенциальных рисков от опасных геологических процессов изучаемой территории и построения итоговой карты потребовалось послойно наложить друг на друга все частные карты и вычислить среднее арифметическое значение баллов для каждого ограниченного участка. Для этого были проведены оверлейные операции, в результате которых выполнено объединение пространственных характеристик покрытий ARC/INFO в новый слой и реляционное соединение их атрибутивных данных.

Итогом стала интегральная карта оценки потенциальных рисков природных процессов. Наиболее благоприятными условиями характеризуются территории, которые имеют минимальный балл, а территории с неблагоприятными условиями — максимальный.

В описанной методике риски описываются как предпосылки для их возникновения и поэтому рассматриваются как потенциальные. Таким образом, значение фактора природного риска, присвоенного конкретной территории, характеризует предпосылки,

[1] СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах

[2] Stogny V.V., Stogny G.A. Seismotectonics and seismic hazard of the North-Western Caucasus (Southwest of Russia). ID 10913. Thessaloniki: 16th European conference on Earthquake Engineering, 18−21 June 2018. Programme. P. 78.

способствующие возникновению того или иного типа опасности на ней, однако не может рассматриваться как оценка вероятности возникновения опасного события. С другой стороны, для определения социального и экономического ущерба при возникновении опасного явления необходимы специальные исследования.

Табл. 1. Количественные характеристики показателей
Table 1. Quantitative characteristics of indicators

Критерий оценки	Характеристика	Вес критерия, баллы
Сейсмичность по карте ОСР-97А*, балл	6	0
	7	1
	8 и более	2
Распространение просадочных грунтов	Не распространены	0
	I тип просадочности	1
	II тип просадочности	2
Поражённость просадочными формами рельефа	К=0	0
	0<К<10	1
	10<К<25	2
	25<К<35	3
Поражённость водно-эрозионными процессами, %	Менее 3%	0
	3–25%	1
	Более 25%	2
Расчленённость земной поверхности, км/км^2	0,0–0,10	1
	0,10–0,50	2
	0,50–1,00	3

Для оценки факторов потенциального риска, с учётом интегральной карты и факторов возможного ущерба (уязвимость строений и социальный), необходимо построение вероятностных математических моделей их реализации. Полная вероятность $P(B_i)$ опасного природного или природно-техногенного процесса с i-ым исходом на рассматриваемой территории на региональном и локальном уровнях может вычисляться по формуле полной вероятности [*Минаев, Фадеев,* 2009]:

$$P(B_i) = \sum_{j=1}^{m} P(A_j) P(B_i / A_j),$$

где A_j *(j = 1, ..., m)* — возможные опасные природные процессы;

$P(A_j / B_i)$ — условные вероятности наступления стихийного бедствия при условии реализации j-го опасного природного процесса.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показана карта, которая позволяет представить информацию по интенсивности форм эрозии и густоте овражно-балочной сети в интегральном виде. Исходные 12 областей с разной степенью поражённости формами эрозии временных потоков и 6 областей, отличающихся друг от друга показателем расчленённости, были объединены по пространственно-площадным показателям.

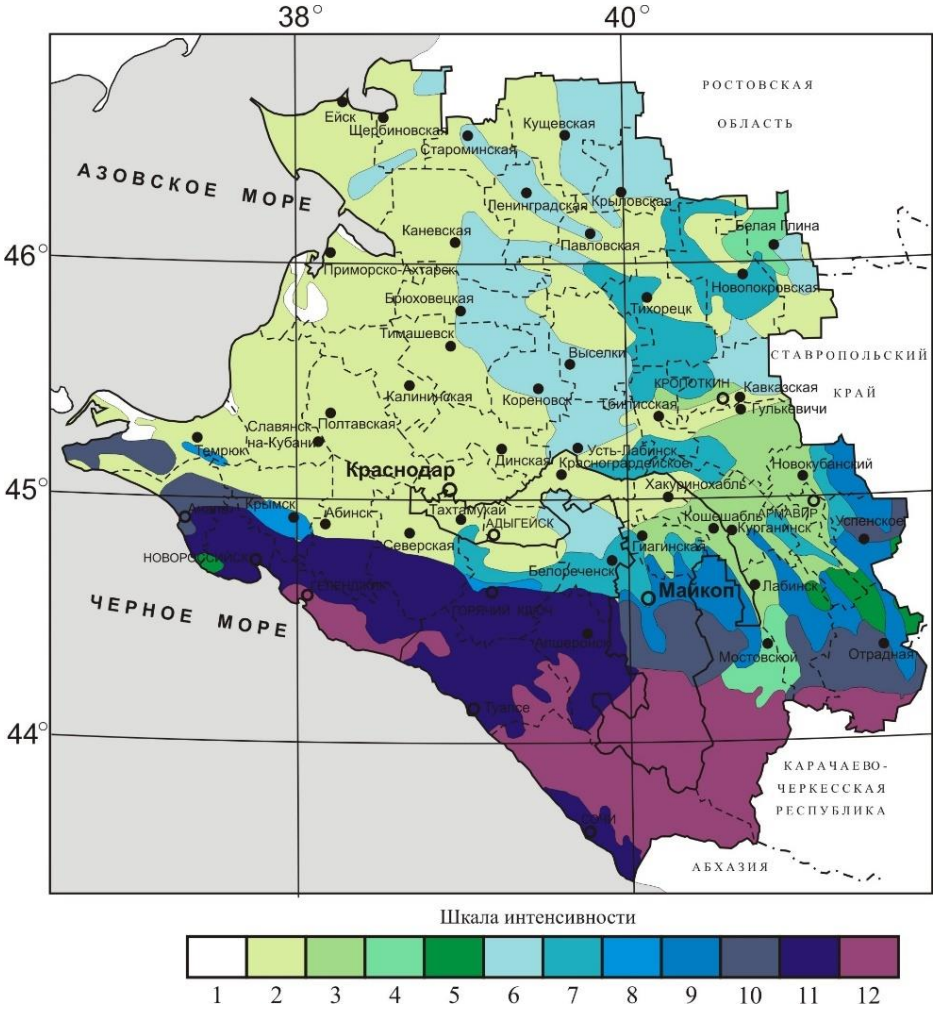


Рис. 2. Интегральная карта-схема интенсивности форм эрозии и густоты овражно-балочной сети.
1 — высота 0–50 м, расчленённость до 0,1 км/км^2; 2 — высота 100–350 м, расчленённость до 0,1 км/км^2, эрозия 0–5; 3 — высота 0–50 м, расчленённость до 0,1 км/км^2, эрозия 10–30; 4 — высота 200–500 м, расчленённость до 0,1 км/км^2, эрозия 10–30; 5 — высота 300–1000 м, расчленённость до 0,1 км/км^2, эрозия 0–5; 6 — высота 0–200 м, расчленённость 0,1–0,25 км/км^2, эрозия 0–10; 7 — высота 0–200 м, расчленённость 0,2–0,5 км/км^2, эрозия 0–5; 8 — высота 20–1000 м, расчленённость 0,1–0,5 км/км^2, эрозия 0–10; 9 — высота 0–350 м, расчленённость 0,5–0,77км/км^2, эрозия 0–25;10 — высота 200–1000 м, расчленённость 0,75–1,0 км/км^2, эрозия 1–25; 11 — высота 50–350 м, расчленённость более 0,1 км/км^2, эрозия 1–35; 12 — высота 350–2000 м, расчленённость более 0,1 км/км^2, эрозия 1–35

Fig. 2. Integrated map-diagram of the intensity of forms of erosion and density of gully-beam network
1 — height 0–50 m, dismemberment up to 0.1 km/km2; 2 — height 100–350 m, dismemberment up to 0.1 km/km^2, erosion 0–5; 3 — height 0–50 m, dismemberment up to 0.1 km/km^2, erosion 10–30; 4 — height 200–500 m, dismemberment up to 0.1 km/km^2, erosion 10–30; 5 — height 300–1000 m, dismemberment up to 0.1 km/km^2, erosion 0–5;6 — height 0–200 m, dissection 0.1–0.25 km/km^2, erosion 0–10; 7 — height 0–200 m, dissection 0.2–0.5 km/km^2, erosion 0–5; 8 — height 20–1000 m, dissection 0.1–0.5 km/km^2, erosion 0–10; 9 — height 0–350 m, dissection 0.5–0.77 km/km^2, erosion 0–25; 10 — height 200–1000 m, dissection 0.75–1.0 km/km^2, erosion 1–25; 11 — height 50–350 m, dissection more than 0.1 km/km^2, erosion 1–35; 12 — height 350–2000 m, dissection more than 0.1 km/km^2, erosion 1–35

Аналогично была создана интегральная карта распространения лессовидных пород и размещения просадочных форм рельефа (рис. 3). По площади просадочных форм рельефа (*K*), выраженной в % к площади единичного квадрата, изначально было выделено 9 областей. Зональность распространения лёссовых грунтов исходила из мощности лёссов (*H*), мощности просадочной толщи ($H_{пр}$), величины просадочных деформаций ($S_{пр}$) и имела более сложный характер.

Суммации рисков каждого из рассмотренных параметров позволили провести ранжирование территории по степени интегрального риска проявления данных показателей.

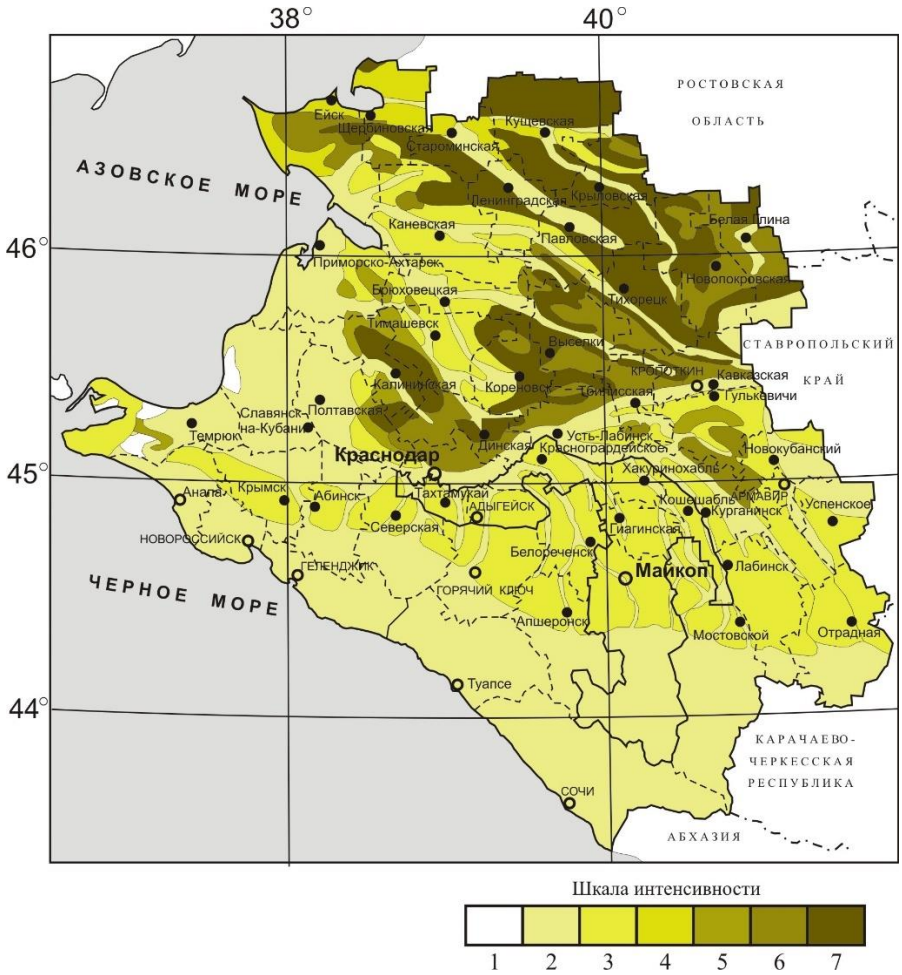


Рис. 3. Интегральная карта-схема распространения лессовидных пород и размещения просадочных форм рельефа
1 — зона прерывистого распространения и отсутствия лёссов, K=0–5; 2 — мощность H=5–10, K=0–5; 3 — мощность H=5–10, K=10–15; 4 — мощность H=10–20, K=0–10; 5 — мощность H=10–15, K=0–5; 6 — мощность H=20, K=5–20; 7 — мощность H=20, K=0–20
Fig. 3. Integrated map-scheme of distribution of loess-like rocks and placement of subsidence relief forms
1 — zone of intermittent propagation and absence of loess, K=0–5; 2 — power H=5–10, K=0–5; 3 — power H=5–10, K=10–15; 4 — power H=10–20, K=0–10; 5 — power H=10–15, K=0–5; 6 — power H=20, K=5–20; 7 — power H=20, K=0–20

В результате совмещения указанных интегральных карт с картой сейсмичности Краснодарского края была построена сводная карта, отражающая потенциальные

геологические риски. Для достижения генерализации суммативной карты-схемы выполнено разбиение критериев на классы. Участки со схожей степенью оценки благоприятности или неблагоприятности условий были объединены в 4 района и представлены на рис. 4.

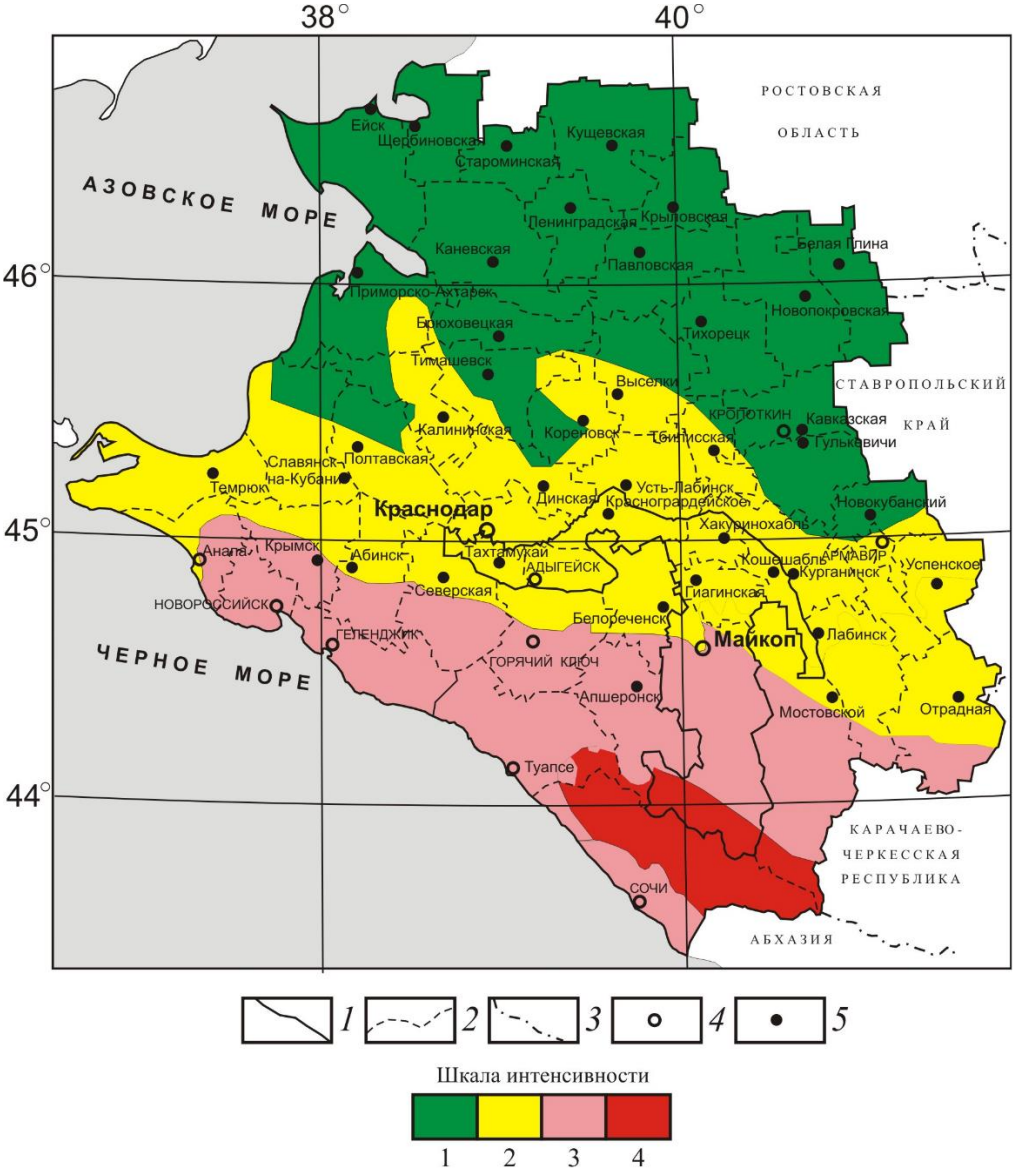


Рис. 4. Карта интегральной оценки потенциального риска.
1−3 — границы: 1 — Краснодарского края и Республики Адыгея, 2 — районов и территорий Краснодарского края, 3 — областей и республик Российской Федерации; 4 — города краевого и республиканского подчинения; 5 — районные центры.
Шкала интенсивности уровней потенциального риска опасных геологических процессов: 1 — низкий, 2 — средний, 3 — высокий, 4 — очень высокий
Fig. 4. Map of integrated assessment of the potential risk.
1–3 — borders: 1 — Krasnodar territory and the Republic of Adygea, 2 — districts and territories of Krasnodar territory, 3 — regions and republics of the Russian Federation; 4 — cities of regional and Republican subordination; 5 — district centers.
Scale of intensity of levels of potential risk of dangerous geological processes: 1 — low, 2 — medium, 3 — high, 4 — very high

Различия территории Краснодарского края в природных, экономических и социальных показателях создают неодинаковый потенциал опасностей. При таком подходе можно получить более подробную характеристику каждого района (табл. 2). Наименьшими рисками характеризуется северо-западная часть Краснодарского края. Высокими рисками характеризуются территории, приуроченные к низкогорной части Краснодарского края. В этот район попадает большая часть побережья (Новороссийск, Геленджик, Туапсе) и такие города, как Крымск, Майкоп, Лабинск и др. Меньшая часть территории характеризуется очень высокими потенциальными рисками. Такие районы приурочены к горной области.

Табл. 2. Уровни потенциальных рисков
Table 2. The levels of potential risks

Уровень риска	Потенциал риска	Потенциальные последствия	Управление рисками
1	Потенциально низкий риск, необходимости в системе учёта факторов риска нет	Очень низкая вероятность возникновения опасного события, потенциальные последствия которого незначительны	Меры по управлению рисками не требуются
2	Потенциально умеренный риск, рекомендуется система учёта факторов	Возможность возникновения опасного события, потенциальные последствия которого потребуют некоторых усилий для восстановления прежнего состояния	Рекомендуются мероприятия по управлению рисками
3	Потенциально высокий риск, необходима система учёта факторов риска	Возможность возникновения опасного события, масштаб потенциальных последствий которого потребует значительных усилий для восстановления прежнего состояния	Требуются мероприятия по управлению рисками
4	Потенциально очень высокий риск, система учёта факторов риска обязательно	Высокая вероятность возникновения опасного события, масштаб потенциальных последствий которого потребует значительных усилий для восстановления прежнего состояния	Меры по управлению рисками обязательны

С учётом отсутствия универсального метода, удовлетворяющего условиям оценки сложности геологических условий любой территории, данный подход обладает новизной.

ВЫВОДЫ

Рассматриваемые в работе потенциальные риски не привязаны к степени техногенной освоенности территории, местонахождению источника опасности. Вместе с тем через оценку потенциального риска можно учитывать степень опасности для любых объектов воздействия, материальных или природных ресурсов, в т.ч. индивидуальный риск. При этом условная вероятность поражения будет зависеть от уязвимости объекта воздействия в результате проявления того или иного фактора или опасного природного процесса.

Полученные результаты могут быть востребованы производственными изыскательскими организациями, госслужбами и бизнесом при реализации целей территориального планирования, определении рентабельности строительства и его безопасной эксплуатации. Кроме этого, результаты исследования могут служить обоснованием для выбора оптимальных объемов инженерно-геологических исследований и организации сети регионального мониторинга опасных геологических процессов. На стадиях эксплуатации сооружений уточнение оценки интегрального риска может производиться по оперативным данным, полученным в ходе производственного (приватного) мониторинга. Логичность и системность построения используемого подхода,

детализированность всех этапов анализа, возможность получения рекомендаций, пригодных для принятия управленческих решений, определяют его как надёжный инструмент, направленный на снижение негативных воздействий неблагоприятных природных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Грохольский Н.С.* Научно-методические основы оценки интегрального риска экзогенных геологических процессов. Автореф. дис…. канд. геол.-минерал. наук. М.: Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ–РГГРУ), 2015. 22 с.
2. *Гужин Г.С., Нагалевский Ю.Я., Тюрин В.Н.* Атлас Краснодарского края и Республики Адыгея. Минск: Белгеодезия, 1996. 48 с.
3. *Измайлов Я.А., Полещук А.Т., Абрамов С.Е.* Отчёт о результатах регионального обследования экзогенных геологических процессов на территории Краснодарского края. Краснодар, Лазаревское: ПГО «СевКавгеология», Краснодарская ГРЭ, 1982. 211 с.
4. *Минаев В.А., Фадеев А.О.* Оценка геоэкологических рисков: моделирование безопасности туристско-рекреационных территорий. М.: Финансы и статистика; ИНФРА-М, 2009. 336 с.
5. *Нагалевский Ю.Я., Чистяков В.И.* Физическая география Краснодарского края. Краснодар: Северный Кавказ, 2003. 152 с.
6. *Стогний Г.А., Стогний В.В.* Сейсмичность Большого Кавказа с позиции блоковой делимости земной коры. Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2017. № 2. С. 86–95.

REFERENCES

1. *Grokholsky N.S.* Scientific and methodical bases of assessment of integrated risk of exogenous geological processes. Abstract diss…. PhD of geol.-mineral. sciences. Moscow: Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI-RGGRU), 2015. 22 p.
2. *Guzhin G.S., Nagalevsky Yu.Ya., Tyurin V.N.* Atlas of Krasnodar Krai and Republic of Adygea. Minsk: Belgeodesy, 1996. 48 p.
3. *Izmaylov Ya.A., Poleshchuk A.T., Abramov S.E.* The report on results of regional inspection of exogenous geological processes in the territory of Krasnodar Krai. Krasnodar, Lazarevskoe: PGA “SevKavgeologiya”, EE Krasnodarskaya, 1982. 211 p.
4. *Minayev V.A., Fadeyev A.O.* Assessment of geoenvironmental risks: modeling of safety of tourist and recreational territories. Moscow: Finances and Statistics; INFRA-M, 2009. 336 p.
5. *Nagalevsky Yu.Ya., Chistyakov V.I.* Physical geography of Krasnodar Krai. Krasnodar: North Caucasus, 2003. 152 p.
6. *Stogny G.A., Stogny V.V.* Seismicity of Greater Caucasus from a position of block divisibility of crust. Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation. 2017. No 2. P. 86–95.

УДК: 504.54 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-201-211**

Н.Г. Максимович[1], О.А. Березина[2], О.Ю. Мещерякова[3], А.Д. Деменев[4]

ИЗУЧЕНИЕ МИГРАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

АННОТАЦИЯ

Изучение закономерностей формирования и миграции техногенных донных отложений в речных экосистемах горнопромышленных районов является актуальным направлением работ отечественных и зарубежных исследователей в связи с высокой потребностью снижения техногенной нагрузки на природные компоненты окружающей среды. В представленном исследовании рассматриваются проблемы миграции загрязняющих веществ и формирования техногенных донных отложениях в речных экосистемах в районе Кизеловского угольного бассейна (Пермский край, Россия). Масштаб проблемы определяется существованием многочисленных источников, содержащих экстремально высокие концентрации элементов 1-го, 2-го и 3-го классов опасности.

Основными источниками поступления загрязняющих веществ на исследуемой территории являются кислые шахтные воды, разгружающиеся через бывшие горные выработки и родники, а также стоки с породных отвалов. Эти техногенные растворы характеризуются многокомпонентным составом, в которых отмечаются высокие концентрации следующих элементов: Fe, Al, Mn, Zn, Be, Cu, Pb, Cd и др. Превышение ПДК по некоторым элементам достигает сотни и тысячи раз; всего на территории бывшего Кизеловского угольного бассейна и в зоне его влияния, по разным оценкам, загрязнено более 500 км рек.

В статье приведена характеристика донных отложений р. Косьвы, одной из крупнейших региональных рек, по данным многолетних наблюдений 1984–2018 гг., натурных исследований, а также при применении ГИС-технологий и созданной геоэкологической геоинформационной системы Кизеловского угольного бассейна. Также на основе мирового опыта предложены природоохранные мероприятия для восстановления речных экосистем территории.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: промышленные регионы, гидросфера, донные отложения, тяжёлые металлы, шахтные воды

[1] ФГБОУВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, д. 15, 614990, Пермь, Россия; *e-mail:* **nmax54@gmail.com**
[2] ФГБОУВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, д. 15, 614990, Пермь, Россия; *e-mail:* **berezina.olga16@gmail.com**
[3] ФГБОУВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, д. 15, 614990, Пермь, Россия; *e-mail:* **olgam.psu@gmail.com**
[4] ФГБОУВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, д. 15, 614990, Пермь, Россия; *e-mail:* **demenevartem@gmail.com**

Nikolay G. Maksimovich[1], **Olga A. Berezina**[2], **Olga Yu. Meshcheriakova**[3], **Artem D. Demenev**[4]

RESEARCH OF MIGRATION OF TECHNOGENIC BOTTOM SEDIMENTS WITH APPLICATION OF MODERN GEOINFORMATION SYSTEMS

ABSTRACT

The study of the regularities of formation and migration of technogenic bottom sediments in river ecosystems of mining regions is an urgent area of works of domestic and foreign researchers in connection with the high need to reduce the anthropogenic impact on the natural components of the environment. This article is devoted to the problems of the migration of pollutants and the formation of technogenic bottom sediments in river ecosystems in the Kizel coal basin (Perm Region, Russia). The scale of the problem is determined by the existence of numerous sources containing extremely high concentrations of elements of the 1st, 2nd and 3rd hazard classes.

The main sources of contaminants on the study area are acid mine waters discharged through former mines and springs, as well as effluents from waste dumps. These technogenic solutions are characterized by a multicomponent composition, in which high concentrations of the following elements (Fe, Al, Mn, Zn, Be, Cu, Pb, Cd et al.) are noted. Exceeding the MPC for some elements reaches hundreds and thousands of times; in all, according to various estimates, over 500 km of rivers are polluted in the territory of the former Kizel coal basin and in the zone of its influence.

The article describes the characteristics of bottom sediments of the river Kos'va, one of the largest regional rivers, according to long-term observations from 1984−2018, field studies, as well as the use of GIS technologies and the created geo-ecological geoinformation system of the Kizel coal basin. Also, based on international experience, environmental measures were proposed to restore the river ecosystems of the territory.

KEYWORDS: industrial regions, hydrosphere, bottom sediments, heavy metals, mine water

ВВЕДЕНИЕ

Проблема миграции химических элементов в горнопромышленных районах стала предметом широких исследований в последней четверти прошлого века [*Blair et al.*, 1980; *Borman, Watson,* 1976; *Smith*, 1980]. Основными направлениями работ являются: оценка экологической опасности, которую представляют отходы производства, в т.ч. выносимые кислым дренажным потоком тяжёлые металлы; анализ механизмов миграции отходов и создаваемых ими экологических рисков; разработка методик очистки природной среды и элементов инфраструктуры от токсичных загрязнений [*Опекунов, Опекунова,* 2005; *Bortnikova et al.*, 2006; *Loop et al.*, 2003; *Ramstedt et al.*, 2003; *Uhlmann et al.*, 2004].

Изучение эпигенетических процессов в зоне гипергенеза [*Перельман,* 1972] привело к уточнению представлений об осадконакоплении и формированию понятия геохимических барьеров, обусловливающих наиболее интенсивное накопление различных химических элементов и в целом существенно влияющих на их пространственно-временное распределение.

Техногенез вызывает перестройку природных экосистем, приводя к появлению нетипичных для естественных условий новообразований, характеризуемых осаждением взвешенного вещества и химическими преобразованиями растворенных компонентов,

[1] Perm State University, Bukirev str., 15, 614990, Perm, Russia; *e-mail:* **nmax54@gmail.com**
[2] Perm State University, Bukirev str., 15, 614990, Perm, Russia; *e-mail:* **berezina.olga16@gmail.com**
[3] Perm State University, Bukirev str., 15, 614990, Perm, Russia; *e-mail:* **olgam.psu@gmail.com**
[4] Perm State University, Bukirev str., 15, 614990, Perm, Russia; *e-mail:* **demenevartem@gmail.com**

формирующих современные донные осадки. Так, например, изливы высокоминерализованных шахтных вод, возникающие на территории ликвидированных шахт Кизеловского угольного бассейна (КУБ) (восток Пермского края), существенно повышают долю техногенных донных отложений в водных объектах региона.

Активно накапливаются в донных отложениях тяжёлые металлы (ТМ). Этот процесс резко интенсифицировался в последние годы. В свою очередь, техногенные отложения такого рода могут вызвать вторичное интенсивное загрязнение, сыграв роль эффективного накопителя в определённых гидрологических и гидрохимических условиях.

Крайне актуально исследование процессов формирования и распространения вторичного загрязнения ТМ в промышленных регионах, характеризуемых поступлением в водные объекты больших объёмов недостаточно очищенных шахтных вод [*Тарасенко*, 2018; *Янин*, 2013].

Детальное изучение закономерностей распространения и накопления ТМ, сорбирующихся на микрочастицах в донных отложениях, и условий, способствующих формированию вторичного загрязнения водных экосистем, требует применения современных геоинформационных технологий. Следует отметить значительную важность исследования устьевых зон, где накопление донных отложений идёт ускоренными темпами в связи с изменениями гидродинамических характеристик. Гидрологическая сеть Пермского края, включающая крупные реки, притоки Камского водохранилища, формирующие крупные заливы, является одним из характерных примеров высокого содержания ТМ среди загрязнителей донных отложений.

Таким образом, исследование функционирования и преобразования техногенно загрязнённых водных экосистем в условиях антропогенного стресса, базирующееся на современных геоинформационных технологиях, представляет чрезвычайно актуальную научную и практическую задачу.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Характеристика состояния донных отложений р. Косьвы и источников их загрязнения составлена по результатам работ лаборатории геологии техногенных процессов Естественнонаучного института Пермского университета с 1984 по 2018 гг., по данным мониторинга, проводившегося «Уральским центром социально-экологического мониторинга углепромышленных территорий» в 2017–2018 гг. Также использованы фондовые и опубликованные материалы результатов исследований ООО «МНИИЭКО ТЭК» и др. организаций. При обработке и анализе информации использовались возможности современных геоинформационных технологий и результаты обработки данных ДЗЗ.

При анализе состояния донных отложений использованы фоновые значения, т.к. нормативов для оценки их экологического состояния не существует. Образцы были отобраны в аналогичных природных условиях и минимальном техногенном воздействии. При анализе химического состава донных отложений также учтены общие параметры, характерные для рек Пермского края: гидрокарбонатно-кальциевая фация, содержание солей менее 1 000 мг/кг и нормальная кислотность.

С учётом имеющихся данных, а также аппаратных и программных средств в рамках научного проекта № 17-05-41114 «Применение ГИС-технологий для оценки и прогноза экологической ситуации в угледобывающих районах с критической техногенной нагрузкой» при финансовой поддержке РФФИ и РГО, была создана геоэкологическая ГИС Кизеловского угольного бассейна и разработаны её функциональные возможности, позволяющие рассматривать данную веб-ГИС как один из инструментов организации экологического мониторинга исследуемой территории. Интерфейс доступа к ГИС организован в виде картографического веб-сервиса, расположенного в сети Интернет по адресу http://kub.maps.psu.ru. Более подробно с функциональными возможностями веб-

ГИС можно ознакомиться в статье [*Пьянков и др.*, 2019]. Слои источников загрязнения содержат информацию о более чем 130 отвалах, 19 изливах кислых шахтных вод и 11 загрязнённых родниках, существует информация о химическом составе донных отложений в разных точках пространства. Также для отвалов по космическим снимкам сверхвысокого разрешения подложки ESRI ArcGIS World Imagery создан полигональный векторный слой их контуров, а по ЦМР определено направление кислых стоков с них до ближайшего водотока, что позволило провести анализ изменения химического состава донных отложений р. Косьвы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее опасный в экологическом отношении для рек КУБа является осадок, образующийся химическим путем при повышении pH в результате смешения шахтных и речных вод. На загрязнённых участках рек ежесуточно образуются десятки тонн техногенных донных осадков, представленных в основном аморфными гидроксидами железа и алюминия с высоким содержанием марганца, меди, никеля, цинка, свинца и др. Он представляет собой взвесь, способную мигрировать вниз по течению рек на многие километры и оказывать негативное влияние на окружающую среду и качество водозаборов поверхностных вод. Этот осадок является источником вторичного загрязнения воды, т.к. содержит значительное количество подвижных форм микроэлементов, таких как марганец, алюминий, цинк, никель, кобальт и т.д. Частичная аккумуляция осадка происходит на всём протяжении сброса в береговой зоне и на участках с низкими скоростями течения воды. Однако в паводковый период происходит интенсивный смыв осадка. Зоной аккумуляции осадка являются приустьевые участки рек и прилегающая часть Камского водохранилища, наиболее крупный Косьвинский залив.

Косьва является левым притоком реки Камы. Длина реки — 283 км, площадь бассейна составляет 6 300 км^2. Исток и верхнее течение находится на западе Свердловской области. В верховьях течение имеет горный характер. Река Косьва, многоводная и быстрая весной, летом сильно мелеет. В Пермском крае река течёт по территории Александровского, Кизеловского, Губахинского и Добрянского районов. В посёлке Широковский на р. Косьве расположена плотина Широковской ГЭС и Широковское водохранилище площадью 41 км^2.

Бассейн р. Косьвы характеризуется интенсивным развитием карстовых процессов, которые определяют особенности стока поверхностных вод. Поверхностные формы карста представлены воронками, котловинами, карстовыми логами. Встречаются также пещеры и подземные реки. В естественных условиях поверхностный сток частично или полностью поглощается карстовыми воронками, образуя суходолы на значительных участках долины. Следуя по карстовым полостям, воды разгружаются в виде источников в долине реки.

Источниками поступления загрязняющих компонентов являются изливы шахт им. 1-го Мая, им. Крупской и объединённый излив шахт им. Калинина, им. Урицкого и Центральной (выход шахтных вод осуществляется через штольню шахты им. Калинина). Изливающиеся на поверхность шахтные воды имеют кислую реакцию среды и сульфатный состав. Воды характеризуются чрезвычайно высокими концентрациями железа, алюминия, берилла и марганца; их содержание в воде превышает ПДКхп зачастую более чем в 1 000 раз. Помимо изливов, непосредственными источниками загрязнения р. Косьвы являются притоки, загрязнённые воды которых, поступая в р. Косьву, дополнительно ухудшают её экологическое состояние. Общая длина загрязнённых от изливов водотоков составляет 130 км.

Постоянным источником загрязнения также являются породные отвалы. Таким источником загрязнения является породный отвал шахты им. Крупской, расположенный на берегу р. Косьвы. Несмотря на сравнительно небольшие объёмы стоков с породных

отвалов, их состав характеризуются очень высоким содержанием загрязняющих веществ (Fe, Al, Be и Mn) и крайне кислой реакцией среды.

В естественных условиях воды р. Косьвы и её притоков имеют гидрокарбонатно-кальциевый состав, реакцию среды, близкую к нейтральной, и минерализацию до 120 г/л Оценка качества поверхностных водотоков бассейна р. Косьвы показывает, что на участке интенсивного техногенного влияния воды р. Косьвы характеризуются кислой реакцией и стабильно высоким содержанием железа (4,9–36,3 мг/дм^3, что соответствует 49–363 ПДК$_{рх}$), повышенным содержанием алюминия, бериллия, марганца, а иногда и др. микроэлементов.

За счёт боковой приточности чистых вод и самоочищающей способности реки, в устьевой части р. Косьвы прослеживается улучшение качества вод: содержание солей (сухой остаток) изменяется в пределах 64–390 мг/дм^3; кислотность речных вод либо соответствует нормальной, либо слабокислой (pH 6,2–7,9); концентрации железа уменьшаются, оставаясь выше допустимого уровня (0,5–3,2 мг/дм^3 или 532 ПДК$_{рх}$) [*Максимович, Пьянков,* 2018].

Основные источники поступления высокоминерализованных кислых шахтных вод и, как следствие, образование техногенных донных отложений на водосборе р. Косьвы представлены на рис. 1.

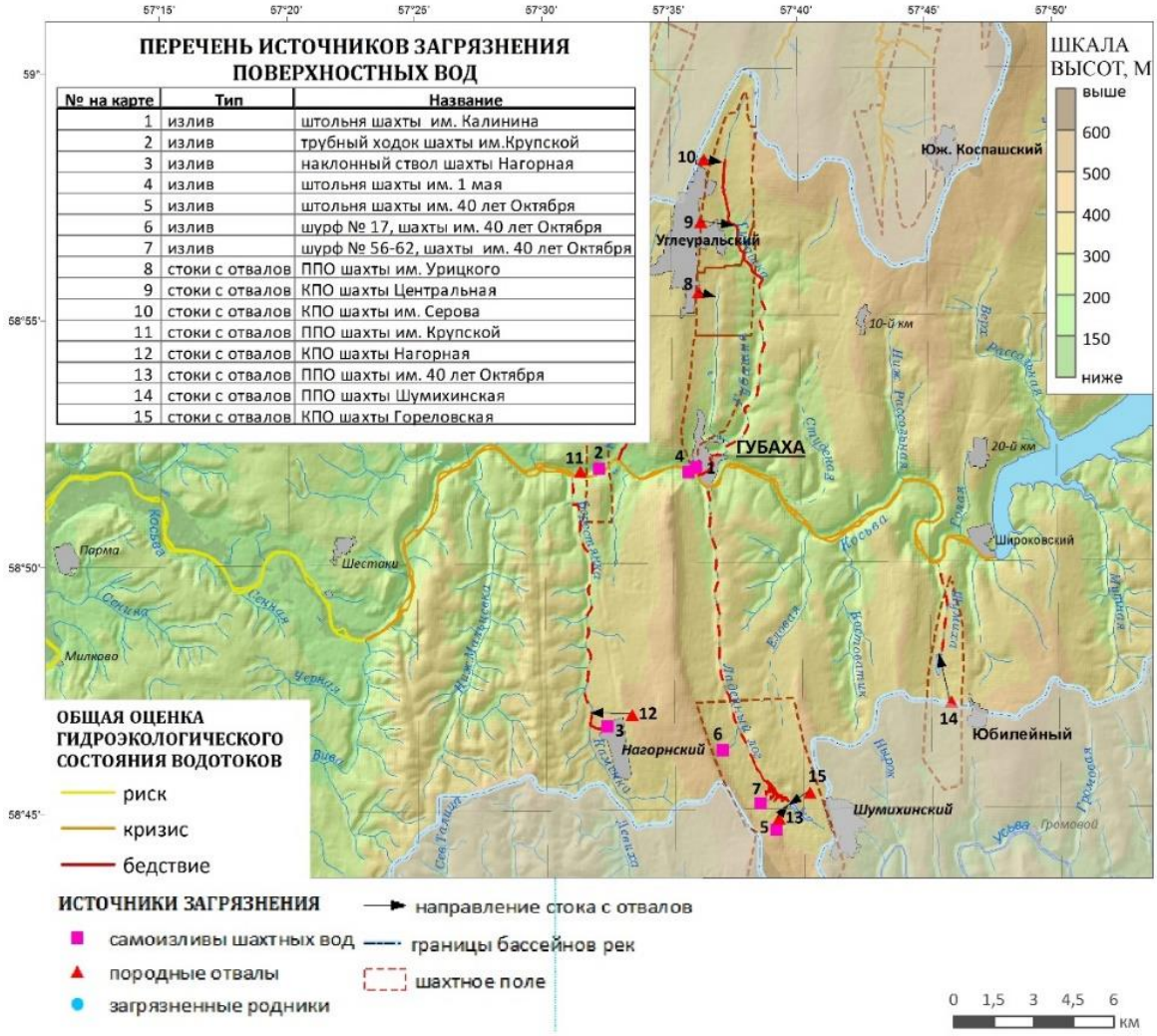


Рис. 1. Источники загрязнения поверхностных вод бассейна р. Косьвы
Fig. 1. Sources of surface water pollution in the basin of the Kos'va river

Основным источником загрязнения территории Кизеловского угольного бассейна являются кислые шахтные воды, разгрузка которых в основном происходит через бывшие горные выработки и родники. Кислые шахтные воды формируют более 90 % поступления загрязняющих веществ в окружающую среду, включая поверхностные воды и, следовательно, донные отложения. На территории исследований отмечено 19 изливов и 12 родников, где фиксируется разгрузка кислых вод. Средний объём разгрузки в последние годы составлял 25–30 млн м^3/год, содержание железа превышает ПДК до 16 000 р., алюминия — до 1 000 р., марганца — до 2 000 р., общая минерализация превышает ПДК до 2 200 р., показатель pH вод изменяется в пределах 2,3–4,5. Также значительный вклад (около 10 %) в формирование загрязнения поверхностных вод и донных отложений территории Кизеловского угольного бассейна вносят кислые стоки с породных отвалов. Всего выделено более 70 отвалов общим объёмом свыше 35 млн м^3, показатель pH формирующихся стоков с этих отвалов изменяется в пределах 2,3–3,7. При этом в результате угледобычи площадь нарушенных земель, требующих рекультивации, составляет не менее 500 га.

В фоновой точке наблюдения в составе песчаной фракции донных отложений на фоне доминирующего кварца (69,1 %) и значительного содержания карбонатов (11,4 %), наблюдается присутствие зёрен хлорита (2,0 %), амфиболов (1,8 %), эпидота (1,4 %), хромита (0,9 %), пироксенов (0,9 %), гематита (0,5 %), гидрогетита и лейкоксена (0,2 %). Водную вытяжку характеризуют гидрокарбонатно-кальциевый состав, содержание водорастворимых солей — 0,6 г/кг, pH 7,6. Железа и алюминия не обнаружено, либо их количество незначительно.

Рис. 2. Техногенный осадок в русле р. Косьвы ниже г. Губахи
Fig. 2. Technogenic sediment in the Kos'va river below Gubakha town

Последствия угледобычи прослеживаются по составу донных отложений р. Косьвы на значительном удалении от территории Кизеловского угольного бассейна, что подтверждают результаты опробования реки в с. Перемском. Здесь минеральный состав

донных отложений на 90 % представлен рентгеноаморфными гидроксидами железа оранжевого цвета; загрязнение ими заметно при визуальном наблюдении (рис. 2, 3). Содержание водорастворимых солей составляет 4,6 г/кг, что в 7,6 р. выше фонового. Вытяжка имеет гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевый состав, водородный показатель — нейтральный (7,3). Присутствует значительное количество сульфатов и железа. В донных отложениях увеличено содержание ряда микроэлементов не только по сравнению с фоновой точкой, но и в сравнении со створом, расположенным ниже г. Губахи (табл. 1, 2) [*Максимович, Пьянков*, 2018].

Рис. 3. Техногенный налёт на аллювиальных отложениях р. Косьвы
Fig. 3. Technogenic plaque on alluvial deposits of the Kos'va river

Табл. 1. Содержание микроэлементов в подвижной форме в донных отложениях р. Косьвы [Максимович, Пьянков, 2018]
Table 1. The content of trace elements in mobile form in the bottom sediments of the Kosva river [Maksimovich, Pyankov, 2018]

№ пробы	Место отбора	Содержание компонентов, мг/кг							
		Cd	Co	Li	Mn	Cu	Ni	Pb	Zn
26	100 м выше излива шахты им. 40 лет Октября	0,071	0,049	0,722	29,90	2,338	0,607	<0,050	2,731
29	Около ж/д моста Чусовой-Соликамск	0,109	0,706	0,070	283,62	4,593	5,614	0,808	3,260
48	Село Перемское	0,219	8,030	0,379	274,88	2,714	13,292	<0,050	22,91

Табл. 2. Результаты рентгеноструктурного анализа донных отложений р. Косьвы [Максимович, Пьянков, 2018]
Tab. 2. The results of x-ray analysis of bottom sediments of the Kos'va river [Maksimovich, Pyankov, 2018]

№ пробы	Минеральный состав, %									
	Кварц	Плагиоклаз	КПШ	Кальцит	Иллит + гидросл.	Каолинит	Смектит	Пирит	Гетит	РАВ
26	58	8	3	5	1	1	1	Сл	<1	88
28	20	2	1	–	4	5	3	–	–	65
29	20	4	1	–	3	3	2	–	<1	66
48	10	–	–	–	–	–	–	–	–	30

В составе донных отложений обнаруживаются опасные вещества, в т.ч. первого (чрезвычайно опасные) и второго (высоко опасные) классов опасности, что оказывает крайне негативное воздействие на гидробионты.

В поймах и руслах рек бассейна р. Косьвы накопилось огромное количество техногенных донных отложений, представленных в основном аморфными гидроксидами железа и алюминия, имеющими характерный рыжий цвет, — места их аккумуляции хорошо различимы на космоснимках (рис. 4).

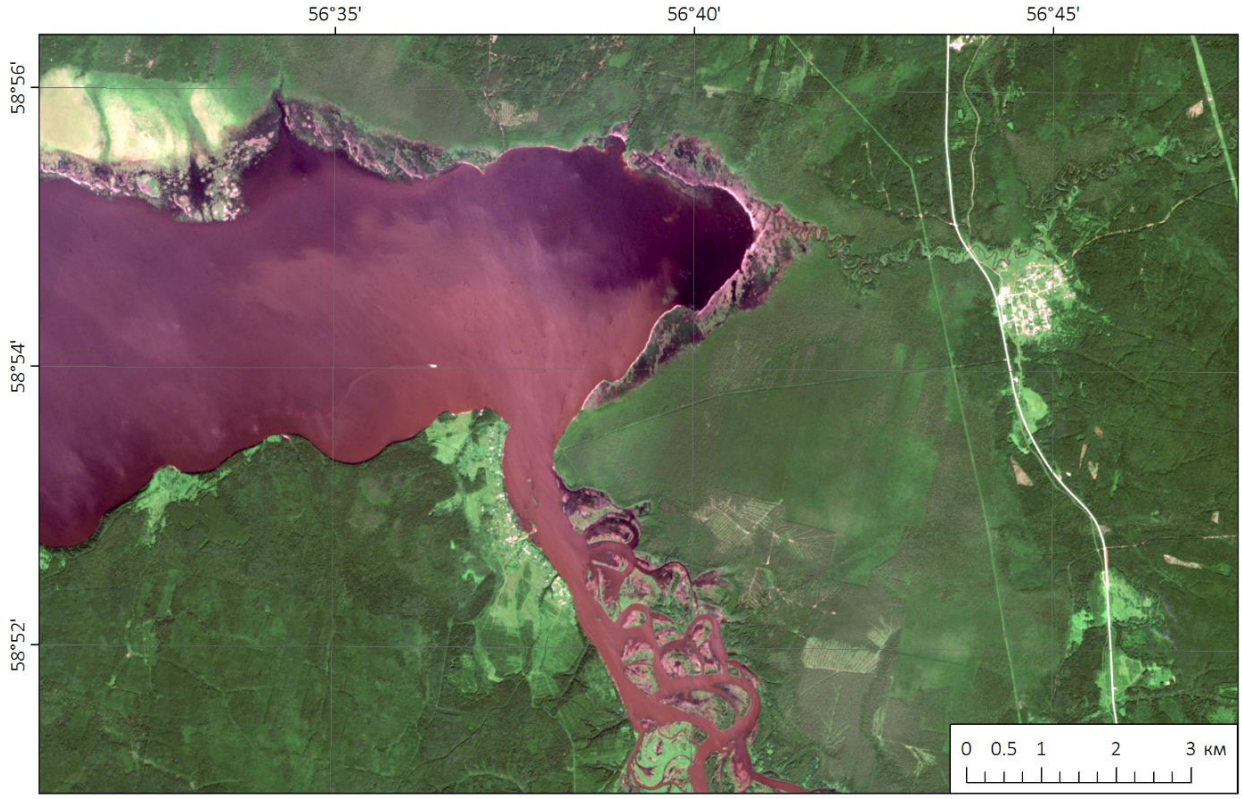


Рис. 4. Загрязнённая техногенными осадками устьевая часть р. Косьвы
Fig. 4. The estuary part of the Kos'va River contaminated by technogenic sediments

Для оценки загрязнения пойм использовались космические снимки со спутников серии LANDSAT за период максимального подъёма уровня воды при прохождении весеннего половодья (был использован снимок за 23.05.1998). Для построения «маски» воды был использован алгоритм неуправляемой классификации снимка IZODATA по ближнему и среднему инфракрасным каналам (в которых водная поверхность успешно отделяется от всех объектов суши). Площадь, занимаемая руслом реки в летний период, оценивалась по топографическим картам м-ба 1:1 000 000. Путём вычитания площади водной поверхности в весенний и летний периоды была определена зона сезонного затопления. Общая площадь территории, подверженной затоплению загрязнёнными водами в бассейне р. Косьвы, составляет 770 га.

ВЫВОДЫ

Таким образом, донные отложения гидрологической сети КУБа состоят в основном из гидроокислов железа и алюминия с высоким содержанием микроэлементов и оказывают резко отрицательный эффект на водные экосистемы. В донных отложениях рек встречаются частицы отвалов и содержатся высокие концентрации подвижных в водной среде компонентов, представляя собой источник вторичного загрязнения рек.

Мировой опыт добавления в русло рек на ряде объектов измельчённого доломитового или чистого известняка при восстановительных работах на водотоках, в которые поступают кислые шахтные воды, показало, что это благоприятно влияет на химический состав и приводит в конечном итоге к восстановлению экосистем. Он перераспределяется вследствие энергии потока вниз по течению, нейтрализуя кислые шахтные воды.

Подобный метод подходит для восстановления экосистем рек КУБа. Применение щелочных реагентов целесообразно для нейтрализации кислых техногенных отложений и, соответственно, снижения подвижности железа, алюминия и тяжёлых металлов. В случае большой мощности техногенного осадка можно говорить о его консервации путём перекрытия щелочным реагентом и созданием своеобразного геохимического барьера, препятствующего вторичному загрязнению рек[1] [*Khayrulina et al.*, 2016].

В дальнейшем планируется на основании анализа всех источников загрязнения с помощью современных технологий, в т.ч. разработанной ГИС КУБ, и построения профилей изменения уклонов реки более детально изучить миграцию техногенных донных отложений как источника вторичного загрязнения с построением гидродинамических моделей, а также выделить оптимальные места добавления в поток реки щелочных реагентов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-50073 «Микрочастицы тяжёлых металлов в гидросфере промышленных районов: идентификация источников, закономерности миграции и накопления, экологический риск».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, project number 19-05-50073.

[1] *Максимович Н.Г.* Использование геохимических барьеров для очистки изливов кислых вод Кизеловского угольного бассейна. Инженерная геология, 2011. Сентябрь. С. 20–25

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Бессонова Е.П.* Геохимия техногенных систем. Новосибирск: Академическое издательство “Гео”, 2006. 169 с.
2. *Максимович Н.Г., Пьянков С. В.* Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения: монография. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. университет, 2018. 288 с.
3. *Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г.* Геохимические последствия влияния отходов башкирского медно-серного комбината на окружающую среду. Сергеевские чтения. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы утилизации и захоронения отходов. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М.: ГЕОС, 2005. Вып. 7. С. 162–167.
4. *Перельман А.И.* Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра, 1972. 287 с.
5. *Пьянков С.В., Березина О.А., Абдуллин Р.К., Тарасов А.В.* Геоэкологическая ГИС ликвидированного Кизеловского угольного бассейна: информационное наполнение и функциональные возможности. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2019. Т. 25. Ч. 1. С. 308–319. DOI: http://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-1-25-308–319.
6. *Тарасенко И.А.* Геохимические особенности состава и закономерности формирования подземных вод в природно-техногенных гидрогеологических структурах районов ликвидированных угольных шахт. М.: ГЕОС, 2018. 247 с.
7. *Янин Е.П.* Техногенные речные илы (вещественный состав, геохимические особенности, экологическая оценка). М.: ВИНИТИ РАН, 2013. 196 с.
8. *Blair R.D., Cherry J.A., Lim T.P., Vivyurka A.J.* Groundwater monitoring and contaminant occurance at an abandoned tailings area, Eliot Lake, Ontario. Proceedings of 1st International conference Uranium Mine Waste Disposal, May 19–21, 1980, Vancouver, British Columbia, Canada. Society of Mining Engineers of AIME. P. 911–944.
9. *Borman R.S., Watson D.M.* Chemical processes in abounded sulfide tailings dumps and environmental implications for Northeastern New Brunswick. Canadian Inst. Mining and Metallurgical Bulletin, 1976. V. 69. No 772. P. 86–96.
10. *Khayrulina E., Khmurchik V., Maksimovich N.* The Kizel Coal Basin (the Western Urals, Russia): Environmental problems and solutions. Mining Meets Water — Conflicts and Solutions. Proceedings IMWA 2016 Annual Conference, Freiberg, Germany, 2016. P. 761–767.
11. *Loop C.M., Scheetz B.E., White W.B.* Geochemical evolution of a surface mine lake with alkaline ash addition: field observations vs. laboratory predictions. Mine Water and the Environment, 2003. V. 22. No 4. P. 206–213.
12. *Ramstedt M., Carlsson E., Lovgren L.* Aqueous geochemistry in the Udden pit lake, Northern Sweden. Applied Geochemistry, 2003. V. 18. P. 97–108.
13. *Smith R.J.* Swifter action sough on food contamination. Science, 1980. V. 207. Iss. 4427. P. 163. DOI: 10.1126/science.6765994.
14. *Uhlmann W., Buttcher H., Totsche O., Steinberg C.* Buffering of acidic mine lakes: the relevance of surface exchange and solid-bound sulphate. Mine Water and the Environment, 2004. V. 23. P. 20–27.

REFERENCES

1. *Blair R.D., Cherry J.A., Lim T.P., Vivyurka A.J.* Groundwater monitoring and contaminant occurance at an abandoned tailings area, Eliot Lake, Ontario. Proceedings of 1st International conference Uranium Mine Waste Disposal, May 19–21, 1980, Vancouver, British Columbia, Canada. Society of Mining Engineers of AIME. P. 911–944.
2. *Borman R.S., Watson D.M.* Chemical processes in abounded sulfide tailings dumps and environmental implications for Northeastern New Brunswick. Canadian Inst. Mining and

Metallurgical Bulletin, 1976. V. 69. No 772. P. 86–96.
3. *Bortnikova S.B., Gas'kova O.L., Bessonova E.P.* Geochemistry of Technological Systems. Novosibirsk: Academic Publishing House «GEO», 2006. 169 p.
4. *Khayrulina E., Khmurchik V., Maksimovich N.* The Kizel Coal Basin (the Western Urals, Russia): Environmental problems and solutions. Mining Meets Water — Conflicts and Solutions. Proceedings IMWA 2016 Annual Conference, Freiberg, Germany, 2016. P. 761–767.
5. *Loop C.M., Scheetz B.E., White W.B.* Geochemical evolution of a surface mine lake with alkaline ash addition: field observations vs. laboratory predictions. Mine Water and the Environment, 2003. V. 22. No 4. P. 206–213.
6. *Maksimovich N.G., Pyankov S.V.* Kizel coal basin: environmental problems and solutions: a monograph. Perm: Perm University, 2018. 288 p. (in Russian).
7. *Perelman A.I.* Geochemistry of elements in the zone of hypergenesis. Moscow: Nedra, 1972. 287 p. (in Russian).
8. *Opekunov A.Yu., Opekunova M.G.* Geochemical consequences of the waste of the Bashkir copper-sulfur plant on the environment. Sergeyev readings. Engineering-geological and geoecological problems of waste disposal and burial. Proceedings of the Annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology. Iss. 7. Moscow: GEOS, 2005. P. 162–167 (in Russian).
9. *Pyankov S.V., Berezina O.A., Abdullin R.K., Tarasov A.V.* Geoecological GIS of the liquidated Kizel coal basin: information content and functionality. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2019. V. 25. Part 1. P. 308−319. DOI: http://doi.org/ 10.35595/2414-9179-2019-1-25-308-319 (in Russian, abs English).
10. *Ramstedt M., Carlsson E., Lovgren L.* Aqueous geochemistry in the Udden pit lake, Northern Sweden. Applied Geochemistry, 2003. V. 18. P. 97−108.
11. *Smith R.J.* Swifter action sough on food contamination. Science, 1980. V. 207. Iss. 4427. P. 163. DOI: 10.1126/science.6765994.
12. *Tarasenko I.A.* Geochemical features of the composition and patterns of groundwater formation in natural and technogenic hydrogeological structures of the areas of liquidated coal mines. Moscow: GEOS, 2018. 247 p. (in Russian).
13. *Uhlmann W., Buttcher H., Totsche O., Steinberg C.* Buffering of acidic mine lakes: the relevance of surface exchange and solid-bound sulphate. Mine Water and the Environment, 2004. V. 23. P. 20–27.
14. *Yanin E.P.* Technogenic river silts (material composition, geochemical features, environmental assessment). Moscow: VINITI RAS, 2013. 196 p. (in Russian).

УДК: 911.2 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-212-223**

Е.С. Зелепукина[1], С.А. Гаврилкина[2], Г.В. Пряхина[3]

ПРИМЕНЕНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ОЧАГОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОПАСНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ГОР ЮЖНОЙ СИБИРИ)

АННОТАЦИЯ

Зафиксированные следы схода селевых потоков свидетельствуют об изменении селевого режима в низкогорьях и среднегорьях Западного Саяна и обусловливают необходимость пересмотра степени селевой опасности региона. Анализ природных и антропогенных предпосылок усиления селевой деятельности показал приоритетное влияние последних.

Установлено отсутствие значимых отклонений значений показателей интенсивности осадков от нормы. Выявлено, что сход небольших по размеру селей на склонах средней крутизны является результатом совместного действия различных видов хозяйственной деятельности. Возникновению селевой опасности в бассейнах малых рек способствуют открытые разработки полезных ископаемых, сопутствующие дорожно-строительные работы, формирующие значительные объёмы рыхлого материала, а также сплошная рубка леса. В результате последней происходит активизацией склоновых процессов вследствие нарушения стабилизирующей функции растительного покрова.

Деградация таёжного пояса вызвана преимущественно масштабными лесозаготовительными работами, проводимыми в регионе более полувека. Показано, что при незначительном снижении показателя общей залесённости произошли серьёзные изменения структуры лесного покрова, что сказывается на интенсивности эрозионных процессов и увеличении твёрдого стока рек на протяжении нескольких десятилетий.

Предложен комплексный подход для выявления потенциальных селевых очагов, включающий применение дистанционных методов обнаружения зон техногенного воздействия, морфометрический анализ водосборов, подверженных значительному антропогенному нарушению, оценку площадей трансформированных территорий, анализ временной изменчивости гидрометеорологических характеристик, динамики ландшафтной структуры. В связи с недостаточной обеспеченностью кадастровой информацией о параметрах почвенно-растительного покрова соответствующего масштаба, необходимо проведение полевых исследований на ключевых участках, направленных на актуализацию имеющейся базы данных.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Западный Саян, селевые потоки, антропогенная трансформация ландшафтов

[1] ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, пр. Большевиков, д. 22, 193232, Санкт-Петербург, Россия; *e-mail:* **elezelepu@gmail.com**

[2] ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Университетская наб., д. 7–9, 199034, Санкт-Петербург, Россия; *e-mail:* **svetilnic@mail.ru; s.gavilkina@spbu.ru**

[3] ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Университетская наб., д. 7–9, 199034, Санкт-Петербург, Россия; *e-mail:* **g.pryahina@spbu.ru**

Elena S. Zelepukina[1], **Svetlana A. Gavrilkina**[2], **Galina V. Pryakhina**[3]

AN APPLICATION OF GIS TECHNOLOGIES FOR IDENTIFYING THE POTENTIAL FOCI OF OCCURRENCE OF HAZARDOUS HYDROLOGICAL PHENOMENA (BY THE EXAMPLE OF MOUNTAINS OF SOUTHERN SIBERIA)

ABSTRACT

Captured evidences of debris flows declare the obvious changes of mudflow regime in the West Sayan midland and lowland areas and require the need to review the levels of regional hazard risk. The analysis of natural and man-made preconditions of debris flows increasing revealed the priority impact of the last ones.

The absence of meaningful deviations from the normal of precipitation intensity targets was identified. It has been found that small debris flows on the middle grade of steepness slopes are a result of the combined activity of the different economic activities. Surface mining, associated road construction work, forming considerable amount of free of loose material, and active logging as well all contribute to emergence of debris flows hazard in basins of small rivers. The disruption of plant cover stabilizing role lead to the intensification of slope erosion processes.

Taiga belt degradation was caused mainly by the large logging lasted in the region more than half a century. It is shown, that a slight decrease in the general forest cover has led to a serious changes of forest structure, which affects the intensity of slope erosion processes and increase in the sediment loads in rivers for several decades.

A comprehensive approach to identify potential hotbeds of debris flows was proposed. It comprises the use of remote techniques in detection of human impact areas, morphometric analysis of watersheds affected by a large anthropogenic disturbance, assessment of areas under transformation, analysis of the temporal variability of hydro-meteorological characteristics and landscape structure dynamics. Due to the lack of availability of cadastral information of vegetation, soil and slope characteristics at an appropriate scale there is a need for more field research in key areas aimed at updating of the existing database.

KEYWORDS: West Sayan ridge, debris flow, anthropogenic landscape transformation

ВВЕДЕНИЕ

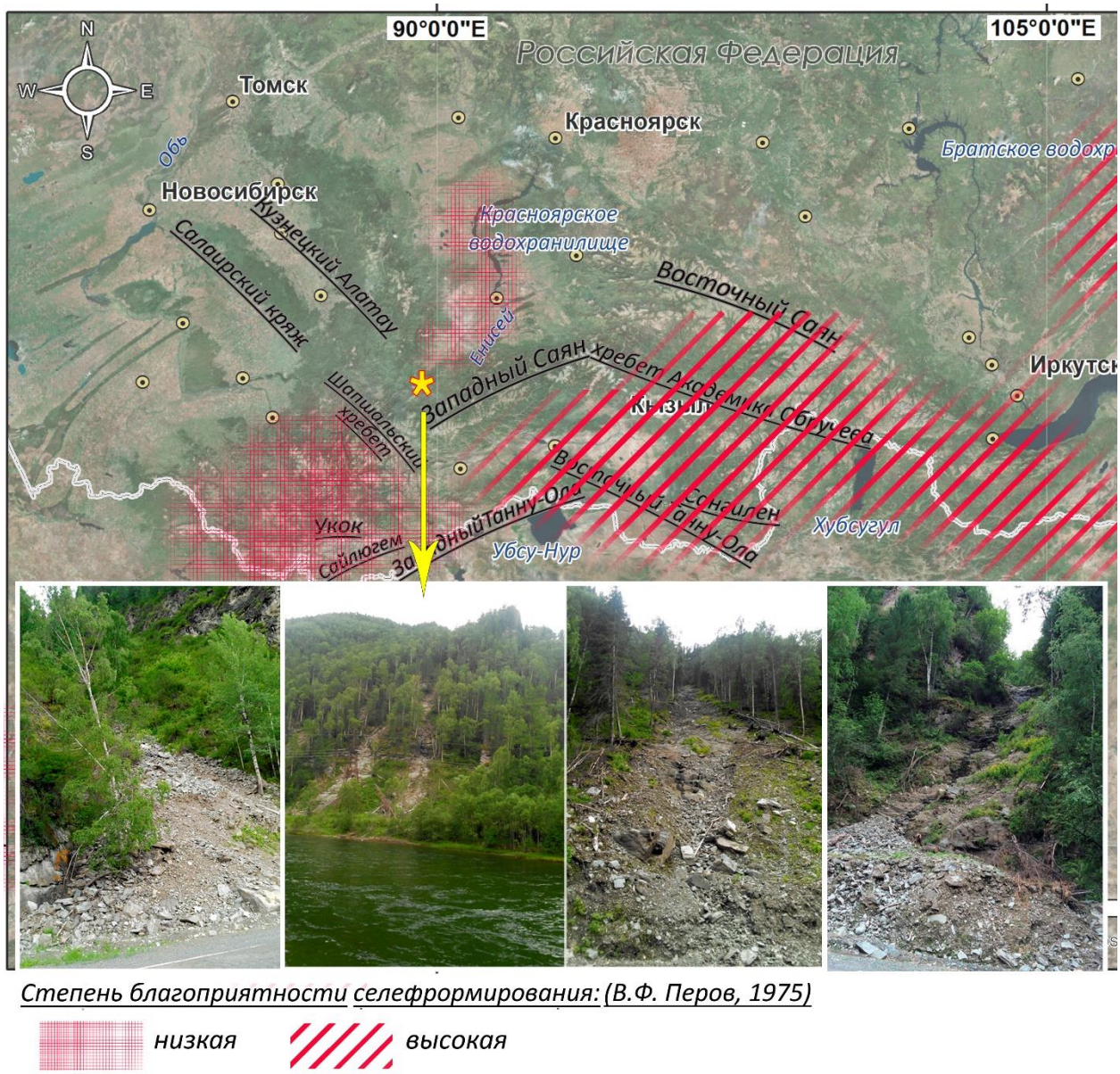
Растущая хозяйственная активность в горных районах юга Сибири, помимо несомненной экономической выгоды, приводит к увеличению числа техногенных аварий, влекущих за собой не только значительные материальные потери, но и в отдельных случаях человеческие жертвы. Это диктует необходимость как ужесточения контроля качества технического исполнения и эксплуатации инженерных сооружений, так и расширения работ по научно обоснованному выявлению районов с повышенной потенциальной опасностью возникновения природных явлений, таких как сели, наводнения и др., трудно прогнозируемых в силу ряда объективных причин (редкая сеть постов режимных наблюдений, скудность эмпирических материалов, труднодоступность и малоизученность многих районов, внезапность проявлений и пр.).

[1] Federal State Budget-Financed Educational Institution of Higher Education “The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications”, Bolsheviki Ave, 22, 193232, St. Petersburg, Russia; *e-mail:* **elezelepu@gmail.com**

[2] Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Universitetskaya quay, 7−9, Russia, 199034, St. Petersburg, Russia; *e-mail:* **svetilnic@mail.ru; s.gavilkina@spbu.ru**

[3] Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Universitetskaya quay, 7−9, Russia, 199034, St. Petersburg, Russia; *e-mail*: **g.pryahina@spbu.ru**

В процессе всестороннего изучения природных условий региона, особенно с точки зрения увеличения числа повторяемости опасных гидрологических явлений, ведущая роль принадлежит междисциплинарным исследованиям. Согласно районированию селеопасных территорий [*Перов*, 1976], горы юга Сибири характеризуются средней степенью селеопасности только на Алтае и Восточном Саяне, а территория Западного Саяна в целом вообще не относится к селеопасным районам. Однако в ходе комплексных полевых исследований в бассейне р. Абакан были зафиксированы многочисленные следы сходов небольших селевых потоков (рис. 1).



Степень благоприятности селефрормирования: (В.Ф. Перов, 1975)

низкая высокая

Рис. 1. Район исследований с наложенной картой районирования по условиям селеформирования (обозначены места схождения селевых потоков)*
*Fig. 1. Investigated region with overlaid map of zoning by the terms of debris flow forming (debris flows occurance areas marked as *)*

При изучении структуры и интенсивности селевых потоков широко применяются современные компьютерные технологии и геоинформационные методы [*Baltakova et al*., 2018; *Jun Xu et al*., 2017; *Melelli, Taramelli*, 2004]. Однако в вопросах, связанных с оценкой селевой опасности и изменения селевой активности отдельных регионов, необходимо объединение усилий специалистов различных направлений. Для разработки стратегии хозяйственного развития и принятия управленческих решений требуются регионально обоснованные междисциплинарные исследования. Изменение селевого режима территории может быть вызвано действием как природных, так и антропогенных факторов. Соответственно, выявление причин возникновения нехарактерных для территории низко- и среднегорных частей хребта Западный Саян опасных гидрологических явлений представляется первостепенной задачей. В связи с этим целью настоящего исследования является разработка подходов к выявлению потенциальных очагов возникновения опасных гидрологических явлений в горных районах юга Сибири на основе ГИС-технологий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом послужили данные полевых исследований, полученные авторами в ходе комплексных экспедиций в горах юга Сибири в 2011–2017 гг., включающие, помимо нескольких сотен ландшафтных описаний, измеренных значений ряда гидрологических характеристик и параметров почвенно-растительного покрова, зафиксированные последствия схождения селей на участке действующей автомобильной трассы Абаза–Ак-Довурак.

Оценка роли климата в изменении режима селеопасности региона в настоящей работе приведена по результатам предыдущих исследований авторов и литературным данным.

Выбор ключевого участка основывался на непосредственных полевых наблюдениях авторов. Основные ландшафтно-гидрологические и ландшафтно-динамические характеристики региона исследований получены авторами ранее. В частности, в результате гидрологического моделирования с использованием данных режимных гидрометеорологических наблюдений с суточным разрешением и параметров почвенно-растительного покрова была оценена роль отдельных однородных участков бассейнов, называемых стокоформирующими комплексами (СФК), в формировании интегрального стока водосборов. Выделение СФК, т.е. дифференциация территории по величине уклонов, составу подстилающих пород, степени дренированности, наличию почвенно-растительного покрова, типу растительных сообществ и др., проводилось на основе ландшафтной карты (масштаб 1:5 00 000), составленной авторами. База данных для каждого стокоформирующего комплекса включает регионально обоснованные диапазоны значений таких параметров модели, как максимальные/минимальные значения сезонной затенённости кронами деревьев, ёмкости перехвата осадков всеми ярусами растительности, альбедо и др., полученных с учётом видового состава и проективного покрытия каждого яруса. При моделировании водно- и теплофизических процессов в почве для каждого расчётного слоя глубиной 0.1 м задавались параметры в соответствии с характеристиками почвы, полученными по полевым описаниям почвенных разрезов, включая рассчитанные по данным непосредственных измерений значения коэффициентов фильтрации.

Выявление площадей лесных массивов, подверженных серьёзному антропогенному нарушению, проводилось на основе сопряжённого анализа разновременных космических

снимков, находящихся в открытом доступе. Для морфометрического анализа использовалась цифровая модель рельефа с разрешением 1 угл. сек[1].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Относительно небольшие размеры выявленных селевых очагов (ширина потока, размер селеактивной площади, объём выноса и пр.) не позволяют отнести зафиксированные сели к сейсмогенным при том, что Саяны в целом характеризуются достаточно высокой сейсмической активностью.

В целом на территории Западного Саяна участки высокогорий, занятые каменными или щебнистыми осыпями (сланцев, серпентинитов и др.) с отсутствующим или плохо развитым почвенно-растительным покровом, занимают относительные малые площади. Иными словами, морфологические и морфометрические характеристики рельефа большинства водосборных бассейнов региона (абсолютные и относительные высоты, уклоны, локальность распространения рыхлых, несцементированных отложений и др.) можно назвать малоблагоприятными для формирования селей.

Как известно, климатический фактор определяет не только возникновение, но и частоту повторяемости опасных гидрологических явлений. В Алтае-Саянском регионе за период с 1961 по 2012 гг. тренд к незначительному увеличению количества атмосферных осадков отмечен только для внутригорных котловин (Минусинской и Тувинской), тогда как в среднегорье, напротив, наблюдается сокращение годовых сумм осадков: на северо-западе Республики Тыва (метеостанция Мугур-Аксы), а также в Хемчикской котловине [*Андрейчик*, 2010]. На этом фоне в регионе наблюдается рост суточных сумм осадков [*Харламова,* 2013]. Учитывая, что возникновение опасных гидрологических явлений в большей степени определяется осадками ливневого характера, а на азиатской части территории России интенсивность ливней в начале XXI в. увеличилась [*Семёнов,* 2012], для Алтае-Саянского региона в качестве количественных характеристик интенсивных осадков использовались следующие индексы, предложенные Всемирной метеорологической организацией: R10 (количество дней с осадками не ниже 10 мм) и max5 (максимум сумм осадков тёплого периода, выпадающих в течение 5 дней подряд, способных вызвать переувлажнение почв и грунтов и, как следствие, связанные с ними особо опасные явления).

В многолетнем ходе максимума скользящих 5-дневных сумм осадков прослеживается уменьшение этого показателя на 5 станциях, расположенных на высотах от 254 до 1 404 м. Выявлена значительная изменчивость индикатора переувлажнения — показателя R10 от года к году, а также разнонаправленный характер продолжительности интенсивных осадков в низкогорьях (ст. Минусинск) и среднегорьях (ст. Оленья речка).

Отметим, что предварительный анализ суточных сумм осадков по метеостанции Щетинкино также не выявил существенных превышений показателей перед катастрофичным прорывом плотины, случившимся в Курагинском районе Красноярского края на р. Сейба осенью 2019 г.

Таким образом, увеличение в регионе количества опасных гидрологических явлений нельзя объяснить изменениями природных процессов без детального анализа роли антропогенного фактора.

В исследуемом районе основными видами хозяйственной деятельности, оказывающими прямое воздействие на природные комплексы на наибольших площадях, являются горнодобывающая и лесная промышленность.

[1] Using the USGS Landsat & Product / United States Geological Survey official website. Электронный ресурс: https://lpdaac.usgs.gov (дата обращения 24.05.2019)

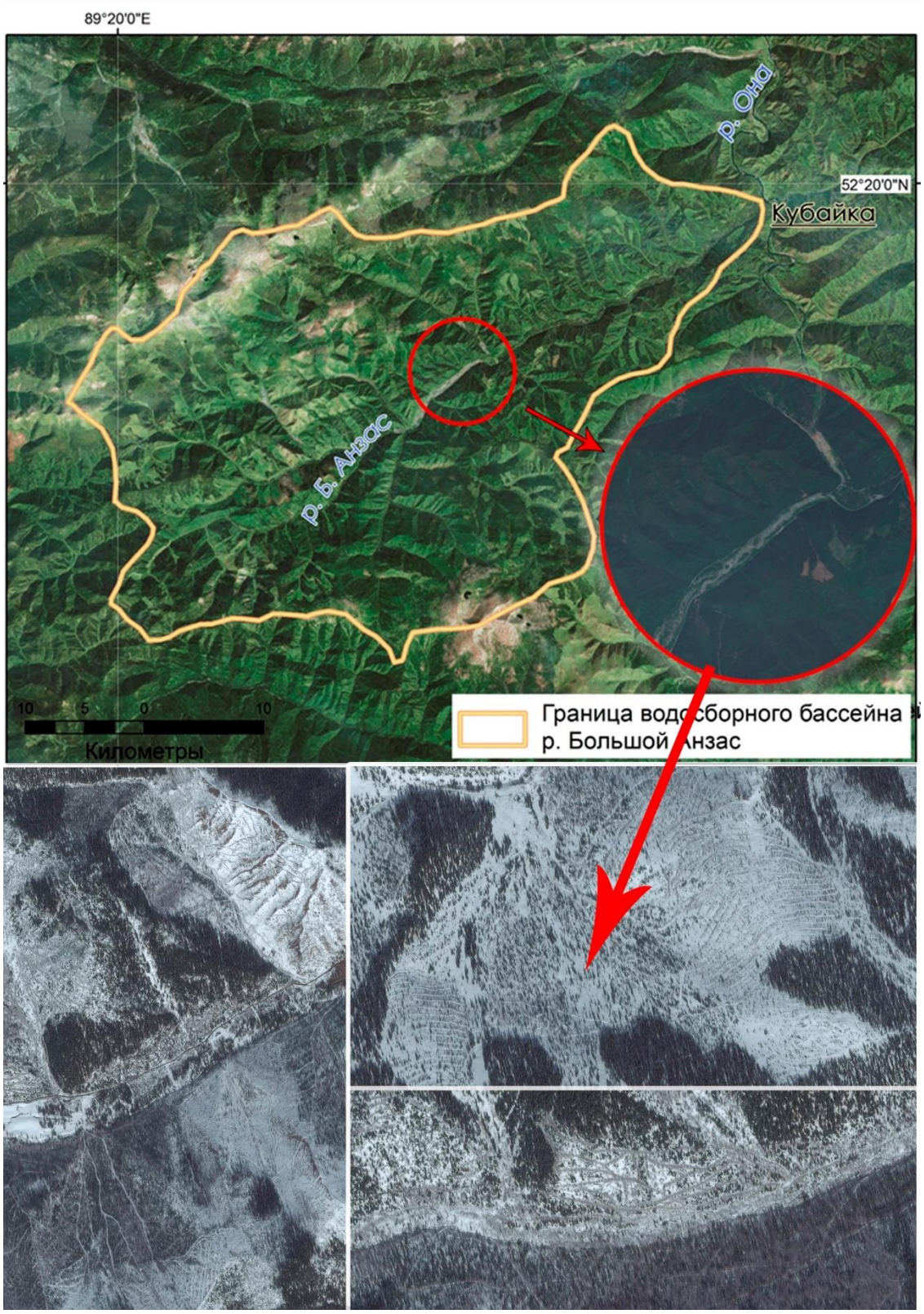


Рис. 2. Вверху — водосборный бассейн р. Б. Анзас, хребет Шаман (круглая врезка — трансформация русла в ходе добычи открытым способом, 2016 г.; внизу — отчётливые следы сведения растительного покрова на склонах долины, 2019 г.)

Fig. 2. On the top — the catchment area of B. Anzas river, Shaman ridge (round box — riverbed transformation during the open pit mining, 2016; on the bottom — visible marks of deforestation on the valley slopes, 2019)

Сведение лесных массивов в горах неминуемо сказывается на активизации эрозионных процессов и увеличении твёрдого стока рек, находящихся в прямой связи с лесистостью бассейна и структурой лесного покрова.

Исследования динамики ландшафтов Западного Саяна показали заметные изменения структуры таёжного пояса с началом масштабных рубок во второй половине прошлого века: значительное сокращение площадей темнохвойных кустарничково-зеленомошных лесов в среднегорьях и особенно кедровых разнотравных лесов в низкогорьях, которые в настоящее время замещены производными мелколиственными и хвойно-мелколиственными разнотравными лесами, представляющими собой различные стадии послерубочных и постпирогенных сукцессий.

Хотя соотношение лесопокрытых и безлесных территорий в регионе в целом изменилось незначительно, сам факт схождения многочисленных небольших по объёму селевых потоков свидетельствует об изменении режима селеопасности. Добавим, что в силу развития технологии лесозаготовок в последние десятилетия рубкам подвергаются леса на склонах крутизной более 15°, что в наибольшей степени ускоряет развитие склоновых процессов.

Коренные темнохвойные леса характеризуются хорошо развитым подлеском и моховым покровом, выполняющими важную регулирующую и противоэрозионную функцию: древесная растительность армирует субстрат корневой системой, а лесная подстилка, отличающаяся большой водопроницаемостью и водопоглотительной способностью, замедляет и уменьшает поверхностный сток, переводя значительную его часть во внутригрунтовый и защищая таким образом склоны от размыва.

Вторичные лиственные леса в роли регуляторов стока значительно уступают коренным хвойным. Это связано с особенностями корневых систем, структурой и составом напочвенного покрова, сезонными колебаниями проективного покрытия древесного полога и др. В первые годы после рубок до 60 % от суммы атмосферных осадков переходит в сток; но даже спустя 20–30 лет (на мелколиственной стадии восстановительных сукцессий) стабилизирующая функция леса полностью не восстанавливается [*Буренина и др.*, 2011]. В силу этого на склонах, пройденных сплошными рубками более десяти лет назад, велика вероятность формирования относительно небольших потоков с различной величиной селевых выносов. Характерная для многих селей, локализованных вдоль эрозионных ложбин, повышенная повторяемость, очевидно, связана со временем восстановления стабилизирующей функции исходных лесов.

Результаты модельных расчётов продемонстрировали отличия значений гидрологических характеристик стока для лесов, различающихся по составу, сомкнутости древостоя, характеру напочвенного покрова, выраженностью и крутизной склонов. Выявлено приоритетное значение в формировании годового стока безлесных участков: в пересчёте на единицу площади наибольшие модули и коэффициенты стока характерны для гольцовых и тундрово-луговых комплексов, что связано с низкими фильтрационными свойствами щебнистого покрова поверхностных отложений [*Пряхина и др.*, 2020].

Выявленные в Таштыпском районе Хакасии селевые очаги, расположенные в целом вдали от мест добычи полезных ископаемых открытым способом, иллюстрируют последствия опосредованного влияния лесозаготовок на изменение режима селеопасности. Наибольшую опасность представляет совместное однонаправленное действие нескольких антропогенных факторов. В этом случае возникает угроза не только для объектов инженерной инфраструктуры, но и для жилых построек населённых пунктов. Так, например, в нескольких километрах от пос. Кубайка в 2016 г. было отмечено существенное повышение мутности воды, связанное с проведением

горнодобывающих работ в долине р. Большой Анзас (левый приток р. Она). Добыча руды открытым способом в среднем течении реки, помимо полного уничтожения почвенно-растительного покрова в прирусловой части, привела к основательной трансформации формы и уклона долины и склонов и образованию большого объёма рыхлого материала. В тот же период склоны долины, занятые спелым темнохвойным лесом, были разбиты на делянки и размечены под рубки на десятки км^2 ниже по течению от места добычи полезных ископаемых в долине. По состоянию на 2019 г. (рис. 2) уже произведены значительные площадные рубки на участках, примыкающих к очагу техногенного воздействия. Столь масштабное сведение леса на территории небольшого водосборного бассейна (площадью ~ 540 км^2) неизбежно скажется на увеличении поверхностного стока, что, учитывая запас имеющегося рыхлого материала, делает долину потенциально селеопасной даже при незначительных уклонах главного русла реки: резко возрастает вероятность прорыва грунтовых плотин, не рассчитанных на существенное увеличение стока с территории водосборного бассейна (за счёт увеличения модуля стока с обезлесенных территорий) при интенсивных осадках.

При оценке селевой опасности территории представляется целесообразным применение комплекса методов смежных дисциплин. Принимая во внимание размах и продолжительность лесозаготовительных работ в горах юга Сибири, в первую очередь необходимо выявить территории с полностью или частично уничтоженным лесным покровом на основе дешифрирования космических снимков.

Затем, в зависимости от поставленной задачи, следует определить конкретные водосборные бассейны, для которых будет проводиться оценка вероятности схода селей. В пределах этих водосборов необходимо выявить участки, где был сведён лес, вследствие чего произошла серьёзная трансформация гидрологических характеристик территории; определить площади, где будет наблюдаться усиление денудации, скорость которой напрямую связана с высотой и крутизной склонов, а также резкое увеличение поверхностного стока.

В связи с тем, что, по нашему мнению, в условиях высокой степени антропогенного преобразования таёжного пояса показатель «лесистости» при оценке селеопасности территории недостаточно информативен, в пределах водосборных бассейнов следует определять не только долю лесопокрытой территории, но и соотношение производных и условно коренных лесов. Это особенно важно при долгосрочных оценках, т.к. гидрологические характеристики нарушенных комплексов меняются в течение длительного периода вслед за изменениями параметров почвенно-растительного покрова (рис. 3). Регионально обоснованные параметры стокоформирующих комплексов, а также необходимость учёта локальных факторов формирования и перераспределения стока приведены в [*Пряхина и др.,* 2020].

Далее для территорий, подвергнутых значительному изменению структуры древостоя в ходе рубок или пожаров (рис. 4 a), необходим детальный анализ морфометрических характеристик долин водосборных бассейнов (общая площадь и форма бассейна, распределение площадей по высотным интервалам, уклон рельефа на склонах, уклон главного русла, густота речной сети и глубина расчленения) с применением цифровых моделей рельефа высокого разрешения (рис. 4 b, c).

Считаем важным добавить, что для некоторых нарушенных участков, выбранных в качестве ключевых, в ходе экспедиционных исследований обязательно должны быть уточнены характеристики почвенно-растительного покрова, влияющие на гидрологический режим конкретного бассейна и прилегающих территорий.

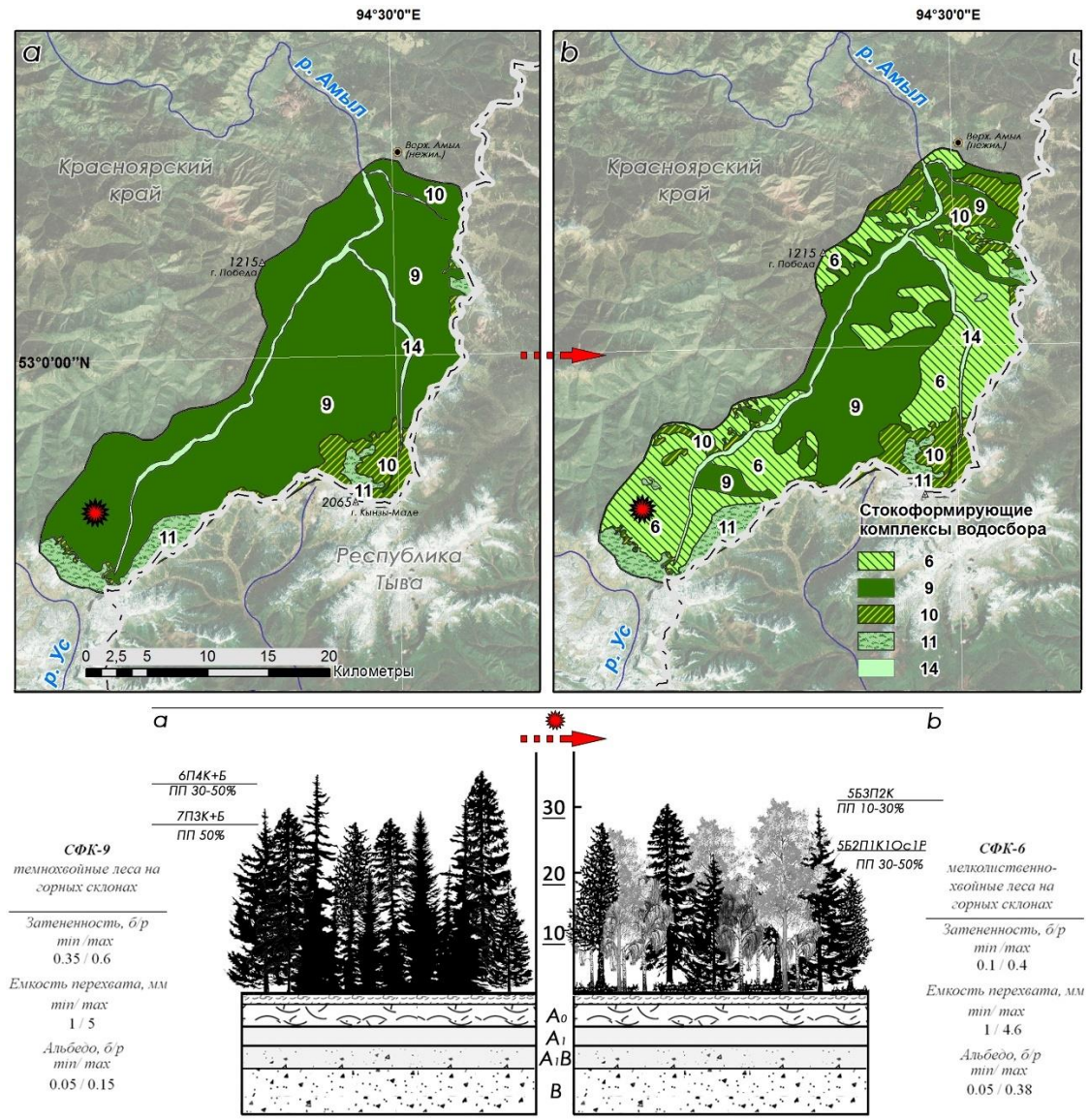


Рис.3. Трансформация ландшафтной структуры и параметров стокоформирующих комплексов верхней части бассейна р. Амыл (приток р. Туба)
Вверху — усложнение пространственной структуры территории в ходе лесовосстановительных сукцессий: а — реконструкция коренного состояния; б — современное состояние. Цифрами обозначены стокоформирующие комплексы: 6 — мелколиственно-хвойные леса на среднекрутых склонах; 9 — темнохвойные леса на среднекрутых склонах; 10 — редкостойные темнохвойные леса на среднекрутых склонах; 11 — среднегорные луга и тундры; 14 — долинные мелколиственные и хвойные леса.
Внизу: параметры почвенно-растительного покрова коренных (СФК-9) и производных (СФК-6) лесов. В числителе дроби формула древостоя, в знаменателе — проективное покрытие (по ярусам)
Fig. 3 Transformation of landscape structure and runoff forming complexes characteristics of the upper Amil river basin (tributary of the Tuba river)
On the top — complication of spatial structure during the forest succession: a — reconstruction of the initial conditions; b — current state. Runoff forming complexes are marked by numerals: 6 — parvifoliate-coniferous forests on the middle grade of steepness slopes; 9 — coniferous forests on the middle grade of steepness slopes; 10 — light coniferous forests on the middle grade of steepness slopes; 11 — middle highland meadows and tundra; 14 — valley small-leaved and coniferous forests

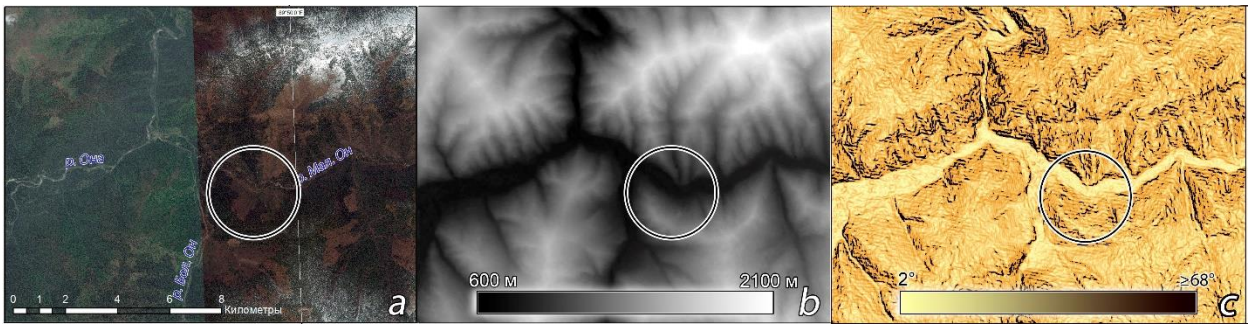


Рис. 4. Применение ландшафтно-гидрологического подхода при оценке селеопасности: a — снимок; b — цифровая модель рельефа; c — модель уклонов (выделен участок сплошной вырубки)
Fig. 4 Landscape-hydrological approach to evaluation of debris flows risk: a — space shot; b — digital elevation model; c — model of gradient pattern (clear cutting areas are marked)

ВЫВОДЫ

Анализ природных и антропогенных факторов селеобразования показал, что в семигумидных условиях низко- и среднегорий Западного Саяна формирование селей является следствием деградации таёжного пояса, вызванной многолетними лесозаготовительными работами. В условиях активной горно-долинной циркуляции летние ливневые осадки хотя и носят очаговый характер, но, выпадая над нарушенными ландшафтами, приводят к образованию новых селевых очагов.

Целесообразность применения ландшафтно-гидрологического и ландшафтно-динамического подходов при выявлении потенциальных селевых очагов и прогнозе изменения режима селеопасности территории связана с длительностью процессов восстановления стокорегулирующих функций растительного покрова.

Применение ГИС-технологий при анализе селеопасности небольших водосборных бассейнов, подверженных антропогенной трансформации, позволит не только выявить районы, где достаточными превентивными мерами будут лесовосстановительные работы и научно-обоснованная организация лесозаготовок, но и локализовать участки, где уже остро обозначилась необходимость возведения селезадерживающих и селеотводящих сооружений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 19-05-00535 А.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, grant No 19-05-00535 A.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андрейчик М.Ф.* Изменение индекса континентальности на фоне потепления климата в Тувинской горной области. Оптика атмосферы и океана, 2010. Т. 23. № 1. С. 1–6.
2. *Балтакова А., Николова В., Кендерова Р., Христова Н.* Применение ГИС и данных дистанционного зондирования для анализа селевых потоков на примере изучения восточных предгорий Пирина (Болгария). Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Труды 5-й Международной конференции. Тбилиси, Грузия, 1−5 октября 2018 г. Тбилиси: Универсал, 2018. С. 22–32.

3. *Буренина Т.А., Овчинникова Н.Ф., Федотова Е.В.* Изменение структуры водного баланса на вырубках черневой тайги Западного Саяна. География и природные ресурсы, 2011. № 1. С. 92–100.
4. *Перов В.Ф.* Районирование селеопасных территорий СССР. Селеопасные районы Советского Союза. М.: Издательство Московского университета, 1976. С. 287–293.
5. *Пряхина Г.В., Зелепукина Е.С., Гаврилкина С.А., Соловьёв В.А., Амбурцева Н.И., Виноградова Т.А.* Пространственная структура формирования стока на основе математического моделирования. Известия РАН. Серия географическая, 2020. Т. 84. № 2. С. 218–227.
6. *Пряхина Г.В., Зелепукина Е.С., Журавлёв С.А., Осипова Т.Н., Амбурцева Н.И., Виноградова Т.А.* Оценка стока с малых горных водосборов методами гидрологического моделирования. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2017. № 1. С. 29–37.
7. *Семёнов В.А.* Климатообусловленные изменения повторяемости и взаимосвязь опасных гидрометеорологических явлений на азиатской территории России. Климатология и гляциология Сибири. Материалы международной научно-практической конференции. Томск, 2012. С. 274–276.
8. *Харламова Н.Ф.* Оценка и прогноз современных изменений климата Алтайского региона. Барнаул: Издательство Алтайского государственного университета, 2013. 156 с.
9. *Jun Xu J., Cheng X., Huang Q., Chen Y., Qi W., Yuan J., Yang J.* Susceptibility evaluation of debris flow based on experience weight method combined with “3S” technology: A case study from Dongchuan in Yunnan Province, China. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017. V. 95. Iss. 2. P. 022051. DOI: 10.1088/1755-1315/95/2/022051.
10. *Melelli L., Taramelli A.* An example of debris-flows hazard modeling using GIS. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2004. No 4. P. 347–358. DOI: https://doi.org/10.5194/nhess-4-347-2004.

REFERENCES

1. *Andrejchik M.F.* Change of the continentality index in the context of a warming climate in Tyva mountains. Atmospheric and Ocean Optics, 2010. V. 23. No 1. P. 1–6 (in Russian).
2. *Baltakova A., Nikolova V., Kenderova R., Hristova N.* Application of GIS and remote sensing for analysis of debris flows: case study of western foothills of Pirin mountains (Bulgaria). Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection: Proceedings of the 5th International Conference. Tbilisi: Universal, 2018. P. 22–32 (in Russian).
3. *Burenina T.A., Ovchinnikova N.F., Fedotova E.V.* Transformation of the water balance components in cutover areas and in derivative forests of the Western Sayan. Geography and Natural Resources, 2011. No 1. P. 92–100 (in Russian).
4. *Jun Xu J., Cheng X., Huang Q., Chen Y., Qi W., Yuan J., Yang J.* Susceptibility evaluation of debris flow based on experience weight method combined with “3S” technology: A case study from Dongchuan in Yunnan Province, China. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017. V. 95. Iss. 2. P. 022051. DOI: 10.1088/1755-1315/95/2/022051.
5. *Kharlamova N.F.* Evaluation and forecast of modern climate changes of the Altai region. Barnaul: Publishing House of Altai State University, 2013. 156 p. (in Russian).
6. *Melelli L., Taramelli A.* An example of debris-flows hazard modeling using GIS. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2004. No 4. P. 347–358. DOI: https://doi.org/10.5194/nhess-4-347-2004.
7. *Perov V.F.* Zoning of debris flows-affected areas of USSR. Debris flows-affected areas of Soviet Union. Moscow: Moscow State University Press, 1976. P. 287–293 (in Russian).
8. *Prjahina G.V., Zelepukina E.S., Gavrilkina S.A., Solov’ev V.A., Amburceva N.I., Vinogradova T.A.* Mathematical modeling of runoff formation spatial structure. Izvestia RAN. Seriya

Geograficheskaya (Proceedings of the RAS. Geographical Series), 2020. No 2. P. 218–227 (in Russian).
9. *Prjahina G.V., Zelepukina E.S., Zhuravljov S.A., Osipova T.N., Amburceva N.I., Vinogradova T.A.* The assessment of run-off from small mountain watersheds by hydrologic modelling. Herald of Moscow University. Series 5. Geography, 2017. No 1. P. 29–37 (in Russian).
10. *Semenov V.A.* Climate conditioned changes of recurrence and relationship of hydro-meteorological hazards on the Asia territory of the Russian Federation. Climatology and glaciology of Siberia. Proceedings of the International conference. Tomsk, 2012. P. 274–276 (in Russian).

УДК: 911.3 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-224-239**

Т.А. Ткачёва[1]

ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕПРЕЗЕНТАЦИИ ОБРАЗА СЕВЕРНОГО КАВКАЗА В СОЦИАЛЬНЫХ МЕДИА

АННОТАЦИЯ

В работе обоснована актуальность географического исследования образа территории в социальных медиа с помощью современных онлайн-технологий.

Выявлены основные специфические особенности социальных медиа, которые прямо или косвенно влияют на методику и результаты анализа образов территории. Сравнительный анализ возможностей различных информационно-аналитических мониторинговых систем социальных медиа позволил выбрать одну из них как наиболее адекватную исследовательским задачам. Информационную основу исследования составила авторская база данных, сформированная на основе мониторинга социальных медиа средствами информационно-аналитической системы «Медиалогия» за период с 1 июня по 30 августа 2019 г.

В результате проведённого исследования были установлены основные социально-демографические параметры аудитории социальных сетей, география и контекст публикуемых сообщений о Северном Кавказе, выявлены наиболее популярные субъекты Северо-Кавказского федерального округа, определены площадки, на которых Северо-Кавказский макрорегион упоминается чаще всего. Представленный графический и картографический материал иллюстрирует информационную неоднородность и неравенство отдельных территорий Северного Кавказа в медиапространстве России. Полученные данные свидетельствуют о преобладании негативной тональности в восприятии северо-кавказских территорий и доминировании отрицательных черт в его образе. Ментальная репрезентация Северного Кавказа во многом формируется под влиянием «информационного давления» двух регионов — Дагестана и Чечни, с которыми и ассоциируется в большинстве случаев весь Северный Кавказ. Существенных взаимосвязей между восприятием территорий и географическими параметрами мест концентрации пользователей социальных медиа установить не удалось. Наметилась некоторая зависимость между удалённостью, известностью и уровнем позитивности образа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: образ территории, Северный Кавказ, социальные медиа, информационно-аналитические системы

Tatyana A. Tkacheva[2]

GEOGRAPHICAL ANALYSIS OF THE REPRESENTATION OF THE IMAGE OF THE NORTH CAUCASUS IN SOCIAL MEDIA

ABSTRACT

The paper substantiates the relevance of studying the image of the territory in social media using modern online technologies.

[1] Северо-Кавказский федеральный университет, Институт математики и естественных наук, ул. Пушкина, д. 1, 355017, Ставрополь, Россия; *e-mail*: **tatianasurneva@yandex.ru**

[2] North-Caucasus Federal University, Institute of Mathematics and Natural Science, Pushkin str., 1, 355017, Stavropol, Russia; *e-mail*: **tatianasurneva@yandex.ru**

The main specific features of social media that directly or indirectly affect the methodology and results of the analysis of images of the territory are identified. The comparative analysis allowed us to determine the information and analytical system for monitoring social media that is most adequate to research tasks. The information base of the study was compiled by the author's database, formed on the basis of social media monitoring of the information and analytical system Medialogia for the period from June 1 to August 30, 2019.

The study revealed the socio-demographic characteristics of users, the geography and context of messages about the North Caucasus published in social networks. The most popular subjects of the North Caucasus Federal district in social media were identified, and the sites where the North Caucasus macroregion is most often mentioned were identified. A variety of cartographic material is presented, reflecting quantitative differences in the degree of information representation of individual territories of the North Caucasus in the regions of Russia and its tone. The obtained data indicate the predominance of a negative tone in the perception of the North Caucasus territories and the dominance of negative features in its image. The mental representation of the North Caucasus is formed under the influence of the "information pressure" of two regions — Dagestan and Chechnya, with which the entire North Caucasus is associated, in most cases, significant relationships Between the perception of territories and the geographical parameters of places of concentration of social media users could not be established. There is a certain relationship between distance, fame and the level of positivity of the image.

KEYWORDS: image of the territory, the North Caucasus, social media, information and analytical systems

ВВЕДЕНИЕ

Любые географические объекты трансформируются в ментальных представлениях населения в виде географических образов. Когда тот или иной географический объект вовлекается в систему культуры, он приобретает топоним и образ, становится символом, отражающим его наиболее характерные особенности, представляющиеся символичными в системе ценностей данной культуры [*Чихичин*, 2006]. Прежде всего, это определяется наличием пространственных маркеров, вызывающих ассоциации, связанные с конкретным географическим объектом, в результате чего создается географический образ.

Лаконичное, но ёмкое и точное определение географического образа предложено Д.Н. Замятиным: «Географический образ — система взаимосвязанных и взаимодействующих знаков, символов, архетипов и стереотипов, ярко, и в то же время достаточно просто характеризующих какую-либо территорию (место, ландшафт, регион, страну)» [*Замятин*, 2010]. Опираясь на это определение, можно заключить, что каждый географический образ является неким синтезом исторически обусловленных культурно-цивилизационных представлений, однозначно привязанных к реальным участкам земного пространства, т.е. географический образ — это прежде всего образ территории.

Образ территории — достаточно устойчивый феномен, который тем не менее может изменяться под влиянием разнообразных факторов, и который можно целенаправленно формировать. Основу возникновения образа территории составляет определённая пространственно-ориентированная информация, фиксируемая в коллективных мыслеформах.

Очевидно, что объём и количество информации в нынешнем мире растут в геометрической прогрессии. Большинство известных авторов современных социальных теорий отмечают исключительную значимость информации в трансформации общественных систем: Д. Белл (теория постиндустриального общества) [*Bell*, 1999], постмарксист Э. Гидденс (теория рефлексивной модернизации) [*Giddens*, 1998],

М. Кастельс (теория информационального капитализма) [*Castells,* 1996–1998], постмодернист Ж.-Ф. Лиотар [*Lyotard,* 1993].

Растёт интерес к поиску и анализу больших массивов информации и среди географов. Появляются интересные географические исследования, основанные на данных различных Интернет-ресурсов, например, Google Panoramio [*Грибок,* 2018], Google Trends [*Грибок, Горбунова,* 2019], социальные медиа [*Тикунов и др*. 2018], поисковые сервисы [*Tikunov et al.,* 2018]. Особую актуальность приобретают исследования потоков разнородной информации, влияющей на формирование образов территорий. Так, Д.Н. Замятин в качестве индикатора перехода к информационному обществу указывает на «возникновение особых виртуальных информационных пространств, анаморфированных, по сравнению с реальными политическими, культурными и экономическими географическими пространствами, и отличающихся огромной событийной и операционной ёмкостью, которые будут оказывать решающее воздействие на основные события, структуры действий и контуры мироустройства XXI века» [*Замятин,* 2003]. Другой известный российский учёный В.А. Колосов, отмечая, что «в наш век бурного развития средств массовой коммуникации представления о мире заменяют сам мир», обращает внимание на необходимость анализа не только структуры, взаимосвязей и взаимодействия представлений людей о разных территориях, но и выявления закономерностей и современных факторов формирования этих представлений [Мир…, 2003].

В современных реалиях одним из важнейших факторов формирования представлений о географических объектах становятся социальные медиа, приобретающие массовый характер и неуклонно вытесняющие другие формы информационного воздействия. К настоящему времени сложилось несколько подходов к определению понятия «социальные медиа». В данном исследовании социальные медиа рассматриваются как «группа Интернет-приложений, которые основываются на идеологических и технологических основах Web 2.0 и позволяют создавать пользовательский контент и обмениваться им» [*Kaplan, Haenlein,* 2010]. Социальные медиа включают в себя: блоги, бизнес-сети, корпоративные сети, фото- и видеошеринги, сайты обзоров и отзывов, социальные игры, социальные сети, виртуальные миры, а также многие другие разновидности онлайн-ресурсов. Отметим, что часто понятия «социальные медиа» и «социальные сети» употребляются как синонимы, но на самом деле социальные сети являются лишь частной разновидностью социальных медиа.

На сайтах популярных социальных медиа зарегистрировано более 400 млн пользователей. В России аккаунты в социальных сетях и других видах социальных медиа имеют около 70 млн чел. В 2017 г. среднестатистический пользователь проводил на социальных площадках 2,2 ч/сут[1]. Большую популярность получили блоги о путешествиях, городской среде и градостроительстве. На страницах пользователей в самых разных контекстах ежедневно упоминается великое множество географических объектов. Миллионы публикаций имеют географическую привязку («геотэг»), что делает возможным отслеживание географии сообщений.

Большое количество российских территорий (регионов, отдельных поселений) имеют аккаунты в социальных сетях. У многих городов, кроме официальной, имеются и неофициальные страницы, например, новостные или рекламные. Активное обсуждение в социальных сетях различных региональных проблем, природно-экологических, историко-культурных особенностей, социально-экономических и политических процессов, протекающих в реальном пространстве, мощно воздействует на их репрезентацию в общественном сознании.

[1] Отчёт The State of Social 2018, подготовленный Social Media Week. Электронный ресурс: https://blog.bufferapp.com/state-of-social-2018 (дата обращения 08.08.2019)

Таким образом, социальные сети становятся важнейшим источником актуальной информации для географического анализа образов территорий.

Целью данной работы является выявление особенностей репрезентации образа Северного Кавказа в социальных медиа с помощью инструментальных средств информационно-аналитических систем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Социальные медиа как индикатор и транслятор образа той или иной территории имеют ряд специфических характеристик, которые необходимо учитывать при использовании данного ресурса для географического анализа:

- высокая скорость обновления информации;
- оперативность (мгновенное реагирование);
- отсутствие пространственных ограничений;
- большие объёмы информации;
- неструктурированность информации;
- различные форматы преставления информации — текст, цифровые изображения, видеоролики, аудиозаписи;
- субъективность оценочных характеристик;
- преобладание определённых возрастных параметров пользователей;
- широкий охват аудитории.

Учёт всех вышеперечисленных параметров делает практически невозможным сбор информации и формирование баз данных «вручную». Удобным инструментом становятся специализированные системы мониторинга социальных медиа или информационно-аналитические системы (ИАС) (табл. 1).

Табл.1. Характеристика систем мониторинга социальных медиа
Table 1. Characteristics of social media monitoring systems

Система мониторинга	**Источники информации**	**Функции**	**Возможность анализа географии авторов сообщений и аудитории**	**Географический объект в качестве объекта анализа**	**Удобство работы с АИС (субъект. оценка авторов, 1−10 баллов)**
YouScan[1]	Популярные социальные сети, сайты отзывов, десятки тысяч форумов и блогов, включая нишевые и региональные, онлайн-СМИ. Возможность добавить любой соцмедиа источник существует	Функция формирования индивидуальных аналитических отчётов, определение тональности, фильтрация спама, автокатегории	Только авторов сообщений	Да	8
Brand Analytics[2]	Социальные сети, блоги, форумы, сайты отзывов, мессенджеры, онлайн-СМИ, сайты госучреждений, рынко-	Сбор возможен, по ключевым словам, по геометкам, по избранным авторам и группам без учёта ключевых слов. Сообще-	Только авторов сообщений	Нет	7

[1] Система мониторинга соцмедиа «YouScan». Электронный ресурс: https://www.youscan.ru. (дата обращения 13.12.2019)
[2] Система мониторинга соцмедиа «Brand Analytics». Электронный ресурс: https://www.brandanalytics.ru. (дата обращения 13.12.2019)

	образующих компаний и организаций	ния дополняются метаданными и информацией об их авторах. На основе найденных и проанализированных сообщений система строит наглядные отчёты с графиками и таблицами			
IQBuzz[1]	Обрабатывает информацию из более чем 10000 источников онлайн-СМИ и социальных сетей	Функция «анализ мнения». Возможность использования функции «Ретроспектива сроком до 10 лет». Услуги аналитика, который помогает настроить поисковой запрос	Нет	Нет	6
Babkee[2]	Все популярные социальные медиа-сообщения. Ограничение до 3000 сообщений в сутки, до 2 объектов поиска	Уникальный параметр оценки значимости сообщения. Формирование отчётности на основе данных об авторе. Экспертная поддержка	Только об авторе	Нет	4
Крибрум[3]	20 тыс. онлайн-СМИ, 300 тыс. роликов, 7 млн блогов, 250 млн аккаунтов в соцсетях	Автоматический алгоритм позволяет оценивать эмоциональную окраску высказываний и выстраивать интерактивные отчёты. Система отсеивает спам-сообщения и те, в которых предмет анализа упоминается вскользь	Только авторов сообщений	Да	8
Semantic Force [4]	Онлайн-СМИ — 250000 изданий; Соц. сети: Facebook, ВКонтакте, Google plus, Одноклассники; форумы и тематические ресурсы; блоги и микроблоги	Возможны экспорт в Excel, поиск внутри темы, контекстные выборки, сложные запросы, заметки к упоминаниям, категоризация документов по рубрикам	Да	Да	7
Медиалогия[5]	900 млн аккаунтов соцмедиа, более 100 млн сообщений ежедневно, эксклюзивный мониторинг TikTok, WhatsApp, Tor ресурсы. Нет ограничений по количеству сообщений для мониторинга и анализа	Работа в режиме реального времени. Сложносоставные поисковые запросы с любым набором правил. Подробные аналитические отчёты в текстовой, табличной и/или графической форме. Возможность их экспорта в любом удобном редакторе	Да	Да	9

[1] Система мониторинга соцмедиа «IQBuzz». Электронный ресурс: https://www.iqbuzz.ru. (дата обращения 13.12.2019)
[2] Система мониторинга соцмедиа «Babkee». Электронный ресурс: https://www.babkee.ru. (дата обращения 13.12.2019)
[3] Система мониторинга социальных СМИ «Крибрум». Электронный ресурс: https://www.kribrum.ru (дата обращения 13.12.2019)
[4] Система мониторинга соцмедиа «SemanticForce». Электронный ресурс: https://www.semanticforce.ru (дата обращения 13.12.2019)
[5] Система мониторинга и анализа СМИ и соцмедиа «Медиалогия». Электронный ресурс: https://www.medialogia.ru (дата обращения 13.12.2019)

Несмотря на очевидную маркетинговую ориентацию всех представленных ИАС, они вполне могут быть использованы в целях географического исследования, в частности географического анализа образа территории. Их сравнительное тестирование показало, что для решения географических задач наиболее целесообразно использование ИАС «Медиалогия». Так как помощью данного ресурса возможно получение ряда показателей, позволяющих выявить основные позиции территории в ментальном пространстве:

- количество и динамика сообщений о территории;
- количество упоминаний с различной эмоционально-ценностной окраской (позитивной, негативной, нейтральной);
- степень информационной важности события, привязанного к данной территории;
- степень вовлечённости аудитории в обсуждение территориальной проблематики;
- социально-демографические параметры пишущей аудитории (пол, возраст, семейное положение, образование);
- полимасштабность публикаций (количество публикаций о территориях разного пространственного уровня: поселение, район, регион);
- степень популярности фраз, хештегов, характеризующих территорию.

Выбранная ИАС обеспечивает возможности сопоставления различных пространственно-ориентированных данных, их группировки, обобщения, выявления корреляций между показателями.

Географический анализ образа Северного Кавказа в социальных медиа был проведён за три летних месяца 2019 г. Очевидно, что этот период слишком короток для получения всестороннего детального образа Северного Кавказа, однако для апробации методики исследования и получения предварительных данных его следует считать достаточным.

Для наиболее эффективного и репрезентативного анализа была разработана и протестирована система поисковых запросов, а затем сформирована база данных, включающая в себя различные характеристики исследуемой территории. В базу данных вошли все сообщения с упоминанием словосочетания «Северный Кавказ» (во всех лингвистических формах), а также сообщения с упоминанием названий субъектов Северо-Кавказского федерального округа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Количественный анализ показал, что Северный Кавказ и его территории достаточно популярны в российском медиапространстве. За исследуемый период опубликовано более 82 000 сообщений с упоминаниями словосочетания «Северный Кавказ». Преобладала негативно-нейтральная тональность публикаций: сообщений с позитивной направленностью было только 1 542, с негативной — 18 224, с нейтральной — 62 293 (рис. 1).

Подавляющее число сообщений с упоминанием Северного Кавказа приходится на социальные сети «ВКонтакте», Instagram, «Одноклассники», YouTube и Facebook. Лидерами по аудитории (т.е. количеству пользователей, прочитавших сообщения) являются «ВКонтакте» и Instagram — 897 млн и 449 млн пользователей соответственно, а по показателю «вовлечённость» (количество пользователей, отреагировавших на сообщение отметкой «нравится» или комментарием) лидируют Instagram и YouTube — 2,4 млн и 1,1 млн пользователей (табл. 2).

Полагаем, что образное восприятие территории может меняться в зависимости от социально-демографической структуры сообщества. Анализ представленных данных позволил составить обобщённые социально-демографические портреты «автора» и

«читателя» публикаций о Северном Кавказе (рис. 2). Оказалось, что Северным Кавказом в большей степени интересуются холостые мужчины, причём писательская аудитория несколько старше и образованнее, чем читающая.

Вполне очевидно, что число публикаций о Северном Кавказе заметно возрастает в южных регионах европейской части России и особенно собственно северокавказских субъектах: лидируют Ставропольский край, республики Северная Осетия-Алания, Карачаево-Черкесия, Кабардино-Балкария. Также достаточно много публикаций в Севастополе, Краснодарском крае, Ростовской области, республиках Дагестан, Чечня, Ингушетия и Карачаево-Черкесия. Среди других территорий России доминируют Москва и Санкт-Петербург, Московская, Мурманская и Магаданская области (рис. 3).

Анализ контекста сообщений показал, что относительно позитивно настроенных респондентов по отношению к Северному Кавказу не слишком много; среди них наиболее заметны жители Астраханской, Мурманской, Калининградской областей, Республик Калмыкия и Карелия. Однако ни в одном регионе России доля позитивных сообщений не превышает 6 % и в среднем по России составляет всего 1,25 % (рис. 4).

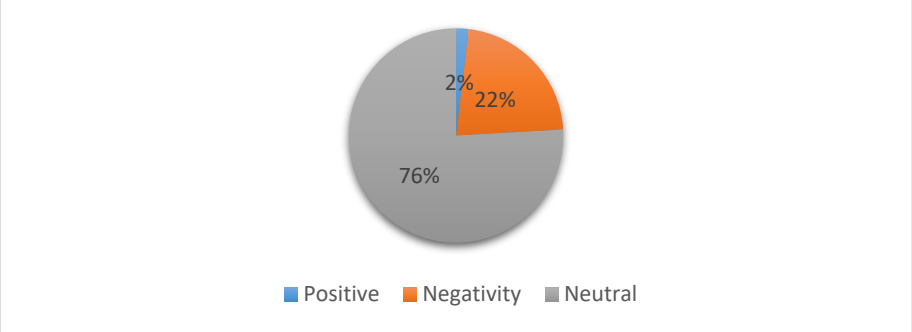
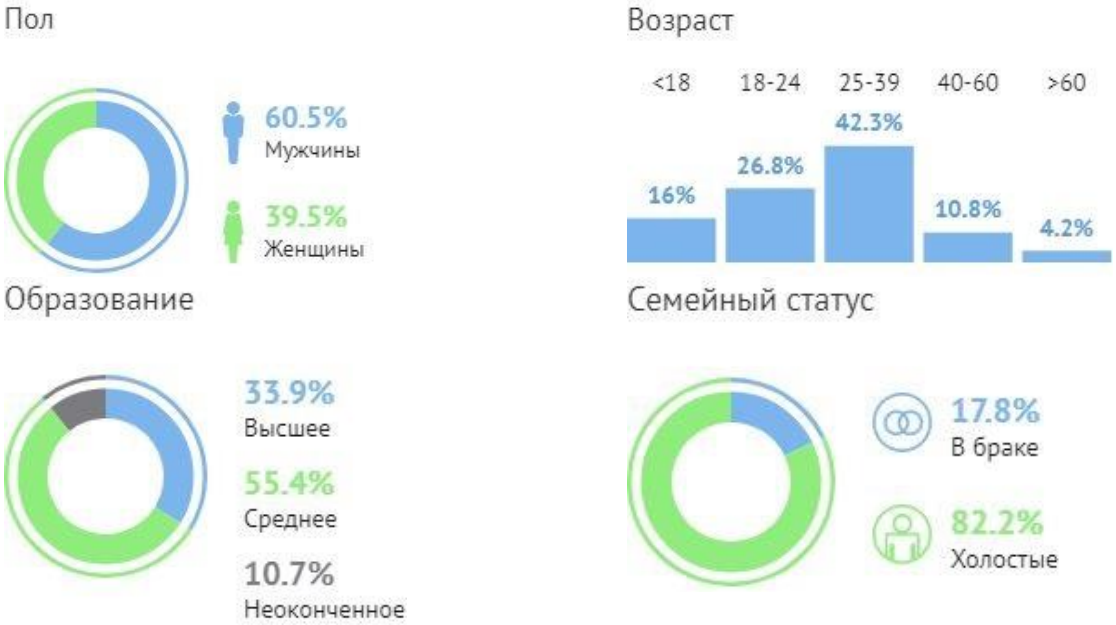


Рис. 1. Тональность сообщений о Северном Кавказе в социальных медиа (по данным системы «Медиалогия», июнь–август 2019 г.)
Fig. 1. The tone of messages about the North Caucasus in social media (according to the system "Medialogia" June–August 2019)

Табл. 2. Площадки, транслирующие сообщения о Северном Кавказе (по данным системы «Медиалогия», июнь–август 2019 г.)
Table 2. Sites that broadcast messages about the North Caucasus (according to the system "Medialogia" June–August 2019)

Площадка	**Количество сообщений (шт.)**	**Аудитория (чел.)**	**Вовлечённость (чел.)**	**Позитивные (шт.)**	**Нейтральные (шт.)**	**Негативные (шт.)**
ВКонтакте	25 534	897 134 824	497 034	340	19 524	5 670
Instagram	14 829	449 086 449	2 374 422	542	10 616	3 671
Одноклассники	11 179	164 566 310	158 192	108	8 574	2 497
YouTube	11 061	214 446 350	1 094 253	154	9 067	1 840
Facebook	9 640	61 041 993	134 509	191	7 262	2 187
telegram.org	2 195	4 279 649	0	34	1 529	632
Twitter	2 066	100 606 081	16 351	23	1 883	160
МирТесен	1 911	1 480 646	5 116	119	1 185	607
LiveJournal	1 325	393 184	5 842	11	995	319

а, a



б, b

Рис. 2. Социально-демографические портреты «автора» (а) и «читателя» (б) публикаций о Северном Кавказе в социальных медиа (по данным системы «Медиалогия», июнь–август 2019 г.)
Fig. 2. Socio-demographic portraits of the «author» (a) and «reader» (b) of publications about the North Caucasus in social media (according to the system "Medialogia", June–August 2019)

Рис 3. Количество сообщений о Северном Кавказе
в регионах России на 100 000 населения
(по данным аналитической системы «Медиалогия», июнь–август 2019 г.)
Fig 3. Number of reports about the North Caucasus
in Russian regions per 100 000 population
(according to the analytical system "Medialogia", June–August 2019)

В негативном контексте пишут гораздо чаще; таким является каждое четвёртое упоминание о Северном Кавказе (в среднем по России 24,3 %). Негативный настрой явно преобладает в Кемеровской, Костромской и Белгородской областях, Ямало-Ненецком и Чукотском АО, Алтайском крае, но пиковых значений этот показатель достигает в Республике Тыва — 90,9 % всех сообщений (рис. 5). Следует отметить, что и на северокавказских территориях (например, в Дагестане) также велика доля публикаций отрицательной направленности.

Примеры тем публикаций с позитивной тональностью: «Северо-Кавказский Молодёжный форум «Машук»», «Горные туристические маршруты Карачаево-Черкесии», «15 блогеров России в путешествии по Кавказу», «Открытие объектов социальной инфраструктуры в горных аулах Дагестана», «Почему россиянам стоит отдыхать на Северном Кавказе».

Темы публикаций отрицательной направленности: «Арест отца и сына Арашуковых», «МВД связало митинги в Москве с организаторами акций на Кавказе», «Межнациональный конфликт в Дагестане с участием чеченцев», «Похищение тринадцатилетней девочки с целью женитьбы в Ставропольском крае», «Обезврежены боевики в Кабардино-Балкарии».

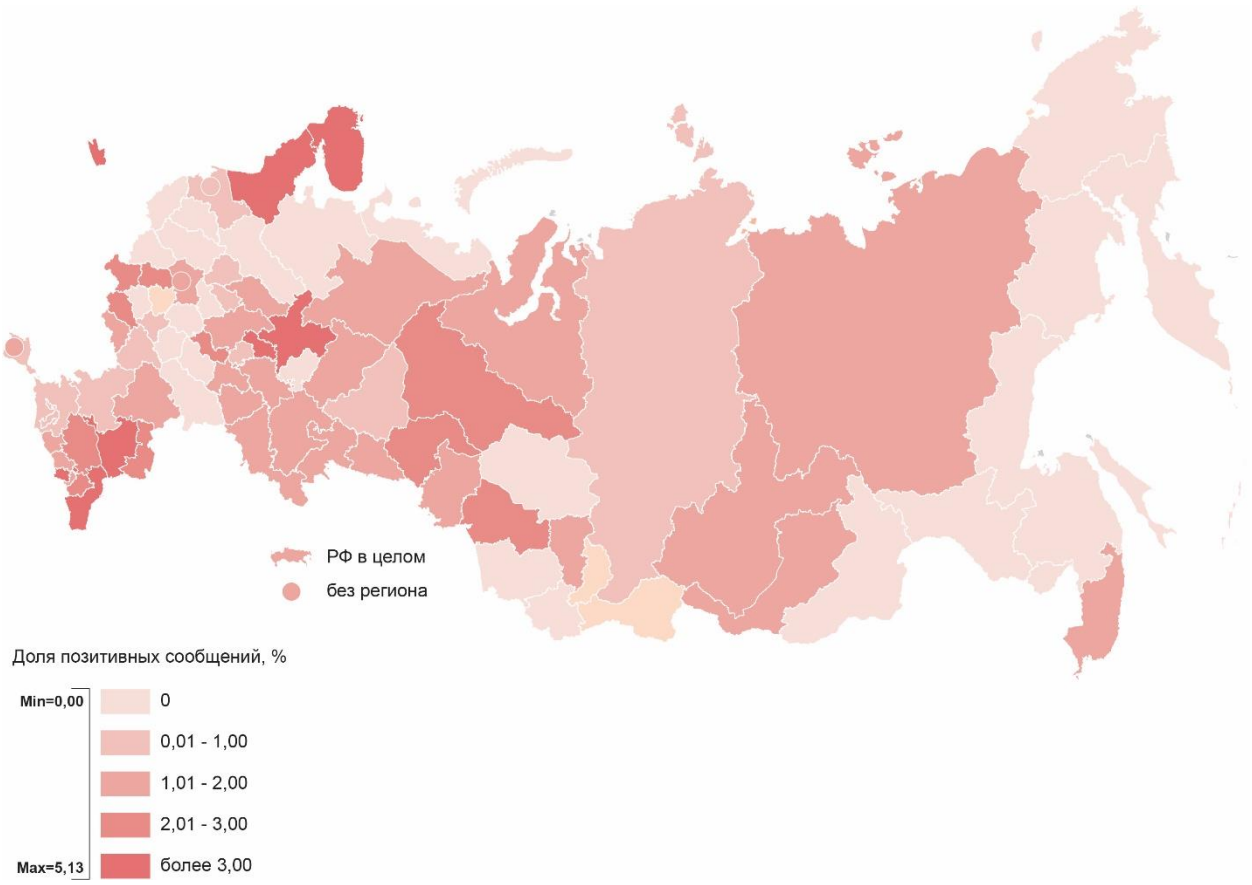


Рис. 4. Доля позитивных сообщений о Северном Кавказе в регионах России (по данным аналитической системы «Медиалогия», июнь-август 2019 г.)
Fig. 4. The share of positive reports about the North Caucasus in Russian regions (according to the analytical system "Medialogia", June-August 2019)

По данным ИАС «Медиалогия», при оценке тональности применяются технологии лингвистического анализа по методике, разработанной компанией «Медиалогия», и учитывается как мнение автора сообщения по отношению к объекту, так и мнения других комментаторов, однако авторская позиция превалирует над остальными. Позитивный тон отмечается, если сообщение содержит информацию, оценки, высказывания, характеризующие наблюдаемый объект с положительной стороны. Негативный тон ставится, если автор сообщения позволяет себе негативные оценки, сарказм или иронию по отношению к объекту, а также если в сообщении приводятся негативные отклики об объекте. При этом оценка тона оказывает большее влияние на итоговый характер упоминания, чем оценка факта. Негативный факт, поданный автором с позитивной стороны, даёт в целом нейтральную оценку. А позитивный факт с негативной тональностью — негатив. При необходимости во время работы с аналитическим отчётом можно изменять присвоенную сообщению тональность. Наш опыт работы с данными ИАС «Медиалогия» позволила сделать вывод, что методике, разработанной компанией, можно доверять.

Для определения рейтинга территории в медиапространстве важным показателем является «вовлечённость», т.е. количество пользователей, так или иначе отреагировавших на публикацию (например, поставили отметку «нравится», оставили комментарий, сделали «репост» на свою страницу или отправили кому-либо из своих друзей или

подписчиков). Для сравнительного анализа использовался не абсолютный, а относительный показатель вовлечённости (ОВ) — число отреагировавших пользователей на каждые 100 тыс. участников всей аудитории. Анализ данного показателя позволил установить степень заинтересованности населения регионов России по отношению к северокавказским территориям. В среднем по стране данный показатель составляет 42,91 на 100 тыс. чел. Наибольший интерес проявили жители Центральной России (Тверской, Смоленской областей), а также Курганской области. Минимальная вовлечённость оказалась в субъектах Крайнего Севера и, как ни странно, в ряде регионов СКФО и ЮФО (рис. 6).

О Северном Кавказе в социальных сетях пишут не только в России, но и в других странах. В первую очередь, речь идёт о русскоязычных публикациях в зарубежных социальных медиа (рис. 7). Очевидно, что больше всего публикаций в странах т. наз. «ближнего зарубежья» (т.е. бывших республиках СССР), а также в странах со значительным числом северокавказских иммигрантов. Резко преобладают нейтральные публикации, значительно меньше негативных, а позитивных — ничтожно мало. Интересно, что некоторые сообщения имели довольно экзотическую географическую привязку (например, Острова Кука, Ботсвана, Уругвай, Антигуа и Барбуда, Соломоновы о-ва, Американское Самоа, Тувалу и др.).

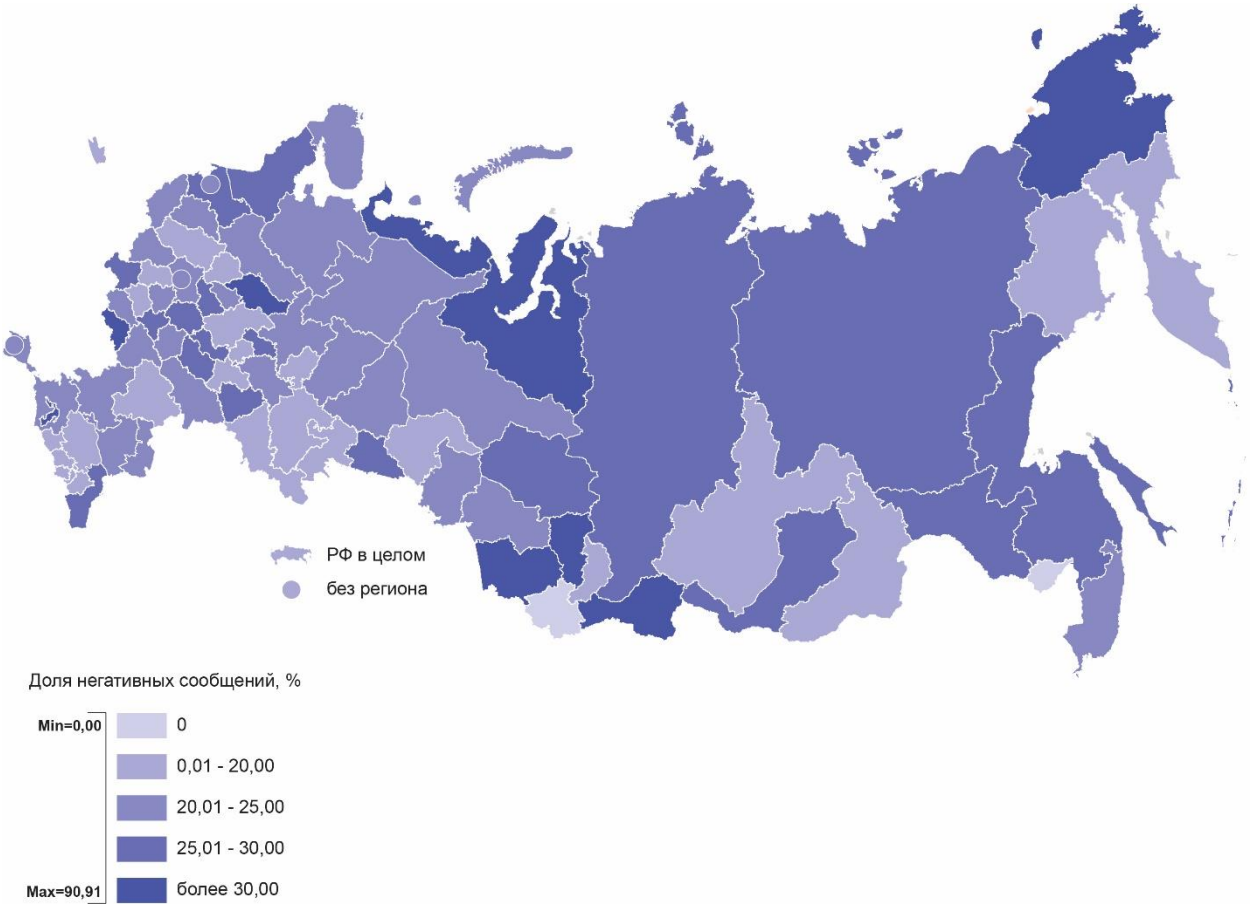


Рис. 5. Доля негативных сообщений о Северном Кавказе в регионах России (по данным аналитической системы «Медиалогия», июнь–август 2019 г.)
Fig. 5. The share of negative messages about the North Caucasus in Russian regions (according to the analytical system "Medialogia", June–August 2019)

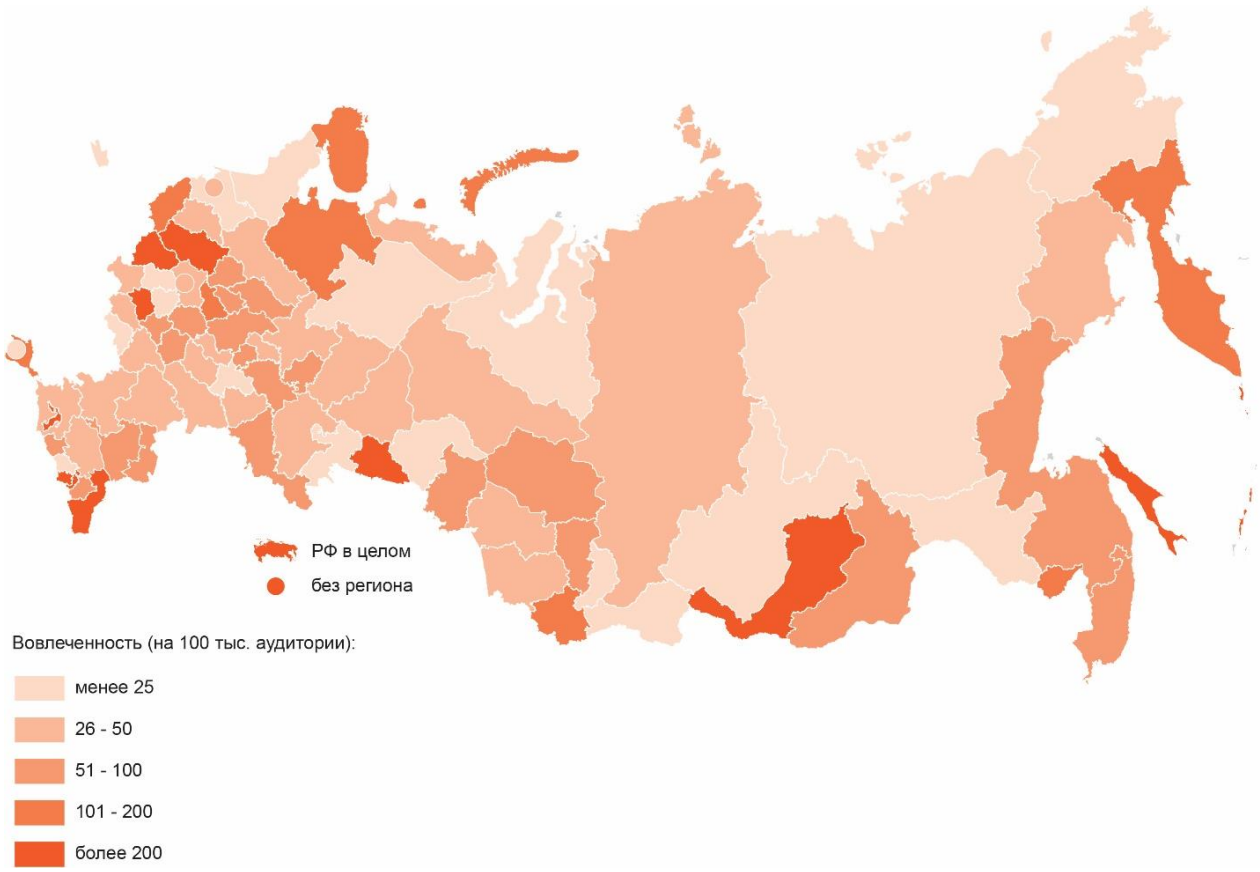


Рис. 6. Показатель относительной вовлечённости по регионам России (по данным аналитической системы «Медиалогия», июнь-август 2019 г.)
Fig. 6. Indicator of relative involvement by regions of Russia (according to the analytical system "Medialogia", June-August 2019)

Важным компонентом образа крупного макрорегиона (каким и является Северный Кавказ) является установление «маркерных территорий», т.е. тех мест, которые ассоциируются с ним ментально. Для этого были проанализированы два количественных показателя: число публикаций в соцмедиа о каждом из субъектов СКФО и процентное соотношение сообщений о Северном Кавказе, в которых упоминается тот или иной субъект СКФО. Проведённый анализ показал, что по запросу «Северный Кавказ» около половины публикаций содержат упоминание Республики Дагестан, 47 % — Чеченской Республики и только 13 и 11 % — Карачаево-Черкесии и Кабардино-Балкарии соответственно. По числу публикаций также безусловными лидерами являются Чеченская Республика и Республика Дагестан; о них в социальных медиа пишут даже чаще, чем о Северном Кавказе в целом (рис. 8). Таким образом, можно сделать вывод, что для населения России Северный Кавказ — это, в первую очередь, Дагестан и Чечня, именно эти два субъекта олицетворяют исследуемый регион в медиапространстве России. В «информационную периферию Северного Кавказа» попали Кабардино-Балкарская и Карачаево-Черкесская Республики. Практически во всех региональных публикациях превалируют негативные оценки. В самом невыгодном свете оказались Северная Осетия − Алания и Ставропольский край, а наиболее контрастно выглядела Карачаево-Черкесия (рис. 9).

Рис. 7. Топ-10 стран по количеству и контексту публикаций о Северном Кавказе в социальных медиа (по данным аналитической системы «Медиалогия», июнь–август 2019 г.)
Fig. 7. Top-10 countries by the number and context of publications about the North Caucasus in social media (according to the analytical system "Medialogia", June–August 2019)

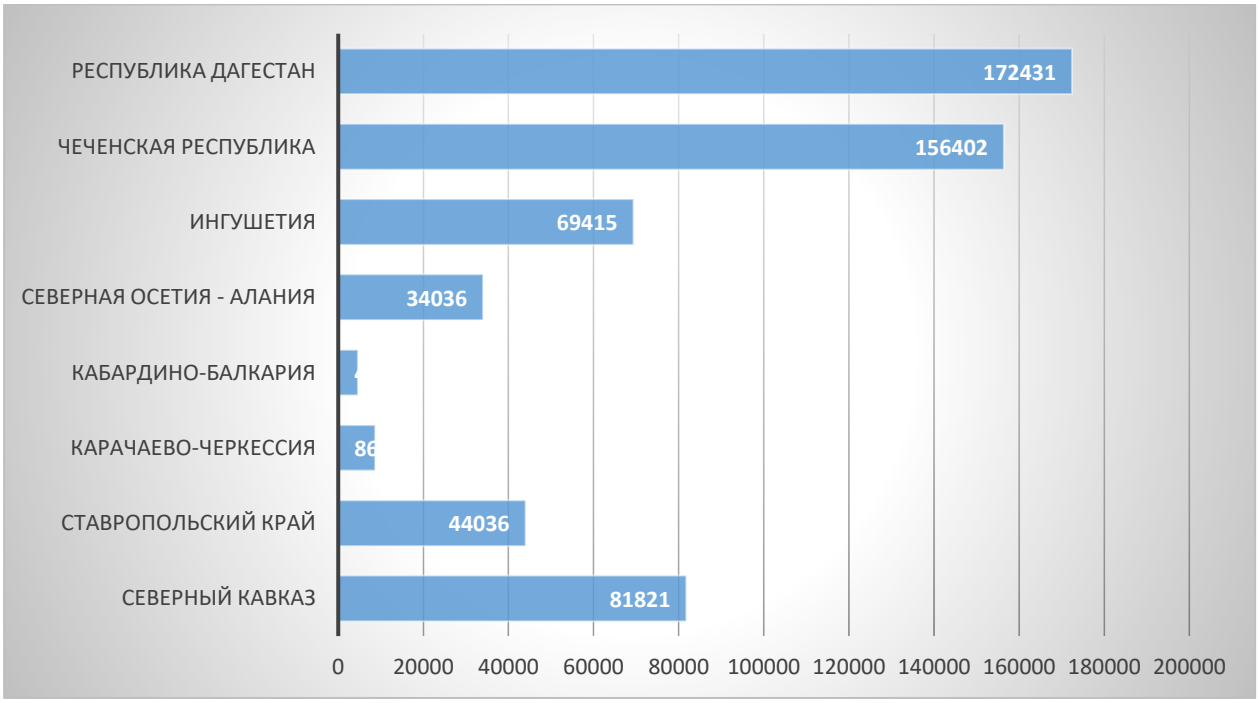


Рис. 8. Количество упоминаний в социальных медиа о субъектах СКФО (по данным аналитической системы «Медиалогия», июнь–август 2019 г.)
Fig 8. The number of mentions in social media about subjects of the North Caucasus Federal District (according to the analytical system "Medialogia", June–August 2019)

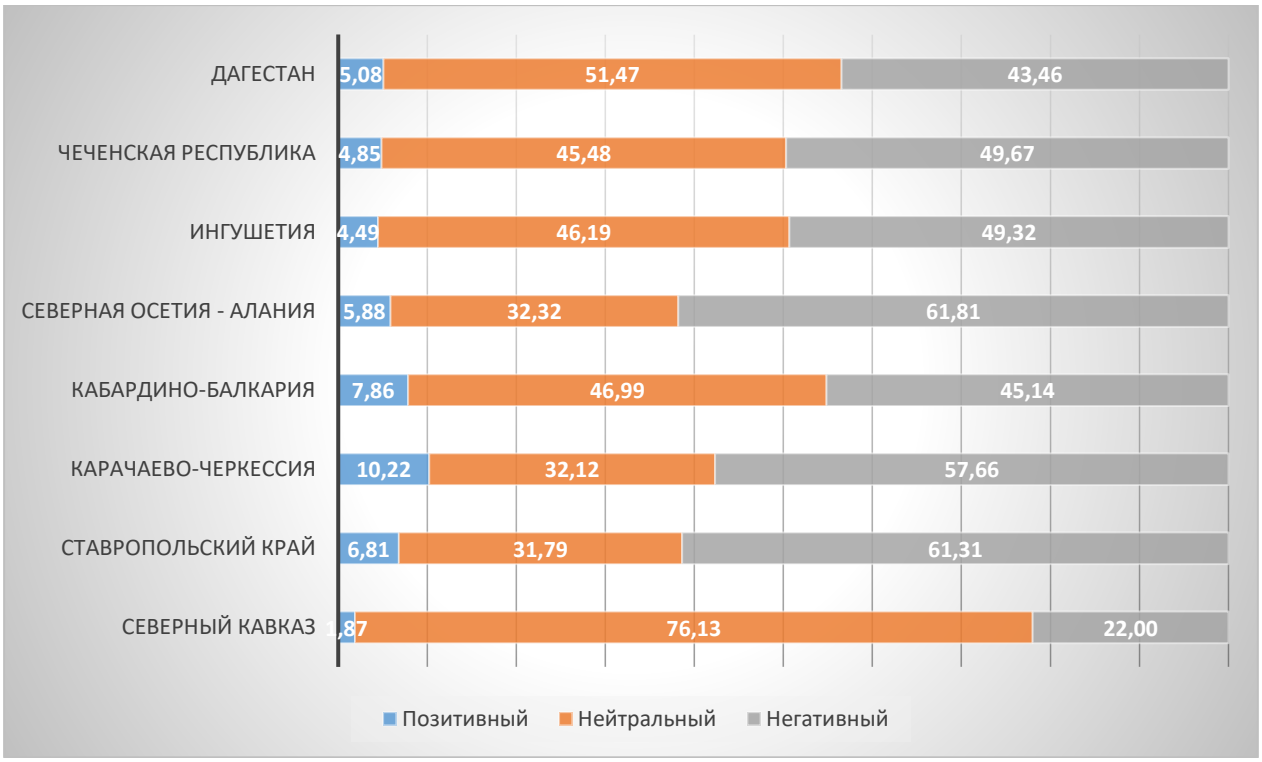


Рис. 9. Эмоциональная окраска упоминаний о субъектах СКФО в социальных медиа (по данным аналитической системы «Медиалогия», июнь–август 2019 г.)
Fig. 9. The emotional coloring of the mentions of the North-Caucasian Federal District on social media (according to the analytical system "Medialogia" June–August 2019)

ВЫВОДЫ

1. В современном мире социальные медиа становятся важным пространством формирования и трансляции образов территории, а анализ их параметрических характеристик следует рассматривать как эффективный метод географического исследования, в частности в когнитивной географии для исследования регионов как ментальных явлений.
2. Результативность географического анализа образа территории в социальных медиа значительно повышается при использовании возможностей автоматизированных информационно-аналитических систем путём формирования системы поисковых запросов, создания базы данных, интерпретации результатов с помощью расчётов, графиков, таблиц и карт.
3. Анализ репрезентаций территорий Северного Кавказа в медиапространстве выявил преобладание негативной тональности в восприятии над позитивной и общее доминирование отрицательных черт в его образе.
4. В ментальных представлениях населения России Северный Кавказ чаще всего ассоциируется с двумя основными регионами — Дагестаном и Чечнёй, и именно от позиционирования этих регионов зависит образ всего Северного Кавказа.
5. Пространственный анализ восприятия россиянами северокавказских территорий не позволил установить явных связей между региональными географическими параметрами. Прослеживается некоторая зависимость между удалённостью, известностью территории и уровнем позитивности её образа. Максимальный положительный образный потенциал относительно Северного Кавказа сосредоточен в регионах — соседях первого и второго порядка.

6. На мировом уровне популярность Северного Кавказа выражена в постсоветских странах и в странах со значительным количеством русскоговорящего населения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Грибок М.В.* О возможности использования данных о геолокациях фотографий в исследованиях туристической привлекательности придорожных ландшафтов (на примере Чуйского тракта). ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. Т. 24. Ч. 1. С. 588–595. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-110-120.
2. *Грибок М.В., Горбунова Т.Ю.* Сервис Google Trends как источник данных для исследования ментальных связей между регионами России. Геополитика и экогеодинамика регионов, 2019. Т. 5. № 3. С. 256–263.
3. *Замятин Д.Н.* Гуманитарная география: пространство, воображение и взаимодействие современных гуманитарных наук. Социологическое обозрение, 2010. Т. 9. № 3. С. 26—50.
4. *Замятин Д.Н.* Гуманитарная география: Пространство и язык географических образов. Санкт-Петербург: Алетейя, 2003. 331 с.
5. Мир глазами россиян: мифы и внешняя политика. М.: ФОМ, 2003. 304 с.
6. *Тикунов В.С., Белозёров В.С., Антипов С.О., Супрунчук И.П.* Социальные медиа как инструмент анализа посещаемости туристических объектов (на примере Ставропольского края). Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2018. № 3. С. 89–95.
7. *Чихичин В.В.* Географический анализ образов городов Ставропольского края. Дисс. … канд. геогр. н. Ставрополь: Ставропольский государственный университет, 2006. 149 с.
8. *Bell D.* The coming of postindustrial society: A venture in social forecasting. New York: Basic Books, 1999. 507 p.
9. *Castells M.* The information age: Economy, society and culture. 3 v. Oxford: Blackwell, 1996–1998. 406 p.
10. *Giddens A.* The third way: The renewal of social democracy. Cambridge: Polity, 1998. 368 p.
11. *Kaplan A.M., Haenlein M.* Users of the world, unite! The challenges and opportunities of Social Media. Business Horizons, 2010. V. 53 (1). P. 59–68.
12. *Lyotard J.-F.* Political writings. London: UCL Press, 1993. 312 p.
13. *Reich R.* The work of nations: Preparing ourselves for 21st Century capitalism. New York: Vintage, 1991. 352 p.
14. *Tikunov V.S., Belozerov V.S., Panin A.N., Antipov S.O.* Geoinformation monitoring of key queries of search engines, and geotagging photos in the North-Caucasian segment of the tourist route “Great Silk Road”. Annals of GIS, 2018. V. 24. P. 1–6. DOI:10.1080/ 19475683.2020.1743355.

REFERENCES

1. *Bell D.* The coming of postindustrial society: A venture in social forecasting. New York: Basic Books, 1999. 507 p.
2. *Castells M.* The information age: Economy, society and culture. 3 v. Oxford: Blackwell, 1996–1998. 406 p.
3. *Chikhichin V. V.* Geographical analysis of images of cities of the Stavropol territory. Diss. ... PhD geogr. sc. Stavropol: Stavropol State University, 2006. 149 p. (in Russian).
4. *Giddens A.* The third way: The renewal of social democracy. Cambridge: Polity, 1998. 368 p.
5. *Gribok M.V.* On the possibility of using data on geolocated photos in the research of tourist attractiveness of roadside landscapes (exemplified by the Chuya highway). InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2018. V. 24. Part 1. P. 588–595. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-110-120 (in Russian).

6. *Gribok M.V., Gorbunova T.Yu.* Google Trends service as a source of data for research of mental relations between Russian regions. Geopolitics and ecogeodynamics of regions, 2019. V. 5. No 3. P. 256–263 (in Russian).
7. Kaplan A.M., Haenlein M. Users of the world, unite! The challenges and opportunities of Social Media. Business Horizons, 2010. 53 (1). P. 59–68.
8. *Lyotard J.-F.* Political writings. London: UCL Press, 1993. 312 p.
9. *Reich R.* The work of nations: Preparing ourselves for 21st Century capitalism. New York: Vintage, 1991. 352 p.
10. The world through the eyes of Russians: myths and foreign policy. Moscow: FOM, 2003. 304 p. (in Russian).
11. *Tikunov V.S., Belozerov V.S., Antipov S.O., Suprunchuk I.P.* Social media as a tool for analyzing tourist object traffic (on the example of the Stavropol territory). Herald of Moscow University. Series 5. Geography, 2018. No 3. P. 89–95 (in Russian).
12. *Tikunov V.S., Belozerov V.S., Panin A.N., Antipov S.O.* Geoinformation monitoring of key queries of search engines, and geotagging photos in the North-Caucasian segment of the tourist route “Great Silk Road”. Annals of GIS, 2018. V. 24. P. 1–6. DOI:10.1080/ 19475683.2020.1743355.
13. *Zamyatin D.N.* Humanitarian geography: Space and language of geographical images. St. Petersburg: Aletheia, 2003. 331 p. (in Russian).
14. *Zamyatin D.N.* Humanitarian geography: Space, imagination and interaction between contemporary human sciences. Sociological Review, 2010. V. 9. No 3. P. 26−50 (in Russian).

DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-240-252

Shavkat S. Akhralov[1], Rustam A. Yusupov[2], Khojakbar Egamberdiev[3], Javot J. Jumanov[4]

GEOINFORMATION TECHNOLOGIES AND METHODS OF MATHEMATICAL MODELING IN HYDROGEOLOGICAL RESEARCH

ABSTRACT

In the article the application issues of geographic information technologies and methods of mathematical modeling of geofiltration and geomigration processes of hydrogeological systems were discussed, as well as for information support of the groundwater monitoring system. The object of research is the Akhangaran aquifer, which is a large industrial area with intensification of agriculture, as well as densely populated, where industrial reproduction of water resources is established by designing water intake facilities using groundwater, also having huge data on regime, geological and hydrogeological aspects. The main goal of these researches is to learn the methodology for assessing groundwater resources by modeling to the GIS basis, theoretical and applied methods of mathematical analyses. The features are considered and the boundary and initial conditions are justified. The results are a research technique has been developed to simulate geofiltration and geomigration processes, to determine the balance of groundwater, and the hydrogeological parameters of the aquifer have been calculated from it. The calculated values of the natural resources of groundwater by the parameters of their level mode in the Akhangaran pool allowed establish the permissible convergence of resource estimates according to the amplitudes of fluctuations in the level of groundwater and according to geoinformation modeling.

KEYWORDS: geofiltration processes, geoinformation technology, topographic surfaces, finite-difference schemes, monitoring of the underground hydrosphere

INTRODUCTION

Groundwater is the property of the state and is enshrined in laws ‘On Nature Management’, ‘On Subsoil’, etc. In the arid climate of the Republic of Uzbekistan, the main suppliers of fresh water suitable for drinking are river valleys. Significant groundwater reserves are concentrated in them, which are formed mainly due to filtration losses from surface watercourses and irrigation water infiltration [*Mavlonov et al.*, 2011, p. 35; *Mirzaev et al.*, 1974; *Hasanov et al.*, 2005, p. 212].

An important direction of increasing the efficiency of the geological, agricultural and industrial sectors of the economy is the use of modern geographic information technologies for the information integration of processes. According to various estimates, up to 80 % of the production cycle time is spent on the preparation and support of design models in high-tech production. This is related primarily to the high labor input and complexity of preparing the initial (visual-figurative) information. At present, mathematical and geoinformation models are being created in various areas of geological and hydrogeological science, and thematic electronic

[1] Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad Al-Khwarizmi, Amir Temur str., 108, 100200, Scientific-Innovation Center of Information-Communication Technologies, Tashkent, Uzbekistan; *e-mail:* **muxamadamin90@mail.ru**

[2] Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad Al-Khwarizmi, Amir Temur str., 108, 100200, Tashkent, Uzbekistan; *e-mail:* **neouzbek77@gmail.com**

[3] Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad Al-Khwarizmi, Amir Temur str., 108, 100200, Tashkent, Uzbekistan; *e-mail:* **khojakbar_81@mail.ru**

[4] Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Universitet str., 2, 100097, Tashkent, Uzbekistan; *e-mail:* **javot2000@mail.ru**

maps are also widely used. This product is becoming one of the common forms of presenting various kinds of information [*Djumanov*, 2016, p. 258; *Saidmuradov et al.*, 2008, p. 116].

ESRI geographic information systems (GIS) (ArcGIS, ArcInfo, ArcView, etc.) in such tasks are a powerful tool for data integration and analysis [*Djumanov*, 2016, p. 258]. With GIS technology, a development process is now occurring that is characteristic of the entire history of science and technology. Needs push to the creation of some visualized database, technical and information system for solving the problems of geology, reclamation hydrogeology and engineering geology.

There are various methods of geoinformation modeling, surface construction, topographic analysis and handling of inaccurate quantities, i.e. fuzzifications. Fuzzification is the establishment of a correspondence between the specific, usually numerical, value of a single input variable of a fuzzy inference system and the value of the membership function of the corresponding term of the input linguistic variable. When specifying for elements of a set the corresponding degree of belonging to this set, the theory of fuzzy sets is used, which was first proposed by the American mathematician L. Zadeh [*Usmanov et al.*, 2007, p. 37]. At present, the theory is actively developing, new scientific concepts and its applied areas are being formed. There is a tendency toward integration into a general theory of uncertainty analysis, where operations with fuzzy sets are one of the main ones. That is, information is turning into a general scientific concept, including the exchange of information between people, a person and a machine, the exchange of signals in the geological and plant world; transmission of signs from nature, from the geosphere to the computer; becomes one of the basic concepts of information and communication technologies.

Conducting research, evaluation and monitoring researches by traditional methods is associated with high labor and material costs, subjective dependence on the executor and the timeliness (inertia) of information; therefore, solving modern, complex engineering problems based on new computer technologies for three-dimensional modeling is an urgent problem.

MATERIALS AND METHODS OF RESEARCHES

Review of research. At leading research centers in the Netherlands, Denmark, Germany, Canada, Russia, and others, a number of software packages have been developed that focus on modeling hydrogeological systems, such as Visual MODFLOW (USA), Groundwater Modeling System (GMS), combining MODFLOW models, Brigham Yong University laboratories, Ground Water Vistas GWV DHI (Denmark), ModTech developed by Geolink Consulting (Russia), “the GWFS Geofiltration Modeling” software system. A number of researches were carried out on the application of finite-difference and numerical methods for modeling the geofiltration processes of groundwater, including [*Djumanov*, 2016, p. 28]: F.B. Abutaliev, J. Fried, I.K. Gavich, A.A. Samarsky, V.M. Shestakov, L. Luckner, U.U. Umarov, J.C. Refsgaard, L.M. Milne-Thomson, W. Kinzelbach, N.N. Verigin, I. Khabibullaev, P.Ya. Polubarinova-Kochina, I.I. Krashin, R.N. Usmanov, V.M. Mironenko, V.M. Godberg, I.N. Tikhonov, J.X. Djumanov and many others. There are separate developments on mathematical modeling of the relationship of geofiltration processes according to the scheme formation ↔ transit zone ↔ unloading zone (K. Fletcher, E. Oran, F.M. Bochever, D. Anderson, L.S. Yazvin, A.M. Soifer, I. Ber, A.B. Vistelius, J.Kh. Djumanov et al.) [*Djumanov*, 2016, p. 258]. With the advent of GIS technologies, it gave a personal impetus to the development of a mathematical modeling methodology for large regional hydrogeological objects, which allow integrating mathematical models of local parts of large hydrogeological objects on the basis of a unified computing system R.F. Tomlinson, A.M. Trofimov, A.D. Armand, A.M. Berland, A.V. Koshkarev, etc.

Modern software packages with a convenient interface on the one hand make an important contribution to the development of a geofiltration modeling methodology based on the widespread use of information technology, and on the other hand, they are focused mainly on the

use of factual, numerical information in the modeling process of weakly formalized processes in hydrogeology.

The object of our research was the Akhangaran groundwater field, which is a large industrial unit with intensification of agriculture, as well as densely populated, where industrial reproduction of water resources is established by designing water intake facilities using groundwater in the Tashkent region.

The main goal of these researches is to transfer the methodology for assessing groundwater resources by modeling geofiltration and mass transfer to the GIS basis and to introduce this model using the example of the Akhangaran river valley. To achieve the goal, the following tasks were solved.

Formulation of the problem. These researches are a development of the methodology of mathematical modeling of hydrogeological processes. Of particular note are the merits of scientists from TUIT and the HYDROINGEO Institute: N.N. Khodjibaev, F.B. Abutaliev, U.U. Umarov, I.Kh. Khabibullaev, R.N.B. Bahramov, P.P. Nagevich, A.B. Alimbaev, J.Kh. Djumanov, I.N. Grachev et al., who made a great contribution to the establishment, development and implementation of a methodology for modeling hydrogeological processes and it is worth noting that at this stage of research, five doctoral and ten master's theses have been prepared and defended [*Khasanov*, 2005, p. 212].

Recently, changing the mode of surface water flows in the Akhangaran Valley and increasing requirements for the rational use of water available against the background of a general shortage of water have led to the identification of a special class of problems in modeling geofiltration and geomigration processes of regional hydrogeological systems in disturbed natural and technogenic conditions [*Saidmuradov et al.*, 2008, p. 116; *Umarov*, 1966, p. 120; *Khabibullaev*, 1991, p. 115].

Since in real time mode it is planned to solve a number of problems related to the schematization of the filtration area, the integration of geofiltration and salt transfer models, their finite-difference representations, the formalization of fuzzy parameters and characteristics on a fuzzy-determined basis, the synthesis of thematic layers in the process of solving applied problems, geographically dependent interpretation of data obtained from different horizons and thematic tasks, etc. [*Zlotnik et al.*, 1985, p. 296; *Usmanov et al.*, 2007, p. 37]. In the main hydrogeological studies, where the use of mathematical modeling methods for geofiltration and geomigration is considered mandatory, these are the conditions of reclaimed territories and their mineralization, assessment of water resources and monitoring, protection of groundwater from pollution, i.e. modeling of hydrogeological processes in the conditions of uncertainty of the initial information.

To simulate mass transfer, as a rule, various equations of convective-diffusion type are used. Moreover, studies show [*Anderson et al.*, 1990, p. 352; *Verigin et al.*, 1979, p. 156] that in real conditions the convective component of flows prevails. Usually, groundwater geofiltration is primarily modeled, and the result of this simulation is used to model mass transfer problems, etc. improvement of methods of hydrogeological models of groundwater fields based on modern geoinformation technologies [*Djumanov*, 2016, p. 258].

Substance transfer in a moving groundwater flow, i.e. geomigration, the processes of the substance transfer and heat by groundwater are determined, which are conditioned by the following basic phenomena as convection, diffusion, as well as by the physicochemical processes of the interaction of groundwater with mountain rocks [*Abutaliev, Khabibullaev*, 1980, p. 15; *Verigin et al.*, 1979, p. 235]:

1) Convective transfer by a filtered flow (forced convection) under the influence of a hydraulic gradient, proceeding at a speed $u = v / n$, where v is the Darcy filtration rate and n is porosity. The specific flow of substance (mass of substance moving in a unit volume of rock per unit time) due to convective transfer $I_к = uC$, where C is the content in the solution or concentration.

2) Density convection associated with the presence of a vertical density gradient of solutions. Its speed is $v_\rho = K_z \Delta\rho$. In this expression, v_ρ is the vertical component of the filtration rate due to the density gradient, K_z is the filtration coefficient in the vertical direction, and $\Delta\rho = (\rho_a - \rho_b)/\rho_b$, where the indices "*a*" and "*b*" correspond above and below the underlying water. In this case, movement can occur only when the mineralization of a denser overlying solution is 2-5 *g/l* higher than that of a less dense solution below it. Specific flow $I_\rho = v_\rho C$.

3) Diffusion transfer obeying the Fick law $I_{Df} = D_M \partial C/\partial l$, where $D_м$ is the molecular diffusion coefficient in a water-saturated medium, and *l* is the distance in the direction of the concentration gradient.

4) Hydrodynamic dispersion controlled by the dispersion coefficient $D_v = \delta v$. The dispersion coefficient δ used here is determined by the size and the void structure of the rock, and the specific substance flow due to the dispersion $I_{Dp} = D_v\, \partial C/\partial l$. Since transfer due to diffusion and dispersion are physical analogues, the concept of the total dispersion coefficient $D = D_м + D_v$ is introduced. In this case, $I_{Df} + I_{Dp} = D\, \partial C/\partial l$ are defined together.

5) Given the salinization of aquifers of molecular diffusion and dispersion in order to study the movement of fresh groundwater and the migration of their pollutants, as well as the relationship with surface water, it is necessary to solve the following system of equations [*Abutaliev, Khabibullaev*, 1980, p. 15; *Anderson et al.*, 1990; *Verigin et al.*, 1979; *Samarsky*, 1983]:

$$\begin{cases} \mu \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(km\frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(km\frac{\partial H}{\partial y}\right) + W_п - W_o \\ \mu \frac{\partial (mC)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(Dm\frac{\partial C}{\partial x} - mv_x C\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(Dm\frac{\partial C}{\partial y} - mv_y C\right) + W_п C_п - W_o C_o \end{cases} \quad (1)$$

with boundary conditions $\begin{cases} H(x,y,t) = F_1(x,y,t); \ x,y \in \Gamma_1; \ t > t_0 \\ C(x,y,t) = F_2(x,y,t); \ x,y \in \Gamma_2; \ t > t_0 \end{cases}$ (2)

$$\begin{cases} -km\frac{\partial H}{\partial n} = F_3(x,y,t); \quad x,y \in \Gamma_3; \quad t > t_0; \\ -D_n m\frac{\partial C}{\partial n} + mv_n C = mv_n C; \quad x,y \in \Gamma_4; \quad t > t_0; \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} -km\frac{\partial H}{\partial n} = km\frac{H_B - H}{\phi}; \quad x,y \in \Gamma_5; \ t > t_0; \\ -D_n m\frac{\partial C}{\partial n} + mv_n C = mv_n C; \quad x,y \in \Gamma_6; \quad t > t_0; \end{cases} \quad (4)$$

and initial conditions (Cauchy problem) $\begin{cases} H(x,y,t_0) = \varphi(x,y); \ t \geq t_0 \\ C(x,y,t_0) = \psi(x,y); \ t \geq t_0 \end{cases}$ (5)

where, $\varphi(x,y)$, $\psi(x,y)$ are the given functions, $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_4 + \Gamma_5 + \Gamma_6$ boundary.

In the equations of system (1) – (5), μ is free water loss;

H(x,y,t) — groundwater level in absolute grades;

$H_в(x,y,t)$ — water level in the channel, in m;

Φ(x,y,t) is the filtering resistance of the channel;

m=H-b(x,y) is the power of the aquifer;

k(x,y) is the filtration coefficient m/day;

$W_n = \sum_{i=1}^{n} W_i^n(x,y,t)$ is the intensity of various groundwater supply factors (including pollutants) with a concentration of $C_n(x,y,t)$, m/day;

$W_0=\sum_{i=1}^{n} W_i^0(x,y,t)$ — groundwater flow rate (withdrawal, drainage, evaporation) from a certain concentration of $C_0(x,y,t)$, m/day;

$D_x=D_m+\lambda_x|v_x|$, $D_y=D_m+\lambda_y|v_y|$ — component convective diffusion coefficients;

D_m is the molecular diffusion coefficient, and λ_x, λ_y is the coefficient of longitudinal and transverse dispersion.

The dispersion of the fluid flow in a porous medium is the formation and development over time of the transition zone between the propagation regions of two phases of different composition. $G=\sum_{i=1}^{n}\Gamma_i$, $v(x,t)$ is the filtration rate determined by Darcy's law; $F_1(x,y,t)$-$F_6(x,y,t)$ — defined functions.

Numerical solution. Filtration and salt solutions, i.e. systems (1) − (5) are searched sequentially using implicit finite-difference schemes. In system (1) – (5) and boundary conditions, we pass to dimensionless variables by the formula [*Abutaliev, Khabibullaev*, 1980, p. 15; *Djumanov*, 2016, p. 258; *Saidmuradov et al.*, 2008, p. 116].

$$H^*=\frac{H}{H_0}\ ; K=\frac{K}{T_0};\ m^*=\frac{m}{H_0}\ ;\ C^*=\frac{C}{C_0}\ ;\ D^*=\frac{D}{H_0T_0};\ \phi^*=\frac{\phi}{R_0}\ ;$$
$$\xi=\frac{X}{L};\eta=\frac{Y}{L};\ \ \tau=\frac{H_0T_0}{\mu L^2}t;\ W_{\text{п}}^*=\frac{\mu L^2}{H_0^2}W_{\text{п}};\ W_0^*=\frac{\mu L^2}{H_0^2T_0}\ W_0^*,$$

where H_0, C_0, D_0, R_0 T_0 are some characteristic values of the pressure function, concentration, convective diffusion and filtration coefficient, L is the maximum extent in the region G. Since in what follows we deal with equations in dimensionless form, (*) asterisks dimensionless variables omitted [*Djumanov*, 2016, p. 28].

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial\tau}=\frac{\partial}{\partial\xi}\left(km\frac{\partial H}{\partial\xi}\right)+\frac{\partial}{\partial\eta}\left(km\frac{\partial H}{\partial\eta}\right)+W_{\text{п}}-W_0 \\ \frac{\partial(mC)}{\partial\tau}=\frac{\partial}{\partial\xi}\left(D_\xi m\frac{\partial C}{\partial\xi}-mv_\xi C_\xi\right)+\frac{\partial}{\partial\eta}\left(D_\eta m\frac{\partial C}{\partial\eta}-mv_\eta C_\eta\right)+W_{\text{п}}C_{\text{п}}-W_oC_o \end{cases} \tag{6}$$

Indices i, j, τ are introduced and steps Δξ, Δη and Δτ along the x, y, t axes, respectively. Parts of the boundary with a condition of the first kind can be arbitrary, but with conditions of the second or third kind, they are taken as stepped lines with segments parallel to the coordinate axes. In the rectangle $\xi_{i-0.5}\le\xi\le\xi_{i+0.5}$, $\tau_j\le\tau\le\tau_{j+1}$, the balance equation for system is written (6).

$$\begin{cases} \frac{H_{i,j}-\overline{H}_{i,j}}{0,5\,\Delta\tau}h=\Lambda_{i-0,5,j}-\Lambda_{i+0,5,j}+\Lambda_{i,j-0.5}-\Lambda_{i,j+0.5}+\left(W_{\text{п}\,i,j}-W_{o\,i,j}\right)h \\ \left(\frac{H_{i,j}-\widetilde{H_{i,j}}}{0,5\,\Delta\tau}C_{i,j}+\widetilde{m_{i,j}}\frac{C_{i,j}-\widetilde{C_{i,j}}}{0,5\Delta\tau}\right)\text{h}=\aleph_{i-05,j}-\aleph_{i+0,5,j}+\aleph_{i,j-0,5}-\aleph_{i,j+0,5}+ \\ \qquad +\left(W_{\text{п}\,i,j}C_{\text{п}\,i,j}-W_{0\,i,j}C_{i,j}\right)h, \end{cases} \tag{7}$$

where, $\Lambda_{i-0,5,j}=-(km)_{i-0,5,j}\frac{H_{i,j}-H_{i-1,j}}{\Delta l}$; $\Lambda_{i+0,5,j}=-(km)_{i+0,5,j}\frac{H_{i+1,j}-H_{i,j}}{\Delta l}$

$$\aleph_{i-0.5,j}=-\left[(Dm)_{i-0.5,j}\frac{C_{i,j}-C_{i-1,j}}{\Delta l}-(\Lambda)_{i-0.5,j}\,CL_i\right],$$
$$\aleph_{i+0.5,j}=-\left[(Dm)_{i+0.5,j}\frac{C_{i+1,j}-C_{i,j}}{\Delta l}-(\Lambda)_{i+0.5,j}\,CR_i\right],$$

$(mv)_{i,j\pm0,5}$ and $\aleph_{i,j\pm0.5}$ $\overline{h}_{i,j}=h_{i,j}^{k+1}$, $\overline{C}_{i,j}=C_{i,j}^{k+1}$, the values of the concentrations of CL_i and CR_i at the flow points are calculated through the values of the concentrations in the neighboring

nodes depending on the direction of the velocity between these nodes, using the countercurrent method [*Anderson et al.*, 1990; *Verigin et al.*, 1979; *Djumanov*, 2016, p. 258].

$$CR_i = \begin{cases} C_i, & \text{if } -(m\vartheta)_{i+0.5} > 0 \\ C_{i+1}, & \text{if } -(m\vartheta)_{i+0.5} < 0, \end{cases} \quad CL_i = \begin{cases} C_{i-1}, & \text{if } -(m\vartheta)_{i-0.5} > 0 \\ C_i, & \text{if } -(m\vartheta)_{i+0.5} < 0. \end{cases}$$

After some transformations the standard system is taken

$$\begin{cases} a_{i,j}H_{i-1,j} - b_{i,j}H_{i,j} - c_{i,j}H_{i+1,j} = -d_{i,j} \\ a'_{i,j}C_{i-1,j} - b'_{i,j}C_{i,j} - c'_{i,j}C_{i+1,j} = -d'_{i,j} \end{cases} \tag{8}$$

where, $a_{i,j} = \Lambda_{i-0,5,j}$, $c_{i,j,} = \Lambda_{i+0,5,j}$, $b_{i,j} = a_{i,j} + c_{i,j} + \gamma$, $\gamma = \mu\frac{2l^2}{\Delta t}$,

$$d_{i,j} = \gamma\overline{h}_{i,j} + l^2(W_{\text{п}\,i,j} - W_{0\,i,j}) + \varphi_{i,j}, \qquad \varphi_{i,j} = l[\Lambda_{i,j+0,5} - \Lambda_{i,j-0,5}],$$

$$a'_{i,j} = \aleph_{i-0,5,j} + S^1_{i,j}, \qquad c'_{i,j} = \Lambda_{i+0,5,j} + S^2_{i,j},$$

$$b'_{i,j} = a'_{i,j} + c'_{i,j} + \gamma m_{i,j} + l^2 W_{\text{п}i,j} + \varphi_{i,j},$$

$$S^1_{i,j} = \begin{cases} l(\Lambda)_{i-0,5,j} & If\ \ (\Lambda)_{i-0,5,j} > 0 \\ 0, & If\ \ (\Lambda)_{i\,-0,5,j} < 0 \end{cases}, \quad S^2_{i,j} = \begin{cases} l(\Lambda)_{\text{i+0.5,j}}, & \text{If } (\Lambda)_{\text{i+0.5,j}} < 0, \\ 0\ , & \text{If } (\Lambda)_{\text{i+0,5,j}} > 0, \end{cases}$$

$$d'_{i,j} = \gamma m'_{i,j}\widetilde{C_{i,j}} + l^2 W_{\pi i,j} C_{\pi i,j} + \psi_{\ i,j},$$

$$\psi_{\ i,j} = [(Dm)_{i,j-0.5} + P_{1i,j}]C_{i,j-1} + [P_{2i,j} - P_{3i,j} - (Dm)_{i,j-0.5} - -(Dm)_{i,j+0.5}]C_{i,j} + [(Dm)_{i,j+0.5} - P_{4i,j}]C_{i,j+1},$$

$$P_{1i,j} = \begin{cases} l(\Lambda)_{i,j-0.5}, & If\ (\Lambda)_{i,j-o.5} > o \\ 0\ , & If\ (\Lambda)_{i,j-o.5} < o \end{cases}, \quad P_{2i,j} = \begin{cases} l(\Lambda)_{i,j-0.5}, & If\ (\Lambda)_{i,j-o.5} < o \\ 0\ , & If\ (mv)_{i,j-o.5} > o \end{cases}$$

$$P_{3i,j} = \begin{cases} l(\Lambda)_{i,j-0.5}, & If\ (\Lambda)_{i,j+o.5} > o \\ 0\ , & If\ (\Lambda)_{i,j+o.5} < o \end{cases}, \quad P_{4i,j} = \begin{cases} l(\Lambda)_{i,j-0.5}, & If\ (\Lambda)_{i,j+o.5} < o \\ 0, & If\ (\Lambda)_{i,j+o.5} > o \end{cases}$$

the approximation of the boundary conditions of the second and third kind is condidered separately. Using the balance method, the difference approximation of the boundary conditions (BC) (2) and (4) is given in mind.

$$\begin{cases} H_{0,j} = \varkappa_{1,j}H_{1,j} + \nu_{1,j} \\ C_{0,j} = \varkappa'_{1,j}C_{1,j} + \nu'_{1,j} \end{cases} \qquad \begin{cases} H_{N,j} = \varkappa_{2,j}H_{N-1,j} + \nu_{2,j} \\ C_{N,j} = \varkappa'_{2,j}C_{N-1,j} + \nu'_{2,j} \end{cases} \tag{9}$$

$$\varkappa_{\mathbf{1,j}} = \begin{cases} 0\ , & If\ BC\ \text{I}\ kind \\ \frac{C_{0,j}}{C_{0,j}+\breve{\gamma}}\ , & If\ BC\ \text{II}\ kind \\ \frac{C_{0,j}}{C_{0,j}+\breve{\gamma}+\gamma_1}, & If\ BC\ \text{III}\ kind \end{cases} \qquad \nu_{1,j} = \begin{cases} \xi_{0,j}\ , & If\ BC\ \text{I}\ kind \\ \frac{\breve{\gamma}H_{0,j}+Q_r+0.5\varphi_{0,j}}{C_{0,j}+\breve{\gamma}}\ , & If\ BC\ \text{II}\ kind \\ \frac{\breve{\gamma}H_{0,j}+\gamma_i H_{0,j}+0.5\varphi_{0,j}}{C_{0,j}+\breve{\gamma}+\breve{\gamma}_i}, & If\ BC\ \text{III}\ kind \end{cases}$$

$$\varkappa'_{1,j} = \begin{cases} 0\ , & If\ BC\ \text{I}\ kind \\ \frac{\breve{C}_{0,j}}{\breve{C}_{0,j} + \breve{\gamma}\widetilde{m}_{0,j} + \tau_i + 0.5\varphi_{0,j}}, & If\ BC\ \text{II}\ kind \\ \frac{C_{0,j}}{\breve{C}_{0,j} + \breve{\gamma}\widetilde{m}_{0,j} + Q_1 + 0.5\varphi_{0,j}}, & If\ BC\ \text{III}\ kind \end{cases}$$

$$\nu'_{1,j} = \begin{cases} \xi_{0,j} & If\ BC\ \text{I}\ kind \\ \dfrac{\breve{\gamma}\widetilde{m}_{0,j} + \breve{C}_{0,j} + \tau_1 C_1 + 0.5\varphi_{x,j}}{\breve{C}_{0,j} + \breve{\gamma}\widetilde{m}_{0,j} + \tau_1 + 0.5\varphi_{0,j}} & If\ BC\ \text{II}\ kind \\ \dfrac{\breve{\gamma}\widetilde{m}_{0,j} + C_{0,j} + \tau_1 C_b + 0.5\varphi_{x,j}}{\breve{C}_{0,j} + \breve{\gamma}\widetilde{m}_{0,j} + Q_1 + 0.5\varphi_{0,j}} & If\ BC\ \text{III}\ kind \end{cases}$$

$$\varkappa_{2,j} = \begin{cases} 0\ , & If\ BC\ \text{I}\ kind \\ \dfrac{a_{N,j}}{a_{N,j} + \breve{\gamma}}, & If\ BC\ \text{II}\ kind \\ \dfrac{a_{N,y}}{\breve{a}_{N,j} + \breve{\gamma} + \breve{\gamma}_2}, & If\ BC\ \text{III}\ kind \end{cases}$$

$$\nu_{2,j} = \begin{cases} \xi_{N,j}, & If\ BC\ \text{I}\ kind \\ \dfrac{\breve{\gamma}H_{N,j} + Q_r + 0.5\varphi_{N,j}}{a_{n,j} + \breve{\gamma}}, & If\ BC\ \text{II}\ kind \\ \dfrac{\breve{\gamma}H_{N,j} + \gamma_2 H_{\text{B}} + 0.5\varphi_{N,j}}{a_{N,j} + \breve{\gamma} + \breve{\gamma}_2}, & If\ BC\ \text{III}\ kind \end{cases}$$

$$\varkappa'_{2,j} = \begin{cases} 0\ , & If\ BC\ \text{I}\ kind \\ \dfrac{\breve{a}_{N,j}}{\breve{a}_{N,j} + \breve{\gamma}\widetilde{m}_{N,j} + \tau_i + 0.5\varphi_{N,j}}, & If\ BC\ \text{II}\ kind \\ \dfrac{C_{0,j}}{\breve{a}_{N,j} + \breve{\gamma}\widetilde{m}_{N,j} + \breve{Q}_1 + 0.5\varphi_{N,j}}, & If\ BC\ \text{III}\ kind \end{cases}$$

$$\nu'_{2,j} = \begin{cases} \xi_{N,j}, & If\ BC\ \text{I}\ kind \\ \dfrac{\breve{\gamma}\widetilde{m}_{N,j} + \breve{C}_{N,j} + q_2 C_\tau + 0.5\psi_{N,j},}{\breve{C}_{N,j} + \breve{\gamma}\widetilde{m}_{N,j} + q_2 + 0.5\varphi_{N,j}} & If\ BC\ \text{II}\ kind \\ \dfrac{\gamma\widetilde{m}_{N,j} + \breve{C}_{N,j} + q_2 C_b + 0.5\psi_{N,j}}{\breve{C}_{n,j} + \breve{\gamma}\widetilde{m}_{n,j} + q_2 + 0.5\varphi_{n,j}}, & If\ BC\ \text{III}\ kind \end{cases}$$

To provide a positive solution to problem (8), certain conditions are imposed on the time step Δt. In [*Verigin et al.*, 1979; *Djumanov*, 2016, p. 28], this condition has the $= \mu \frac{\Delta x^2}{T_o H_o}$. To solve the system of equations (8), we apply the sweep method, according to which the solution if found in the form

$$\begin{cases} H_{i,j} = \alpha_{i+1,j} H_{i+1,j} + \beta_{i+1,j} \\ C_{i,j} = \alpha'_{i+1,j} C_{i+1,j} + \beta'_{i+1,j} \end{cases} \tag{10}$$

For *i = i-1*, we insert equation (10) into (8) after some algebraic transformations, the equation for $\alpha_{i+1,j}$, and $\beta_{i+1,j}$; $\alpha'_{i+1,j}$ and $\beta'_{i+1,j}$are obtained.

where, $$\begin{cases} \alpha_{i+1,j} = \dfrac{c_{i,j}}{b_{i+1,j} - c_{i,j}\,\alpha_{i,j}} \\ \alpha'_{i+1,j} = \dfrac{c'_{i,j}}{b'_{i,j} - a'_{i,j}\alpha'_{i1,j}} \end{cases}, \qquad \begin{cases} \beta_{i+1,j} = \dfrac{a_{i,j}\beta_{i,j} - d_{i,j}}{b_{i+1,j} - c_{i,j}\,\alpha_{i,j}} \\ \beta'_{i+1,j} = \dfrac{a'_{i,j}\beta'_{i,j} - d'_{i,j}}{b'_{i,j} - a'_{i,j}\alpha'_{i1,j}} \end{cases}$$

To determine $\alpha_{i,j}$, and $\beta_{i,j}$; $\alpha'_{i,j}$ and $\beta'_{i,j}$ the boundary conditions for ξ = 0 are used. From formulas (9) and (10) for i = 0 it is found that

$$\begin{cases} \alpha_{1,j} = \varkappa_{1,j} \\ \alpha'_{1,j} = \varkappa'_{2,j} \end{cases}, \qquad \begin{cases} \beta_{1,j} = \nu_{1,j} \\ \beta'_{1,j} = \nu'_{2,j} \end{cases},$$

Finding $\alpha_{1,j}$, and $\beta_{1,j}$; $\alpha'_{1,j}$ and $\beta'_{1,j}$ and passing from $i = 0$ to $i = i + 1$ by formula (10), all values of $\alpha_{i,j}$, and $\beta_{i,j}$; $\alpha'_{i,j}$ and $\beta'_{i,j}$ for all $i, j = 1,2, \ldots N$ using the direct sweep method are determined.the coefficients of the equations is found.

Calculations by formula (10) are carried out by passing from $i = i + 1$ to i, i.e., we use the inverse sweep method, and to begin these calculations, it is needed to know $H_{N,j}$ and $C_{N,j}$.

To determine these values in the system of equations (10), the value $i = N-1$, we obtain the following relationship:

$$\begin{cases} H_{N-1,j} = \alpha_{N,j} H_{N,j} + \beta_{N,j} \\ C_{N-1,j} = \alpha'_{N,j} C_{N,j} + \beta'_{N,j} \end{cases}$$

Solving it together with system (8) and after performing some algebraic operations, we obtain the values of $H_{N,j}$ and $C_{N,j}$, in the case of boundary conditions of the first kind.

$$H_{N,j} = \frac{\nu_{2,j} + \varkappa_{2,j}\beta_{N,j}}{1 - \varkappa_{2,j}\alpha_{N,j}}, \qquad C_{N,j} = \frac{\nu'_{N,j} + \varkappa'_{N,j}\beta'_{N,j}}{1 - \varkappa_{2,j}\alpha_{N,j}},$$

in case of boundary conditions of the second kind,

$$C_{N,j} = \frac{a'_{N,j}\beta'_{N,j} + (P'_1 + \gamma m'_{N,j})\overline{C}'_{N,j} + P_2 C_{\text{п}} + \mathrm{C}C_{N,j}}{(1 - \varkappa_{2,j}\alpha_{N,j})(a'_{N,j} + P'_1) + \gamma m'_{N,j} + P'_2 + SS_{N,j}}$$

in case of boundary conditions of the third kind,

$$C_{N,j} = \frac{(a'_{N,j} + P'_1)\beta'_{N,j} + (P'_2 + \gamma m'_{N,j})\overline{C}_{N,j} + P_3 C_{\text{п}} + CC_{i,j}}{(1 - \alpha'_{N,j})(a'_{N,j} + P'_1) + \gamma m'_{N,j} + P'_2 + SS_{i,j}}$$

Thus, all values of $H_{N,j}$ and $C_{N,j}$ are determined over the entire area of geofiltration and geomigration. Therefore, using the above schemes, it is possible to study the processes of groundwater movement and the relationship with surface water and changes in the concentration of fresh water pollution, both in space and in time.

The developed mathematical model has been introduced to solve national economic problems in certain regions of the Republic of Uzbekistan; for this, a method for calculating individual articles of groundwater balance has been carried out. At a specific object, using the example of the Akhangaran underground water fields for a certain period of time, a balance is determined (annual average, seasonal, average long-term, etc.). The balance consists of water inflow (infiltration, groundwater inflow into the balance circuit, overflow from other aquifers) and water flow (groundwater outflow, withdrawal, wedging — hidden in rivers, drains and open - spring; total evaporation). In the research area, a significant amount of infiltration occurs not only from water bodies, but also from the irrigation network and during irrigation of land (and plantations) [*Saidmuradov et al.*, 2008, p. 116; *Mavlonov et al.*, 2011, p. 269; *Mirzaev*, 1974].

Typization and schematization. Typization is the allocation of the same type of sites according to hydrodynamic features and possible design schemes. They are distinguished by the

generality of the flow structure, bedding conditions and the hydraulic state of aquifers, by the generality of the reservoir structure and the boundary conditions acting on them.

Schematization — identifying the main factors; determining the most reliable scheme of the structure of the reservoir and the calculated values of the parameters; simplification of filtration and replacement of spatial by planned or plane-vertical; simplification of the forms of borders and laws of change in them levels and costs of flows. In schematization takes into account the physical and theoretical foundations of the processes under study. First, the type of filtration, the flow dimension, and the size of the studied region are estimated, then the structure composition of the studied complex, the internal and external boundaries, and boundary conditions are established.

For the Akhangaran underground water fields as a whole, the physical and geographical situation of the region, taking into account the foregoing, is characterized by the following main factors affecting the formation of hydrogeological conditions. In the mountainous and foothill parts of the region, a significant amount of precipitation falls, supplying a dense hydrographic network and fractured waters of Paleozoic rocks. Submitting to the general slope of the terrain, the flows of surface and groundwater from the mountains enter the foothills, being consumed by absorption into friable fragments of the foothill plume, large sais and partly by evaporation. The relief structure of the described area and a significant slope within most of it (0.07–0.05) favor the accumulation of groundwater due to the infiltration of atmospheric precipitation and surface water and contribute to good groundwater flow within the Ahangaran pool [*Saidmuradov et al.*, 2008, p. 116].

The water content of the pools is completely dependent on their altitude and the amount of precipitation. The command position belongs to the catchment pool of the Akhangaran River, located at an altitude of 3.0–4.5 thousand *m* above sea level. The area of work, according to hydrological zoning, is fully included in the Pristashkent artesian pool and is located on the border of the mountain-folding and platform areas. The mountainous part of the area, composed of Paleozoic rocks, is part of the Chatkalo-Kuraminsky group of fractured water pools. A plain covered with a thick cover of the Pristashkent artesian pool [*Saidmuradov et al.*, 2008, p. 116; *Rakhmatullayev et al.*, 2012, p. 67].

The hydrological type of mode is traced in the floodplain and the first floodplain terrace of the river of Ahangaran region. The annual amplitude is from 0.5 to 2.5 m. The mixed (hydrological-irrigation) type of mode is traced in the articulation band of the floodplain with I and II floodplain, in the flood zone, its width varies from hundreds of meters to 1.0 km. Here the annual amplitude of the level fluctuation is 2–3 m. A large area of the valley is characterized by the irrigation type of mode (more correctly, the infiltration-stock type of mode).

Particular attention in the schematization of hydrogeological conditions was given to the geofiltration characteristics of the main aquifer — a complex of Quaternary sediments — by territory, area and thickness of aquifers. Hydrogeological zoning was carried out according to geostructural, geomorphological and lithological facies. Technogenic objects affecting the hydrodynamic state of groundwater are diverse. For the purposeful analysis, assessment and identification of manifestations of the impact of technogenic objects on the hydrodynamic state of groundwater and the consequences of their impact on the ecological and hydrogeological situation in the territories, the need arises for their typification [*Bindeman*, 1963; *Umarov*, 1978].

RESULTS OF RESEARCHES AND THEIR DISCUSSION

Conducting experiments. In general, geomigration modeling includes several successive interconnected steps:

1) Geofiltration calculation, which determines the water level, and then the speed of movement of solutions and the components contained in them in the direction of the coordinate axes at time τ^k.

2) Independent calculation of the dispersion component of mass transfer by τ^k for $\Delta\tau$.

3) Independent calculation of the action of effluents of a substance, including the calculation of interactions in the water – rock system, at the same time step. As a result of calculations, in accordance with geofiltration, the distribution in the calculation nodes of the current levels, as well as the compositions of other calculated parameters of the liquid phases, is determined, after which all the calculations for the next time step, etc., are repeated until a specified final point in time is reached.

Based on the developed modeling programs for estimating forecast resources taking into account changes in water management conditions, the results on the current state of groundwater fields were obtained and recommendations were made on the use of groundwater for irrigation in order to increase the water supply of the valley (fig. 1). Unlike the traditional presentation, the electronic version of the results is presented by means of a geographic information system (GIS), and the possibility of developing the contents of an electronic map in a semi-automatic mode has been implemented [*Djumanov*, 2016, p. 258; *Zlotnik et al.*, 1985].

It should be noted a natural increase in the salinity and pollution of groundwater from the floodplain to the sides of the valley. The location within the valley of large industrial facilities from whose territory sewage contaminated water comes, as well as irrigated agriculture with the use of fertilizers, pesticides, herbicides create an unfavorable sanitary condition of groundwater. Deterioration of surface water and groundwater in the river valley. Ahangaran has been observed since 1967. An increased content of nitrite phenols was found in the water intakes of Kibray, Yuzhny, Sergeli, Yangiyul. The upper part of the aquifer outside the floodplain is contaminated with nitrates (0.5–1.0 MPC). Three types of groundwater modes are distinguished in the Ahangaran Valley: hydrological, irrigation, and mixed [*Saidmuradov et al*., 2008, p. 116; *Mirzaev*, 1974].

Taking into account the level, area and specific features of the manifestation of the impact and their consequences, technogenic objects are divided into:

- irrigation systems;
- systematic reclamation drainage systems;
- reservoirs and large hydraulic units;
- large irrigation canals;
- groundwater intakes.

The structural block diagram of the model is based on separate maps of the depths of the soles of the assigned layers relative to the surface of the relief (fig. 1). The geometry of the terrain model is determined by the coordinate system in which the digital surface model is created. The choice of a local rectangular coordinate system makes it possible to simplify the combination of terrain models and urban objects that are created in a rectangular coordinate system. To enter the absolute elevation of the earth's surface into the model, we used the shp file of relief contour lines prepared in ArcGIS in the Gauss-Krueger metric coordinate system (Pulkovo, 1942), from which, by interpolation, the absolute elevation marks were determined in each cell of the model grid [*Djumanov*, 2016, p. 28; *Yurkov, Lukina*, 2006, p. 96]. To specify the roof and sole of each selected layer in the model, .xls-files were used that contained the absolute marks of the roof and the sole of each layer at anchor points with known coordinates.

To form a geofiltration model, filtration coefficients were introduced for each calculation layer. During the solution, the water conductivity is calculated using the entered filtration coefficients and the absolute marks of the upper and lower boundaries of each layer.

The discussion of the results. As a result of the work, several versions of the photorealistic model were obtained, but these are only the first steps towards a comprehensive system that provides for the possibility of geofiltration and geomigration modeling, as well as three-dimensional display of the results of modeling of research territories (fig. 2).

Operational monitoring, the most characteristic for the boundary representation, is considered; calculation of the overall volume; calculating the normal at a point; calculation of

surface curvature; finding the point of intersection with the beam or curve; determining the position of a point relative to the surface.

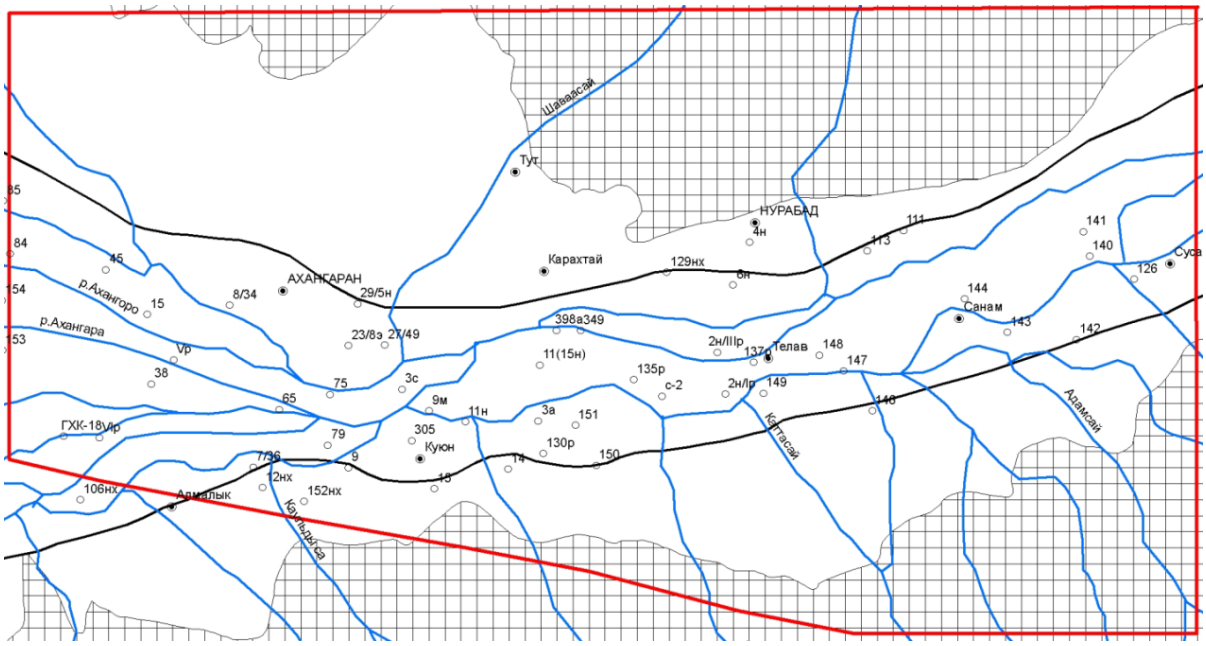


Fig. 1. Map of the actual material of the object of study

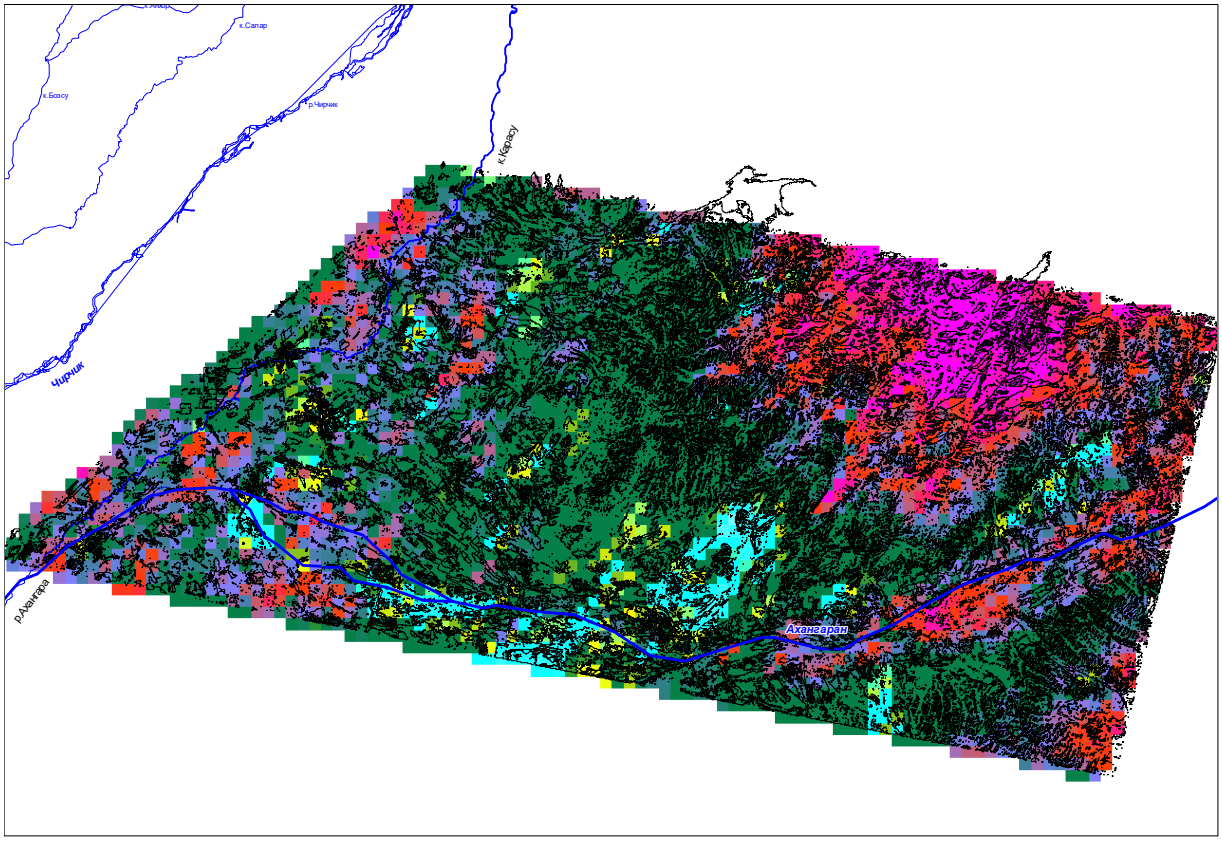


Fig. 2. 3D view of the object

The basic operations include transforming materials on a GIS basis and creating a primitive, its modification, local modification of curves and surfaces, automatic construction of fillets, joints and cross-linking of surfaces, automatic search for intersections, rotation, extrapolation of data, as well as transforming an object into a plane [*Djumanov*, 2016, p. 258; *Yurkov, Lukina*, 2006, p. 96]. Surface modeling is the basis for the construction of geofiltration and geomigration models, nodes and the integration core.

CONCLUSIONS

The tasks of geofiltration and geomigration modeling of groundwater and visualization is an important area of computer graphics. Since data on physical objects of the real world cannot be entirely entered into a computer, it is necessary to a priori limit the amount of information about an object within the framework of the issue of interest to us. For example, the task of GIS rendering an object with shading raises such problems as: Mineralization and mass transfer of the underground hydrosphere, how to visualize?, What parts of the object are visible?, What color should be assigned to each element of the object?

In a generalized form, it looks as follows: the characteristic of the projection apparatus, the construction of images of the main geofiltration and geomigration elements, the work with the constructed images in accordance with the geographic coordinate reference.

A research technique has been developed to simulate geofiltration and geomigration processes, to determine the balance of groundwater, and the hydrogeological parameters of the aquifer have been calculated from it. The features are considered and the boundary and initial conditions are justified.

The calculated values of the natural resources of groundwater by the parameters of their level mode in the Ahangaran pool allowed to establish the permissible convergence (3.9–25.9 %) of resource estimates according to the amplitudes of fluctuations in the level of groundwater and to the geometric modeling of groundwater fields.

Based on the assessment of changes in the hydrodynamic and hydrochemical parameters of groundwater, it was revealed that the level mode in the riverine zone and in the valleys of natural sai is closely interconnected with runoff in the watercourse, where level fluctuations depend on the water content of the year. Relative to the last low-water 2010, the average annual levels of PV are everywhere within the indicated zones during 2014–2016 tended to rise.

The level mode of groundwater within the high terraces of fields where irrigated agriculture is developed depends on the type of crops grown and the rate of irrigation. Therefore, the rate of fluctuation of average annual levels and their absolute value are not unambiguous in individual areas and to a less extent depend on the water content of the year.

REFERENCES

1. *Abutaliev F.B, Khabibullaev I.* Solution of the problem of filtering multilayer aquifers. Modern methods of research and data processing in hydrogeology. Tashkent: Central Asian Institute of Geology and Mineral Raw Materials, 1980. Iss. 6. P. 15–22 (in Russian).

2. *Anderson D., Tonnichell D., Pletcher R.* Computational hydromechanics and heat transfer. Moscow: Mir, 1990. V. I. 352 p. (in Russian).

3. *Bindeman N.N.* Assessment of operational groundwater reserves. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1963. 203 p. (in Russian).

4. *Djumanov J.Kh.* Mathematical modeling of geofiltrational of processes of the regional hydrogeological systems. European Science Review, 2016. Iss. 11–12. P. 28–33. DOI: https://doi.org/10.29013/ESR-17-11.12-28-33.

5. *Djumanov J.Kh.* Geoinformation technologies in hydrogeology. Tashkent: HYDROENGEO, 2016. 258 p.

6. *Fletcher K.* Computational methods in fluid dynamics. Moscow: Mir, 1991. V. 1. 504 p. V. 2. 552 p. (in Russian).

7. *Hasanov A.S.* Development of hydrogeology and engineering geology in Uzbekistan. Tashkent: HYDROENGEO, 2005. 212 p.
8. *Khabibullaev I.Kh.* Numerical modeling of groundwater filtration of irrigated massifs and application packages. Tashkent: Fan, 1991. 115 p. (in Russian).
9. *Mavlonov A.A., Borisov V.A., Djumanov J.H.* Monitoring of groundwater of irrigated lands and desert territories of the Republic of Uzbekistan. Drinking groundwater. Study, use and information technology. Proceedings of International scientific conference. Part 3. Moscow Region, Green, 2011. P. 269−278.
10. *Mirzaev S.Sh.* Formation and distribution of groundwater reserves in Uzbekistan, issues of their study methods and problems of economic use. Tashkent: Fan, 1974. 224 p. (in Russian).
11. *Rakhmatullayev Sh., Frederic H., Kazbekov J., Philippe C., Djumanov J.Kh.* Groundwater resources of Uzbekistan: an environmental and operational overview. Central European Journal of Geosciences, 2012. No 4 (1). P. 67–80.
12. *Saidmuradov Zh.Z., Djumanov J.X., Chertkov Yu.T., Saidmuradov Z.S., Eshankulov O.R.* To the issue of substantiating sources of household water supply to rural settlements (on the example of the Tashkent region). Problems of providing water resources to rural settlements in dry years and ways to solve them. Proceedings of Republic scientific conference, Tashkent, 2008. P. 116–119.
13. *Samarsky A.A.* Theory of difference schemes. Moscow: Nauka, 1989. 616 p. (in Russian).
14. *Umarov U.U.* Methods of mathematical modeling of hydrogeological processes. Tashkent: Fan, 1966. 112 p. (in Russian).
15. *Umarov U.U.* Automation information retrieval system “Land reclamation hydrogeology” and permanent models. Tashkent: Fan, 1978, 120 p. (in Russian).
16. *Usmanov R.K., Djumanov J.Kh., Rasulev B.T.* On the integration of the fuzzy-plural approach into the process of numerical modeling of the hydrogeological conditions of the Kibray water intake. Ecological Bulletin. Tashkent, 2007. P. 37−39.
17. *Verigin N.N., Vasiliev S.V., Kuranov N.P. et al.* Methods for predicting the salt mode of soils and groundwater. Moscow: Kolos, 1979. 336 p. (in Russian).
18. *Yurkov V.Yu., Lukina O.V.* Interval and fuzzy geometry in the system of development and diagnosis of the spatial factor of intelligence. Omsk Scientific Bulletin, 2006. P. 96–99 (in Russian).
19. *Zlotnik V.A., Kalinin M.Yu., Usenko V.S., Cherepansky M.M.* Prediction of the effect of groundwater exploitation on hydrogeological conditions. Minsk: Science and technology, 1985. 296 p. (in Russian).

УДК: 502.171:546.212:574.58 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-253-263**

Скрипка Г.И.[1], Ивлиева О.В.[2,3], Беспалова Л.А.[4,5], Филатов А.А.[6], Сапрыгин В.В.[7]

МОНИТОРИНГ ОПАСНЫХ БЕРЕГОВЫХ ПРОЦЕССОВ ЦИМЛЯНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

АННОТАЦИЯ

В данной статье оценивается степень проявления опасных экзогенных геологических процессов берегов Цимлянского водохранилища (абразионных, оползневых, эрозионных) на современном этапе переформирования его берегов. Предложена новая оригинальная методика мониторинга морфологических и морфометрических характеристик различных типов берегов водохранилища с использованием беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и инструментария программы Agisoft Photoscan. Для ряда участков берегов Цимлянского вдхр. выполнена оценка последствий активизации абразионной деятельности, выразившихся в отступании бровки береговых обрывов и сокращении земельного фонда.

В автоматизированной информационной системе государственного мониторинга водных объектов мониторинг эрозионной расчленённости водоохраной зоны является обязательным. Разработана и апробирована методика проведения мониторинга эрозионных процессов водоохранных зон водных объектов с использованием программно-аппаратного комплекса, созданного на базе беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и ГИС-технологий, определён оптимальный тип цифровых моделей рельефа для оценки густоты эрозионной сети. На основе серий фотоснимков, выполненных беспилотным летательным аппаратом, по цифровым моделям рельефа (ЦМР) и ортофотопланам, созданным в программе Agisoft Photoscan, определены типы эрозионных форм рельефа. Также проведено измерение морфометрических характеристик эрозионных форм рельефа, определена густота эрозионной сети (К) на ряде участков водоохранной зоны побережья Цимлянского вдхр.

В водоохранной зоне водохранилища выполнен всесторонний анализ объектов антропогенной деятельности, проведена оценка демографической нагрузки на его прибрежные территории. Выполнено зонирование территорий по степени антропогенной нагрузки, позволяющее в дальнейшем организовать планирование своевременных мер по

[1] Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр (ФГБУ РосИНИВХЦ), ул. Филимоновская, д. 174, 344000, Ростов-на-Дону, Россия;
e-mail: **skripka.grisha@yandex.ru**
[2] Южный федеральный университет, ул. Б. Садовая, д. 105, 344006, Ростов-на-Дону, Россия;
e-mail: **ivlieva.o@mail.ru**
[3] Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр (ФГБУ РосИНИВХЦ), ул. Филимоновская, 174, 344000, Ростов-на-Дону, Россия;
e-mail: **ivlieva.o@mail.ru**
[4] Южный федеральный университет, ул. Б. Садовая, д. 105, 344006, Ростов-на-Дону, Россия;
e-mail: **bespalowaliudmila@yandex.ru**
[5] Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр (ФГБУ РосИНИВХЦ), ул. Филимоновская, д. 174, 344000, Ростов-на-Дону, Россия;
e-mail: **bespalowaliudmila@yandex.ru**
[6] Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр (ФГБУ РосИНИВХЦ), ул. Филимоновская, д. 174, 344000, Ростов-на-Дону, Россия;
e-mail: **fgurostov61@yandex.ru**
[7] Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр (ФГБУ РосИНИВХЦ), ул. Филимоновская, д. 174, 344000, Ростов-на-Дону, Россия;
e-mail: **vv.saprygin@gmail.com**

защите прибрежных зон. Полученные в ходе работы результаты позволили сделать вывод об участках водоохранной зоны водохранилища, наиболее подверженных антропогенному воздействию, и предложен комплекс мер по его снижению.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Цимлянское водохранилище, мониторинг состояния берегов, беспилотный летательный аппарат, антропогенная нагрузка, эрозионные формы рельефа

Grigory I. Skripka[1], Olga V. Ivlieva[2,3], Lyudmila A. Bespalova[4,5], Anton A. Filatov[6], Vladislav V. Saprygin[7]

MONITORING OF DANGEROUS SHORE PROCESSES OF TSIMLYANSK RESERVOIR USING GIS-TECHNOLOGIES

ABSTRACT

In the article, the degree of displaying dangerous exogenetic geological processes (abrasion, landslide, erosion) of the Tsimlyansk Reservoir at the present stage of reforming its shores is assessed. A new original methodology for monitoring morphological and morphometrical characteristics of different shore types of the reservoir, using unmanned aerial vehicles (UAV) and Agisoft Photoscan tooling is proposed. For a number of shore sections of the Tsimlyansk reservoir, assessment of consequence for stirring up abrasion activity being expressed in stepping back the edge of shore steeps and reducing land fund is carried out.

In the automated information system of water bodies state monitoring, a compulsory index is monitoring of erosion dismemberment. Methods to carry out erosion processes monitoring in water protection zones (WPZ) of water bodies using software and apparatus complex, created on the base of UAVs and GIS-technologies are developed and tested, an optimal type of digital elevation models (DEM) for assessing erosion network density is determined. Based on series of photographs carried out by UAVs by the DEMs and orthophotomaps, created using Agisoft Photoscan software, the relief erosion forms are determined. Morphometrical characteristics of the relief erosion forms are also measured, the erosion network density (K) for a number of plots in the water protection zones of the Tsimlyansk Reservoir coast is determined.

In the protection zone of the Tsimlyansk Reservoir, comprehensive analysis is carried out, assessment of demographic load on the coastal area of the reservoir is conducted. Territorial zoning according to the degree of demographic load is carried out and it will allow in the future to organize planning timely measures for protecting coastal zones. The results obtained in the course of work allowed to make conclusions for the sections of the reservoir water protection

[1] Russian Information-Analytic and Research Water Economy Centre (FSBI RosIRWEC), Filimonovskaya str., 174, 344000, Rostov-on-Don, Russia; *e-mail:* **skripka.grisha@yandex.ru**
[2] Southern Federal University, B. Sadovaya str., 105/42, 344006, Rostov-on-Don, Russia; *e-mail:* **ivlieva.o@mail.ru**
[3] Russian Information-Analytic and Research Water Economy Centre (FSBI RosIRWEC), Filimonovskaya str., 174, Rostov-on-Don, Russia; *e-mail:* **ivlieva.o@mail.ru**
[4] Southern Federal University, B. Sadovaya str., 105/42, 344006, Rostov-on-Don, Russia; *e-mail:* **bespalowaliudmila@yandex.ru**
[5] Russian Information-Analytic and Research Water Economy Centre (FSBI RosIRWEC), Filimonovskaya str., 174, Rostov-on-Don, Russia; *e-mail:* **bespalowaliudmila@yandex.ru**
[6] Russian Information-Analytic and Research Water Economy Centre (FSBI RosIRWEC), Filimonovskaya str., 174, Rostov-on-Don, Russia; *e-mail:* **fgurostov61@yandex.ru**
[7] Russian Information-Analytic and Research Water Economy Centre (FSBI RosIRWEC), Filimonovskaya str., 174, Rostov-on-Don, Russia; *e-mail:* **vv.saprygin@gmail.com**

zone most subject to anthropogenic activity and to propose a package of measures for its reducing.

KEYWORDS: Tsimlyansk Reservoir, monitoring of shore state, unmanned aerial vehicle, anthropogenic load, relief erosion forms

ВВЕДЕНИЕ

Цимлянское водохранилище построено более 60 лет назад; оно характеризуется широким распространением легко разрушаемых лессовидных пород и аллювиально-флювиогляциальных песков в обрывах, имеет очень низкую лесистость берегов, и поэтому их разрушение с разной степенью интенсивности наблюдается до сих пор. Пункты наблюдения сети государственного мониторинга водных объектов (ГМВО) в большинстве случаев располагаются вблизи хозяйственных и жилых объектов и не могут обеспечить получения информации об оценке и прогнозе изменения берегов на всём протяжении береговой линии. В задачи мониторинга входит оценка степени проявления опасных береговых процессов (абразионных, оползневых), оценка густоты эрозионной сети водоохранной зоны водных объектов и оценка антропогенного воздействия на водоохранную зону.

ФГБУ РосИНИВХЦ с 2017 г. осуществляет разработку методик мониторинга состояния берегов водных объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов (БЛА), а для анализа полученных материалов — ГИС-технологий. В качестве объекта исследования выбрано Цимлянское вдхр.

Анализ ряда научных публикаций [*Лопухин*, 1966; *Вендров, Клюева*, 1972; *Иконников,* 1972; *Качугин*, 1975; *Золотарёв и др.,* 1983] фондовых материалов ряда организаций[1] показал, что переформирование берегов Цимлянского вдхр. активно проявляется на протяжении всей истории его эксплуатации и характеризуется не меньшей интенсивностью и в современный период [*Kosolapov et al*., 2018].

Прибрежная зона и акватория водохранилища (более 900 км) эксплуатируются многими отраслями хозяйства; в береговой полосе находятся такие города, как Волгодонск, Цимлянск, Калач-на-Дону, Котельниково, многочисленные населённые пункты, гидротехнические сооружения, водозаборы, АЭС и пр., что говорит о необходимости изучения вопросов интенсивности проявления опасных экзогенных процессов, установления зон интенсивного разрушения берегов. Более половины берегов Цимлянского водохранилища приходится на берега абразионных типов: абразионные, абразионно-обвальные, абразионно-осыпные, абразионно-оползневые. Берега характеризуются высокой интенсивностью проявления эрозионных и гравитационных склоновых процессов и нуждаются в разработке и реализация мер по предотвращению негативного их развития.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оценка проявления опасных экзогенных геологических процессов произведена на основе наблюдений за берегами Цимлянского водохранилища за период 1953 по 2016 гг. по реперной сети и данных с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в 2017–2019 гг. При обследовании водоохраной зоны Цимлянского водохранилища с использованием БПЛА (модель Phantom 4Pro) была проведена оценка морфологических и

[1] Отчёт о натурных обследованиях Цимлянского водохранилища и его береговой зоны, выполненных в 2012−2013 гг. СевКавНИИВХ, 2013. 143 с.;
Отчёт по результатам обследования водоохранной зоны Цимлянского водохранилища в границах Цимлянского района Ростовской области ФГБУ «УВРЦВ». Цимлянск, 2013. 28 с.;
Схема первоочередных мероприятий по берегоукреплению Цимлянского водохранилища. Пояснительная записка. АО Южгипроводхоз. Ростов-на-Дону, 1993. 80 с.

морфометрических показателей берегов различных типов, эрозионных форм, интенсивность проявления береговых процессов.

Полученные материалы позволили решить следующие задачи:

- оценить динамику берегового обрыва;
- уточнить схему типов берегов Цимлянского вдхр.;
- произвести расчёт густоты эрозионной сети водоохраной зоны водохранилища на отдельных участках;
- дать оценку антропогенного воздействия на водоохранную зону Цимлянского вдхр.

По материалам съёмок участка берега водохранилища, выполненных с БПЛА через определенный интервал времени, были построены ортофотопланы территории с использованием ПО Agisoft PhotoScan Professional. Далее осуществлялось сопоставление разновременных ортофотопланов для наблюдения за положением бровки береговых обрывов, производились замеры величины её смещения, определялась площадь земель, утерянных в результате разрушения берегов.

Сопоставление разновременных ортофотопланов осуществлялось двумя способами: по опорным точкам, установленным на местности, и путём «параллельного» рассмотрения разновременных ортофотопланов, когда привязки к объектам на местности невозможно было установить.

Таким образом, удалось установить существенные изменения положения бровки берегового склона и выявить участки активизации экзогенных геологических процессов (ЭГП) на участках берега, не обеспеченных регулярными наблюдениями по створам сети ГМВО (Государственного мониторинга водоохраной зоны). В течение 2018–2019 гг. удалось осуществить несколько повторных сьёмок на территории Дубовского и Цимлянского муниципальных районов Ростовской области и Котельниковского муниципального района Волгоградской области.

В 2017 г. на примере участка водоохранной зоны Цимлянского вдхр. в Дубовском районе Ростовской области была апробирована методика расчёта густоты эрозионной сети территории на основе фотоматериалов, полученных беспилотным летательным аппаратом, по которым в Agisoft Photoscan Professional созданы цифровые модели рельефа с горизонталями, построенными через 1 и 5 м. Непосредственно оцифровка и расчёты выполнялись в ESRI ArcMap. Данная методика позволила оценить количественные показатели развития овражно-балочной сети, провести районирование степени проявления эрозионных процессов и исследовать морфологические и морфометрические характеристики эрозионных форм.

Третье направление исследований касалось оценки антропогенного воздействия на водоохранную зону Цимлянского вдхр. Согласно Водному кодексу, в его пределах запрещена любая хозяйственная деятельность, т.к. оно имеет рыбохозяйственную ценность[1]. Однако, по данным мониторинга ФГУ УВРЦВ, здесь сосредоточено значительное количество антропогенных объектов. Была проанализирована хозяйственная деятельность в водоохранной зоне Цимлянского вдхр.; проведена оценка демографической нагрузки на прибрежные территории водохранилища.

Все показатели антропогенной нагрузки были проранжированы по количеству объектов, плотности их расположения и степени воздействия в баллах с учётом весовых коэффициентов [*Коробов,* 2008]. Для комплексной оценки антропогенной нагрузки, кроме степени воздействия на ВЗ антропогенных объектов, были исследованы показатели демографической нагрузки, учитывающей численность и плотность населения. По полученным данным была построена схема антропогенного давления, согласно методике [*Дмитриев, Фрумин,* 2004].

[1] Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 N 74-ФЗ (ред. 29.07.2017)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По данным средних показателей скоростей смещения береговой линии за период 2011–2016 гг. была построена карта-схема «Интенсивность проявления абразионно-оползневых процессов Цимлянского водохранилища в современный период (2011–2016 гг.)» [*Kosolapov et al.*, 2018] (рис.1).

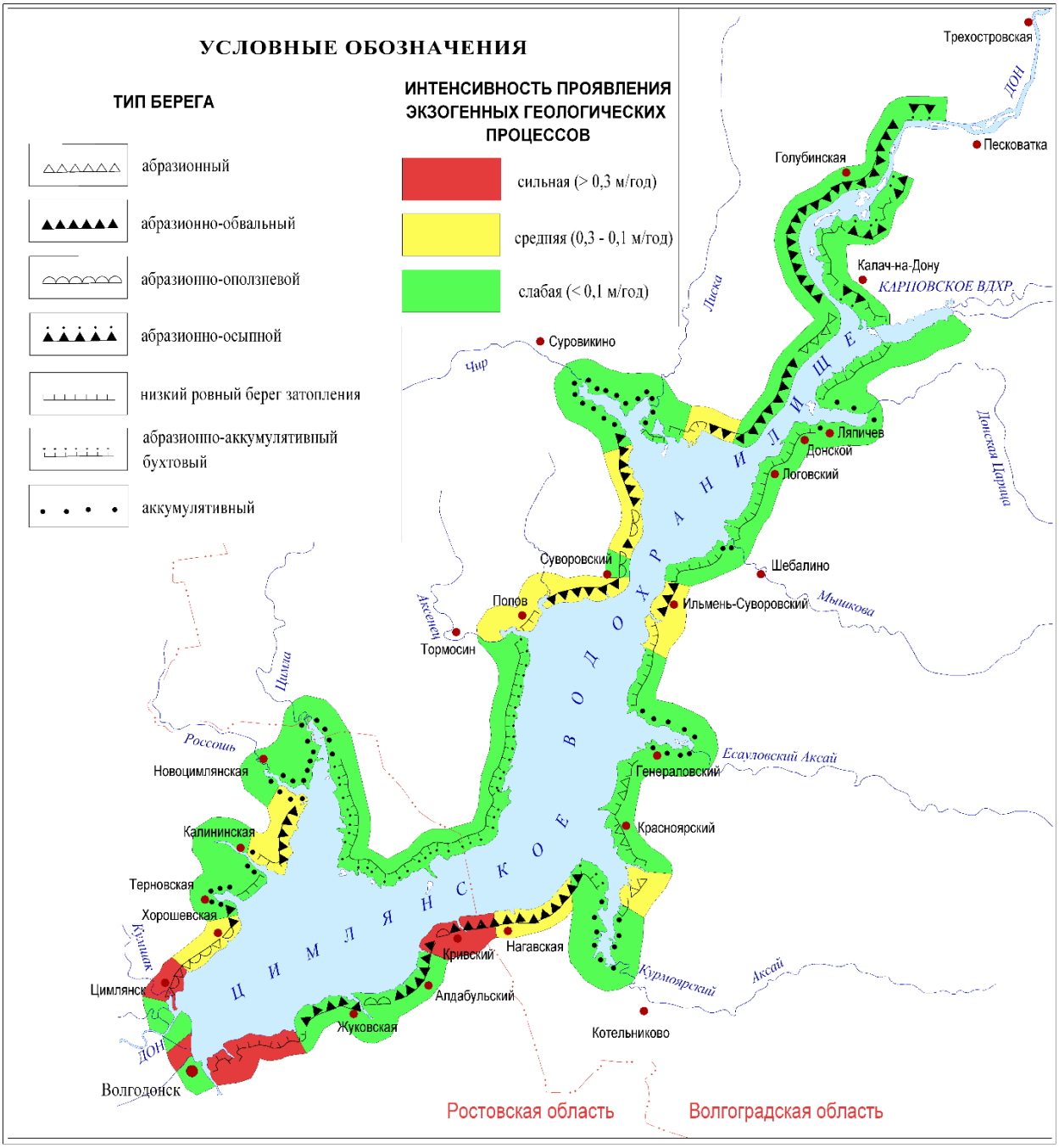


Рис. 1. Интенсивность проявления экзогенных геологических процессов (абразионно-оползневых) Цимлянского водохранилища в современный период (2011–2016 гг.)

Fig. 1. Intensity of the manifestation of the exogenous geological processes (abrasive-landslide) of Tsimlyansk Reservoir in the contemporary period (2011–2016)

Сильная абразия отмечается на 7 % побережья, средняя степень отступания берега отмечается на протяжении 19 %, большая часть берегов имеет слабую степень проявления экзогенных геологических процессов —74 %.

В отдельные годы может наблюдаться резкая активизация экзогенных геологических процессов, обусловленная синоптическими и гидродинамическими факторами. Так, в 2018 г. была отмечена резкая активизация абразии берегов в результате волновой деятельности в конце весны − начале лета 2018 г. Уровень воды водохранилища, соответствующий НПУ (нормальному подпорному уровню), наблюдался только в мае 2004 г.; в 2005, 2006 и 2008 гг. в течение непродолжительного периода был на 30−40 см ниже НПУ. В остальное время, начиная с мая 2004 г. и по май 2018 г., он был на 1−2 м ниже НПУ. В августе 2018 г. наблюдалось совпадение штормовых ветров с высоким (практически равным НПУ) уровнем воды в водохранилище. Мониторинг с использованием не только традиционных, но и современных средств контроля — использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) — показал значительное разрушение берегов на отдельных участках. Взаимное позиционирование ортофотопланов участка берега, протяжённостью около 1 600 м, расположенного между х. Овчинников и ст. Жуковская, показало, что в результате шторма в мае 2018 г. кромка берегового обрыва сместилась на 5−12 м, а площадь потерянной в результате размыва земли составила более 20,5 тыс. м^2. В х. Овчинников почти полностью были разрушены берегозащитные сооружения. Значительные разрушения отмечены также в районе х. Алдабульский, х. Кривской, ст. Нагавской. На нескольких участках, преимущественно примыкающих к входу в Кривской, Жуковский заливы, зафиксировано обрушение блоков шириной от 1 до 6,5 м. Более мелкие разрушения выявлены и на других интервалах участка. Осенью 2019 г. выявлено не менее 20 участков берега, на которых отмечены разнообразные по форме и интенсивности проявления ЭГП.

Чаще всего экзогенные геологические процессы проявляются в виде:

- трещин отрыва, проходящих на расстоянии от десятков сантиметров до первых метров от бровки обрыва;
- блоков горных пород, имеющих ширину от десятков сантиметров до 1,5−2-х метров длиной до 10−15 м;
- смещения и размыв материала, образовавшихся ранее обвалов;
- редких оплывин площадью до 300–350 м^2.

Выполненные в августе и октябре 2019 г. замеры по реперам, установленным ФГБУ РосИНИВХЦ для наблюдения с БПЛА, отмечают стабильное положение кромки берегового обрыва, что подтверждают и наземные замеры. Причинами крайне низкой активности абразионных процессов в современный период являются резкое снижение интенсивности береговых процессов вследствие значительного понижения уровня воды в водохранилище и отсутствие обильных атмосферных осадков.

Под действием временных русловых потоков возникает сложный рельефообразующий процесс — овражная эрозия (возникновение и развитие отрицательных форм рельефа). Эрозионные формы имеют разную длину, глубину, т.е. отличаются многообразием морфометрических и морфологических характеристик. По морфометрическим данным выделяют: овраги, эрозионные борозды (рытвины) и промоины, которые являются неотъемлемой частью эрозионных процессов рельефа водоохранной зоны Цимлянского вдхр. Такое многообразие форм обусловлено геологическим строением побережья, наличием растительности, особенностью водных потоков на различных участках. На одном участке основной формой может выступать овраг, на другой — множественные рытвины и борозды. Ортофотопланы, полученные в результате съёмок береговой зоны с БПЛА, позволяют получить большой спектр данных о морфометрических особенностях овражно-балочной сети (координаты, периметр, площадь оврага, глубина оврага, длина тальвега) и построить поперечные профили оврага.

Таким образом, использование БПЛА позволяет осуществлять мониторинг овражно-балочной сети без проведения трудоёмких полевых работ по замеру эрозионных форм рельефа, и, кроме того, осуществлять мониторинг береговой зоны малодоступных участков побережья со сложным рельефом. Использование БПЛА позволяет дистанционно получить все параметры рельефа, необходимые для вычисления величины коэффициента эрозионного расчленения рельефа.

В автоматизированной информационной системе государственного мониторинга водных объектов мониторинг эрозионной расчленённости, являющейся обязательным показателем[1], характеризуется густотой эрозионной сети (К) и определяется по формуле К=L/P, где L — длина эрозионной сети на площади P. Определение значения К осуществлялось по цифровым моделям рельефа (ЦМР) и ортофотопланам, созданным в программе Agisoft Photoscan Professional на основе серий фотоснимков, выполненных беспилотным летательным аппаратом. ЦМР представлены изображением рельефа с помощью изогипс, построенных через 5 м, и картами высот, на которых положение изолиний рельефа изображается изменением цвета и его интенсивности. Для проведения сравнительного анализа методических приёмов расчёта было выбрано 5 участков водоохранной зоны Цимлянского вдхр., отличающихся геологическим строением, степенью эрозионной изрезанности, положением в разных частях водохранилища и др. параметрами. Для каждого из обследованных участков определялась протяжённость тальвегов всех выделенных на его территории эрозионных форм. Тальвеги балок и оврагов уверенно фиксируются практически на всех видах материалов, использованных для оценки густоты эрозионной сети.

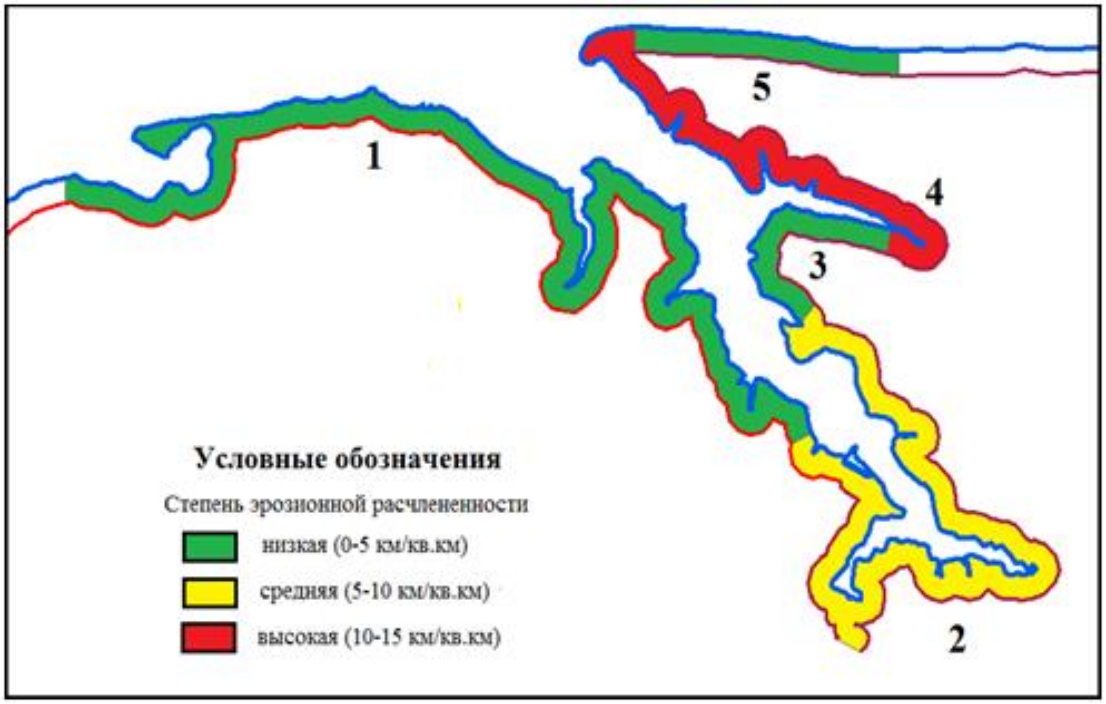


Рис. 2. Изменение степени эрозионной расчленённости участка водоохранной зоны Цимлянского водохранилища в Дубовском районе Ростовской области
Fig. 2. Change in the degree of the erosional dismemberment of the Tsimlyansk Reservoir of the water-protection zone sector in the Dubovskiy district of the Rostovskaya region

[1] Об утверждении форм и порядка представления сведений, полученных в результате наблюдений за водными объектами, заинтересованными федеральными органами исполнительной власти, собственниками водных объектов и водопользователями. Приказ МПР РФ от 6 февраля 2008 г. № 30

В пределах водоохранной зоны Цимлянского вдхр. в Дубовском р-не Ростовской обл. было выделено 5 полигонов, отличающихся по густоте эрозионной сети. При средней величине эрозионной изрезанности 9 км/км^2, значения К изменялось от 2 до 15 км/км^2. С помощью линейной интерполяции значения К было ранжировано на три степени эрозионной расчленённости: 0–5 — низкая, 5–10 — средняя, 10–15 — высокая (рис. 2).

По данным мониторинга ФГУ УВРЦВ, в береговой зоне Цимлянского водохранилища сосредоточено значительное количество антропогенных объектов. Основными объектами, оказывающими влияние на ВЗ Цимлянского вдхр., являются земельные участки, базы отдыха, населённые пункты, свалки, кладбища, сбросные каналы сточных вод, промышленные объекты и пр. Для анализа степени нагрузки объектами на ВЗ Цимлянского вдхр. с помощью метода экспертных оценок были введены весовые коэффициенты (баллы), позволяющие наиболее точно определить влияние каждого из рассматриваемых факторов [*Коробов,* 2008].

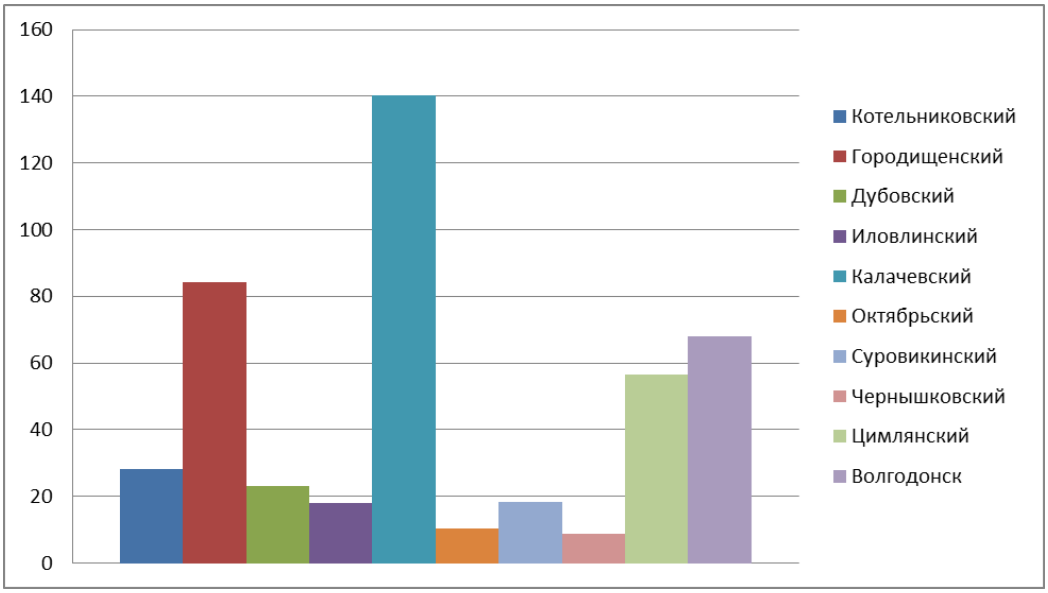


Рис. 3. Степень загруженности антропогенными объектами ВЗ Цимлянского водохранилища, баллы
Fig. 3. Degree of Tsimlyansk Reservoir WPZ overloading by the anthropogenic objects, the marks

Все показатели антропогенной нагрузки были проранжированы по количеству объектов, плотности их расположения и степени воздействия в баллах с учётом весовых коэффициентов. В результате установлено, что по загруженности антропогенными объектами ВЗ Калачевский р-н испытывает самую сильную антропогенную нагрузку. Средними показателями характеризуются Цимлянский, Городищенский р-ны и г. Волгодонск. ВЗ остальных районов имеет относительно невысокий показатель.

Для комплексной оценки антропогенной нагрузки, кроме степени воздействия на ВЗ антропогенных объектов, были исследованы показатели демографической нагрузки. Демографический фактор, учитывающий численность и плотность населения, отражается коэффициентом антропогенного давления К:

$$\lg K = -0{,}97 + 0{,}90 \lg ПН,$$

где К — коэффициент антропогенного давления, ПН — плотность населения, чел./км^2. По сумме баллов нагрузки от антропогенных объектов и демографической компоненты была составлена карта интегральной оценки антропогенной нагрузки.

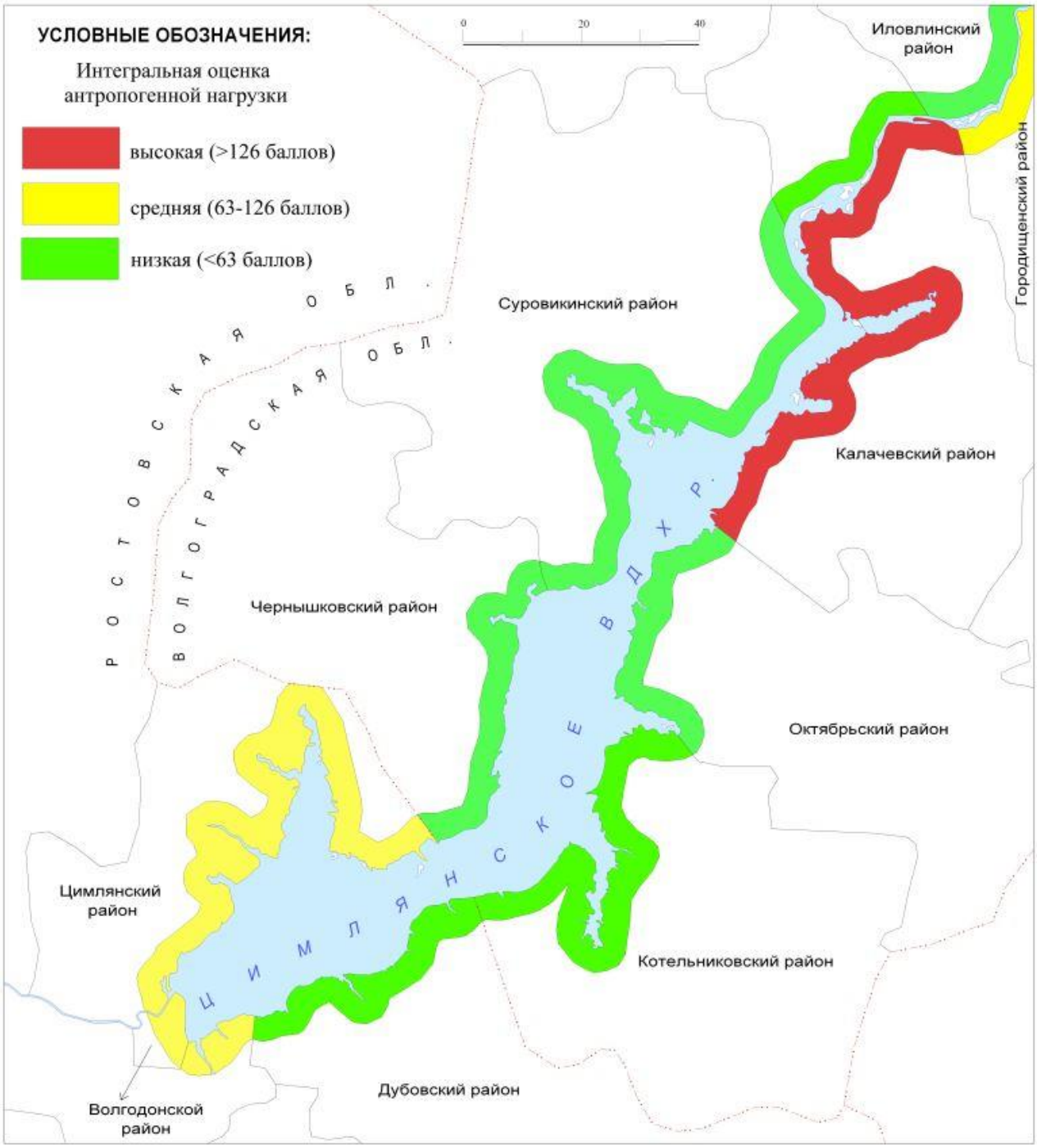


Рис. 4. Интегральная оценка антропогенной нагрузки на территорию ВЗ Цимлянского водохранилища
Fig. 4. The integral estimate of anthropogenic load on the territory of the Tsimlyansk Reservoir WPZ

ВЫВОДЫ

Использование БЛА для мониторинга изменения положения бровки береговых обрывов позволяет детально описать места фактических деформаций берега, установить границы и формы участков, разрушенных в результате проявления ЭГП, включая участки берега, не оборудованные пунктами наблюдения сети ГМВО. Наличие опорных точек наблюдения на оцениваемом участке побережья водных объектов за проявлением

экзогенных геологических процессов даёт возможность более точной количественной оценки последствий проявления их скорости и площади.

Использование БПЛА и ГИС-технологий позволяет получать информацию, существенно повышающую достоверность оценки и прогноза изменений состояния берегов водных объектов, благодаря чему возможно оценить интенсивность опасных экзогенных геологических абразионно-оползневых процессов, своевременно разработать и реализовать водоохранные мероприятия береговой зоны водных объектов. Сильная абразия берегов Цимлянского вдхр. отмечается на 7 % побережья, средняя степень отступания берега — на 19 %; бóльшая часть берегов имеет слабую степень проявления экзогенных геологических процессов — 74 % побережья.

Уровень воды в Цимлянском вдхр. является одним из основных факторов, определяющих интенсивность разрушения его берегов. Максимальные деформации берегов абразионных типов, сопровождающиеся значительными потерями земельного фонда и поступлением материала в акваторию водохранилища, зафиксированы в результате штормов, вызванных достижением самого высокого нормального подпорного уровня.

Для мониторинга эрозионных процессов в водоохранных зонах водных объектов крайне важно в настоящее время использование программно-аппаратных комплексов, создаваемых на основе БПЛА и ГИС-технологий.

С их применением появляется возможность без проведения трудоёмких наземных полевых обследований:

- проводить измерения на ортофотопланах площадей оврагов и оценивать площадь эрозионных форм на участках водоохранной зоны (например, на исследуемых участках в Калачевском р-не площадь поражения оврагами составила 52 %, в Цимлянском — 49 %);
- определять важнейшие морфологические и морфометрические показатели состояния эрозионных форм рельефа (профиль тальвега, измерение длины тальвега, уклона тальвега и др.);
- осуществлять построение поперечных профилей оврага, определение глубин и ширины их днища, высоты, крутизны и задернованности склонов.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что к районам с высоким показателем интегральной антропогенной нагрузки относится Калачевский р-он, со средним — Цимлянский и Городищенский р-оны и г. Волгодонск. В ВЗ остальных районов зафиксирована относительно низкая антропогенная нагрузка.

Проведённые исследования показали, что в ВЗ Цимлянского вдхр. водное законодательство и регламент хозяйственной деятельности существенно нарушается из-за высокой демографической нагрузки и загруженности антропогенными объектами. В особенности это касается ВЗ Калачевского, Цимлянского, Городищенского р-нов и г. Волгодонска. Необходимо проведение регулярного системного мониторинга за объектами и видами хозяйственной деятельности, а для улучшения ситуации в исследуемых территориях должен быть усилен комплекс мер по снижению антропогенной нагрузки в водоохранной зоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вендров С.Л., Клюева В.А.* Деформация берегов и дна Цимлянского водохранилища за 20 лет. Геоморфология, 1972. № 4. С. 24–28.

2. *Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т.* Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. СПб.: Наука, 2004. 294 с.

3. *Золотарёв Г.С., Роот П.Э., Рагозин А.Л., Лехов М.В., Бурлина Т.Е. и др.* Проблемы инженерной геологии ГАЭС и водохранилищ с нестационарным уровенным режимом (на

примере исследований на Среднем Днестре). М.: Издательство Московского университета, 1983. 265 с.
4. *Иконников Л.Б.* Формирование берегов водохранилища. М.: Наука, 1972. 95 с.
5. *Качугин Е.Г.* Геологическое изучение динамики берегов водохранилищ. М.: Наука, 1975. 120 с.
6. *Коробов В.Б.* Экспертные методы в географии и геоэкологии. Архангельск: Поморский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2008. 236 с.
7. *Лопухин С.А.* Заносимость входов в бухты-убежища Цимлянского водохранилища. Сборник работ Цимлянской ГМО. Ростов-на-Дону, 1966. Вып. 3. С. 29−37.
8. *Kosolapov A.E., Skripka G.I., Ivlieva O.V., Bespalova L.A., Kalimanov T. A.* Monitoring of dangerous exogenous geological processes in the water protection zone of Tsimlyansk Reservoir. International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” (ISEES 2018). Advances in Engineering Research. BV Amsterdam, the Netherlands: Atlantis Press, 2018. V. 177. P. 32–37. DOI: 10.2991/isees-18.2018.7.

REFERENCES

1. *Dmitriev V.V., Frumin G.T.* Ecological rate setting and the stability of natural systems. St. Petersburg: Nauka, 2004. 294 p. (in Russian).
2. *Ikonnikov L.B.* Formation of the coasts of reservoir. Moscow: Nauka, 1972. 95 p. (in Russian).
3. *Kachugin E.G.* Geological study of the dynamics of the coasts of reservoirs. Moscow: Nauka, 1975. 120 p. (in Russian).
4. *Korobov V.B.* Expert methods in the geography and the geo-ecology. Arkhangelsk: Pomor State University named after M.V. Lomonosov, 2008. 236 p. (in Russian).
5. *Kosolapov A.E., Skripka G.I., Ivlieva O.V., Bespalova L.A., Kalimanov T.A.* Monitoring of dangerous exogenous geological processes in the water protection zone of Tsimlyansk Reservoir. International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” (ISEES 2018). Advances in Engineering Research. BV Amsterdam, the Netherlands: Atlantis Press, 2018. V. 177. P. 32–37. DOI: 10.2991/isees-18.2018.7.
6. *Lopukhin S.A.* Sediment accumulation of the entrances into the bunch-refuges of Tsimlyansk Reservoir. Proceedings of the works of Tsimlyansk HMO (Hydrometeorological observatory). Rostov-on-Don, 1966. Iss. 3. P. 29−37 (in Russian).
7. *Vendrov S.L., Klyueva M.A.* Deformation of coasts and bottom of Tsimlyansk Reservoir after 20 years. Geomorphologiya, 1972. No 4. P. 24–28 (in Russian).
8. *Zolotarev G.S., Root P.E., Ragozin A.L., Lekhov M.V., Burlina T.E. et al.* Problems of engineering geology of HEPSPS (hydroelectric pumped storage power stations) and reservoirs with non-stationary level mode (on the example of the researches on the Middle Dniester). Moscow: Moscow University Press, 1983. 265 p. (in Russian).

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ

REMOTE METHODS IN EARTH RESEARCH

УДК: 551.4 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-264-274**

Е.В. Воскресенская[1], И.С. Воскресенский[2], С.А. Сократов[3], А.А. Сучилин[4], А.Л. Шныпарков[5], Л.А. Ушакова[6]

ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЗАПАДНОМ КАВКАЗЕ И МЕТОДЫ ИХ МОНИТОРИНГА

АННОТАЦИЯ

Оползневые склоны широко распространены в горах Западного Кавказа. На склонах хр. Аибга и в долине р. Мзымта оползни определяют эколого-геоморфологические условия при строительстве и эксплуатации, прежде всего линейных сооружений (автомобильных и железных дорог). В работе рассматривается характеристика современных склонов, на которых протекают процессы оползания. По результатам исследований проводится эколого-геоморфологическое районирование (выделение эколого-геоморфологических участков). Основанием для выделения эколого-геоморфологических участков служат данные о расположении древних оползневых тел и современных проявлениях оползания различного типа, а также морфометрические показатели — относительное превышение между сопряжёнными формами рельефа и крутизна склона. Исследуются возможности применения современных методов для мониторинга и предупреждения процесса оползания. Рассматривается методика мониторинга для высокоточной фиксации «подвижек» на склонах, подверженных оползанию. Она включает несколько этапов последовательного применения современных аппаратных средств (наземного и воздушно-космического зондирования):

[1] Агентство ООО «ГЭФ», ул. Никулинская, д. 15, 119602, Москва, Россия; *e-mail:* **lvoskresenskaya@mail.ru**
[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail:* **isvoskresensky@rambler.ru**
[3] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail:* **sokratov@geogr.msu.ru**
[4] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail:* **asuhov308@gmail.com**
[5] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail:* **malyn2006@yandex.ru**
[6] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail:* **la.ushakova@mail.ru**

- предварительное выделение участков вдоль линейного объекта, представляющих потенциальную оползневую опасность;
- наземное зондирование, при котором на местности на объект мониторинга на опорных знаках планово-высотного обоснования размещаются различные приборы геодезического класса (лазерный тахеометр-автомат, лазерный сканер, цифровая стереофотограмметрическая камера и др.);
- анализ материалов космической съёмки с различных космических аппаратов (Landsat, Pléiades, ALOS, Sentinel и др.) и трансформирование их в принятую систему координат участка исследований;
- использование беспилотных летательных аппаратов (БЛА) для локального крупномасштабного зондирования, позволяющего получить крупномасштабный ортофотоплан и высотную модель поверхности исследуемого участка.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оползни, данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), беспилотные летательные аппараты (БПЛА), лазерное сканирование

Elena V. Voskresenskaya[1], Ivan S. Voskresensky[2], Sergey A. Sokratov[3], Alexander A. Suchilin[4], Alexander L. Shnyparkov[5], Ludmila A. Ushakova[6]

GEOMORPHOLOGICAL CONDITIONS OF FORMATION OF LANDSLIDES HAZARDS IN THE WESTERN CAUCASUS AND METHODS OF THEIR MONITORING

ABSTRACT

Toppling, falling and sliding of slopes are widespread in the mountains of the Western Caucasus. The slope hazards on Aibga Ridge and in the Mzymta river basin determine the ecological and geomorphological conditions for construction and operation of first of all, the linear infrastructures (roads and railways). Investigation considered the characteristic of the recent gravity-induced processes and corresponding slopes, including topples, falls, slides and spreads. According to the research results, ecological-geomorphological zoning (allocation of ecological-geomorphological sub-zones) was carried out. The base for the sub-zones regionalization were the morphometric characteristics: the relative excess (m) between the conjugate landforms and slope angle. The possibilities of applying modern techniques for monitoring and preventing of dangerous slope processes were investigated. The monitoring technique for high-precision fixation of “movements” of dangerous slopes was considered, which included several stages of applying modern hardware tools (ground-based and aerospace remote sensing):

[1] Agency Global Education Facilitators (GEF), Nikulinskaya str., 15, 119602, Moscow, Russia; *e-mail*: **lvoskresenskaya@mail.ru**

[2] Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail:* **isvoskresensky@rambler.ru**

[3] Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail:* **sokratov@geogr.msu.ru**

[4] Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail:* **asuhov308@gmail.com**

[5] Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail:* **malyn2006@yandex.ru**

[6] Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail:* **la.ushakova@mail.ru**

- preliminary allocation of sections along a linear object that represent a potential hazard;
- ground-based sensing, in which various geodetic instruments (laser robotic total station, laser scanner, digital stereo-camera, etc.) are positioned on a reference marks of geodetic control network to monitor object of interest;
- analysis of satellite imagery data from various satellites (Landsat, Pléiades, ALOS, Sentinel) and transforming them into the adopted coordinate system of the research site;
- use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for local large-scale remote sensing, which allows to obtain large-scale ortho-photo-maps and digital elevation model of the surface of an investigated area.

KEYWORDS: landslides, remote sensing data, global navigation satellite systems (GNSS), unmanned aerial vehicles (UAVs), laser scanning

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изменение горного рельефа Западного Кавказа происходит в значительной степени в результате действия процессов обваливания, осыпания и оползания [*Кружалин*, 2001; *Хмелёва и др.,* 2000]. На склонах с углами наклона, близкими к 15–25°, оползни перемещают значительные массы горных пород [*Воскресенский*, 1971; *Капчеля, Осиюк*, 1989; *Осипов и др.*, 1999].

Привлёкший значительное внимание Бурейский обвал/оползень северной части горного массива объёмом около 24 млн м^3 напротив правого притока р. Ср. Сандар, перегородивший Бурейское водохранилище, не только ещё раз указал на необходимость мониторинга потенциально-опасных склонов, в т.ч. и не угрожающих напрямую инфраструктуре и населению, но и выявил наличие технических возможностей для этого. К примеру, проведённый анализ материалов дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) на участок этого «схода» за предшествующий десятилетний период [*Бондур и др*., 2019], как утверждают авторы, позволил получить динамику разноинтервального смещения оползневого блока в сторону русла, с возрастанием смещения от 1,6 до 10,7 см/мес., что, по всей видимости, и привело к катастрофе 11 декабря 2018 г.

Постановка проблемы. Оползание относится к быстродействующим и труднопрогнозируемым экзогенным геологическим процессам. Нередко оползни приобретают характер природной катастрофы [*Трофимов* и др., 2008; Эколого-геологические условия России, 2016]. Оползни даже небольших объёмов представляют угрозу для эксплуатации и целостности транспортных сооружений, входящих в комплекс Олимпийских объектов (железная и автомобильные дороги), построенных в долине р. Мзымта и на склонах хр. Аибга. Оценка изменений, происходящих на оползневых склонах, имеет значение для мониторинга рельефа горной территории и основанием для прогноза развития современных склоновых процессов [*Кузьмин*, 2009]. Оползни протекают при определённых естественных геоморфологических условиях. Вместе с тем активизация древних стабилизированных оползней или проявление процесса оползания вновь отмечается на горных территориях в связи с техногенными изменениям [*Щукин*, 1964; *Хмелёва и др*., 2000; *Воскресенский, Сучилин*, 2016]. В последнее время в горах Центральной Азии (Тибет и Каракорум) выявлены и исследованы крупные (объёмом в десятки млн м^3) оползни-обвалы [*Han*, 2003; *Petley*, 2011], в результате которых созданы условия для проявления селей. Ранее А.М. Капчелей и В.А. Осиюком [1989, с. 187–189] для участка Молдавских Кодр были выявлены комплексы (парагенезы) проявления современных процессов оползания, «крипа» и эрозии в зависимости от естественных геоморфологических условий. На территориях антропогенного воздействия мониторинг экзогенных рельефообразующих процессов

организуется с учётом изменений относительных превышений и углов наклона поверхности [*Ковальчук*, 1997, с. 61] позволяет уточнить систему наблюдений за современными экзогенными рельефообразующими процессами.

Цель исследования — разработка приёмов дистанционного наблюдения (мониторинга) за оползневыми процессами для прогноза их развития.

Задачи:

- определение пространственного распространения проявлений современных склоновых («крип, оползание») и эрозионных процессов относительно древних стабилизированных оползневых, обвально-осыпных и ледниковых форм рельефа;
- эколого-геоморфологическое районирование по рельефообразующей роли современных оползневых и эрозионных процессов с учётом антропогенного воздействия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проявления экзогенных гравитационных рельефообразующих процессов: обваливание, осыпание, оползание, «крип» на склонах хр. Аибга и в долине р. Мзымта были ранее выявлены при геологических исследованиях территории. Они отражены на геологических, структурно-тектонических и инженерно-геологических картах и схемах м-ба 1: 25 000 – 1: 100 000, использованных в исследовании. В работе использовались также топографические карты м-ба 1: 25 000 и материалы ДЗЗ. Материалы были предоставлены «Экоцентром» Автономной некоммерческой организации Межрегиональной Топливно-Энергетической ассоциации (АНО МТЭА г. Москва).

Анализ проявления пространственной изменчивости эколого-геоморфологических условий современных склоновых процессов производился на основании эколого-геоморфологического районирования с выделением эколого-геоморфологических районов с учётом изменений при строительстве совмещённой авто- и железной дороги. Основанием для их обособления служат морфометрические показатели — относительные превышения (м) между сопряжёнными формами рельефа и крутизна склона. Морфография склона характеризуется формой продольного профиля — выпуклой, вогнутой или прямой [*Воскресенский, Сучилин*, 2016]. Эколого-геоморфологическое районирование производилось по результатам сопряжённого анализа топографических карт и материалов дистанционного зондирования Земли (космических снимков) м-ба 1: 25 000 – 1: 100 000.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В пределах склона хр. Аибга и долины р. Мзымта сочетаются генетически разнородные формы рельефа — ледниковые, флювиальные и склоновые — с различными морфологическими характеристиками.

Днище долины р. Мзымта — пойма и низкие (до 20 м отн. высоты) аллювиальные террасы располагаются на абс. высотах около 500 м. «Придолинный ярус» [*Щукин*, 1964] рельефа образован крутыми (до 30°) склонами с прямым или выпуклым поперечным профилем. Они поднимаются над поймой и террасами долины р. Мзымта. Поверхность склонов волнистая, осложнённая небольшими по площади (до первых десятков м) буграми и террасовидными площадками. Нередко они ограничены трещинами глубиной до 0,5 м и редко более. Морфология склона свидетельствует о протекающих на склонах современных процессах «крипа» — массового смещения склонового чехла отложений. Морфология поверхности позволяет говорить как о наличии временно стабилизированных оползневых тел, так и активных крупных (до 0,5–1 км) оползнях блокового и блоково-пластичного течения (по определению ОАО «Росстройизыскания и «Кавказгидрогеология»), в т.ч. оползания небольших блоков на склонах долины р. Мзымта.

На склоне хр. Аибга сформированы «наклонные (до 15–20°) террасовидные поверхности», вытянутые вдоль долины р. Мзымта на 2–4 км. Их ширина достигает 1–5 км по падению склона. Как правило, они приурочены к междуречьям левых притоков р. Мзымта. «Наклонные террасовидные поверхности» образуют два яруса: «нижний» на абс. высотах 600–900 м (100–400 м отн. высоты) и «верхний» — 1000–1600 м (500–1100 м отн. высоты). Предполагается, что «наклонные террасовидные поверхности» образованы древними стабилизированными оползневыми телами. Однако к настоящему времени они в значительной степени преобразованы эрозией. Крутосклонные ущелья долин притоков р. Мзымта углублены в них на 100–200 м и более.

Крутые (30° и более) склоны, покрытые щебнистыми покровами обвалов и осыпей, образуют ярус ледниковых форм рельефа. Они приурочены к наиболее высокой части хр. Аибга, достигающей абс. высот 2200–2500 м. Современный рельеф склонов хр. Аибга и долины р. Мзымта формируется в результате осыпания, обваливания оползания и массового смещения склонового чехла — «крипа». Ранее проведённые инженерно-геологические исследования в бассейне р. Мзымта показали, что обвальные, осыпные и оползневые процессы составляют до 40 % всех выявленных проявлений опасных геологических процессов.

Осыпные и обвальные склоны активно преобразуются в вершинном ярусе хр. Аибга при обваливании и осыпании скальных и рыхлых горных пород, объём которых достигает десятков тыс. м^3, вне зависимости от их петрографического состава. В частности, обваливание и осыпание пород в результате боковой эрозии приводит к переформированию склонов поймы и террас долины р. Мзымта.

Оползание по механизму смещения оползневых масс (заключение ОАО «Росстройизыскания» и «Кавказгидрогеология» по материалам АНО МТЭА «Экоцентр») проявляется в виде:

- «сдвига» крупных блоков коренных пород мощностью до 100 м объёмом до десятков тыс. м^3;
- «пластического течения» грунтовых потоков пород мощностью до 5 м и длиной в десятки–сотни метров;
- «сложных», т.е. комбинированных по механизму смещения.

Механизмы оползневого смещения аналогичны оползням, выделенным А.М. Капчелей и В.А. Осиюком для Кодр Молдавии [1989, с. 99–121]. Оползневые тела подразделяются на «временно стабилизированные» и «активные». Для первых характерны признаки смещения, в частности, выраженные в образовании на поверхности «открытых трещин» и «ступеней»; для вторых — бугристо-волнистая поверхность; для «сложных» — комбинирование этих признаков. По размерам оползневых масс выделяются оползни «крупные» и «небольшие». Для первых длина и ширина «оползневой массы» превышает 100 м, а для вторых составляет, как правило, менее 100 м.

Рассматриваемая территория склона хр. Аибга и долины р. Мзымта принадлежит Пшеха-Лабинскому геоморфологическому району [*Ананьев и др.*, 1980]. Морфологические и генетические характеристики рельефа позволяют выделить в его пределах два эколого-геоморфологических подрайона: северный и южный. Они различаются по геоморфологическим условиям протекания современных склоновых процессов. В Северном эколого-геоморфологическом подрайоне обвальные и осыпные процессы моделируют рельеф ледниковых цирков вершин хр. Аибга, на которых отсутствует лесная растительность. Современные оползневые процессы и «крип» преобразуют древние оползневые тела, а также ледниковый рельеф в средней части склона хребта с лесной растительностью. Южный эколого-геоморфологический подрайон занимает «эрозионную зону» гор [*Щукин*, 1964], которая на исследованной территории приурочена к нижней части макросклона хребта и фрагменту долины р. Мзымта. На

склонах долин р. Мзымта и её притоков протекает процесс оползания различного «механизма смещения», что привело к образованию крупных оползневых блоков сейсмотектонического происхождения. Эколого-геоморфологические подрайоны подразделены на «эколого-геоморфологические участки», которые отличаются друг от друга комплексами (парагенезами) современных гравитационных склоновых процессов и геоботаническими условиями («безлесные» и с «древесным покровом») их протекания *[Воскресенский, Сучилин*, 2016].

Рельеф территории исследований претерпел трансформацию в результате строительства объектов инфраструктуры (транспортная сеть, спортивные объекты и т.п.) Игр Зимней Олимпиады 2014 г. Изменения, произведённые в рельефе при строительстве, вызвали изменения геоморфологических условий протекания обвалов, осыпания, оползания и «крипа» на склоне хр. Аибга. Наиболее существенными они оказались в долине р. Мзымта при строительстве насыпей, выемок, мостов и тоннелей совмещённой автомобильной и железной дорог. Формирование крутых техногенных склонов произошло в результате «подрезки» левого борта долины р. Мзымта. Изменение рельефа связано также со строительством порталов тоннелей. Так, в пределах эколого-геоморфологических участков 2, 2а, 3 (рис. 1) были созданы техногенные «формы рельефа»: склоны насыпей, выемок и порталов тоннелей. В долине р. Мзымта произошла активизация оползневых процессов «пластического» механизма смещения, осыпания и оползания. Особый интерес представляют изменения морфологии оползневых склонов «блокового типа» смещения. Это вызвано тем, что тоннели «совмещённой дороги» проходят сквозь «активные» или «временно стабилизированные» оползневые тела, в т.ч. имеющие сейсмо-гравитационное происхождение. Важно учитывать, что олимпийские объекты располагаются в зоне сейсмичности 8 бал. с вероятностью землетрясений 10 %, с превышением расчётной интенсивности 1 раз в 50 лет по шкале MSK-64 карты ОСР-97-А, тогда как одной из причин активизации оползания в горах Западного Кавказа являются землетрясения [*Хмелёва, Виноградова,* 2000]. Строительство спортивных сооружений и автомобильных дорог к олимпийским объектам в северо-восточной части территории исследования (9-ый эколого-геоморфологический участок, рис. 1) сопровождалось образованием склонов дорожных выемок и насыпей в пределах стабилизированных оползневых склонов. Изменения морфологии склонов может привести к активизации оползания и др. гравитационных процессов, что делает актуальным проведение мониторинга рельефа, прежде всего в долине р. Мзымта на территории строительства дорог и объектов.

На территории транспортных и спортивных сооружений был предусмотрен экологический мониторинг [*Белый*, 2004], включающий наблюдения за проявлениями опасных экзогенных геологических процессов литотехнических систем [*Королёв*, 2007]. Периодичность и виды наблюдений (маршрутные полевые обследования и инструментальные наблюдения [там же] были намечены на этапе строительства дорог и объектов с учётом стационарных исследований условий протекания гравитационных склоновых процессов [*Хмелёва, Виноградова*, 2000] на сопредельной территории Западного Кавказа в бассейне р. Бзыбь. Современное состояние естественных склонов хр. Аибга и долины р. Мзымта требует, с нашей точки зрения, организации дополнительных наблюдений за изменениями морфологии естественных и антропогенных склонов, на которых активизировались обвальные, осыпные, оползневые процессы и «крип». Также мониторинг гравитационных процессов целесообразно организовать на территориях, где вновь сформировались геоморфологические условия для проявления опасных гравитационных склоновых процессов. При проведении мониторинга целесообразно предусмотреть использование современных методов дистанционного зондирования с применением беспилотных аппаратов (БПЛА) и организацию локальных

геодезических сетей [*Воскресенский и др.*, 2018], что позволит оперативно получать информацию об изменениях морфологии оползневых склонов для принятия необходимых решений. Фиксация даже незначительных изменений в морфологии склонов позволяет выработать меры инженерной защиты или своевременно сделать предупреждающие сообщения о возникновении опасной ситуации.

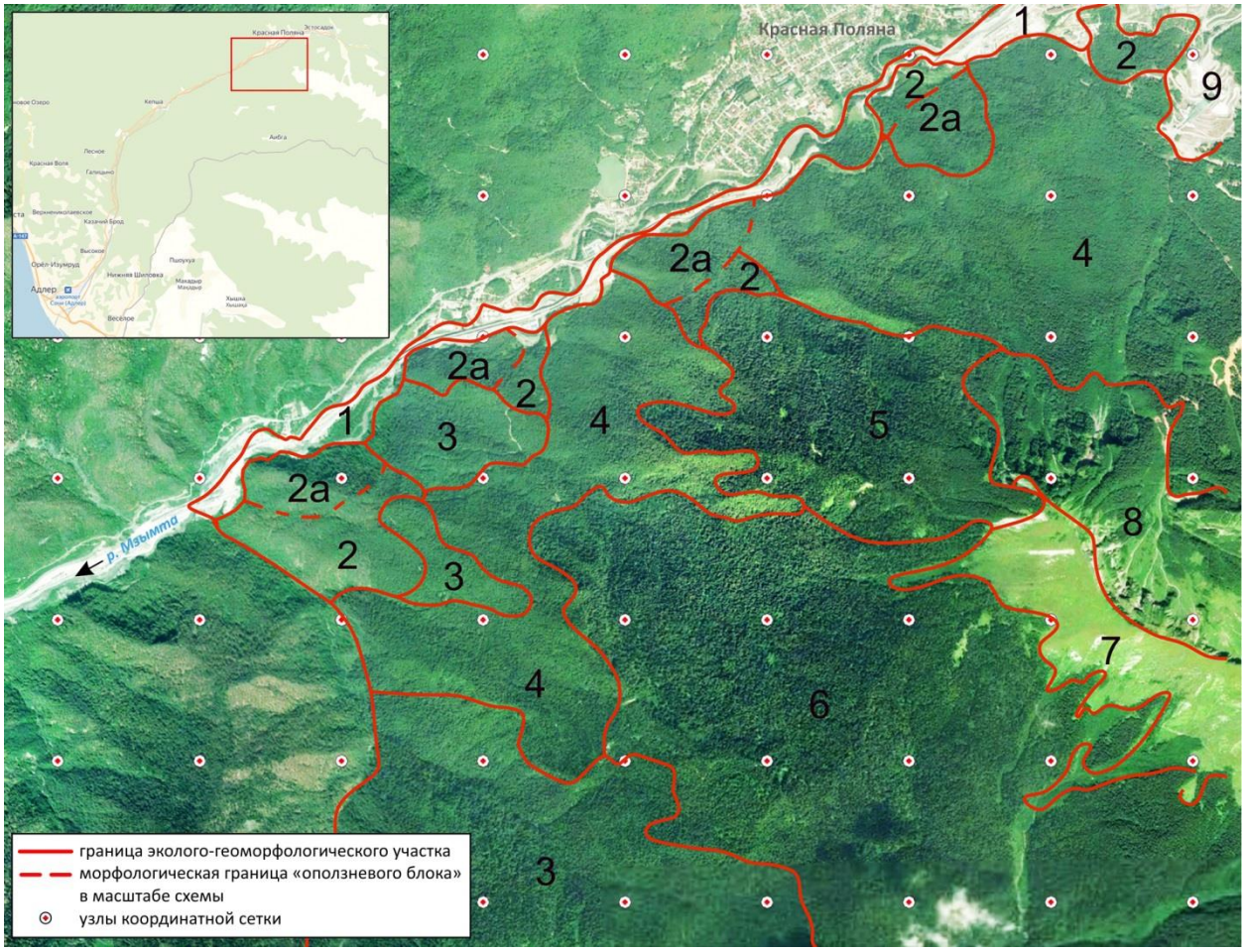


Рис 1. Схема эколого-геоморфологического районирования фрагмента хр. Аибга и долины р. Мзымта по рельефообразующей роли комплексов (парагенезов) современных склоновых и эрозионных процессов (пояснения в тексте)
***Эколого-геоморфологические участки Южного эколого-геоморфологического района**: 1 — склоны естественные поймы и террас и склоны техногенных насыпей и выемок совмещённой автомобильной и железной дорог Зимней Олимпиады 2014 г. в долине р. Мзымта (вне масштаба схемы); 2 — склоны проявления современного оползания различного типа смещения (вне масштаба схемы); 2а — склоны проявления современного оползания в пределах стабилизированных блоковых оползней (в масштабе схемы); 9 — склоны насыпей и выемок автодорог и инженерных сооружений; **Эколого-геоморфологические участки Северного эколого-геоморфологического района**: 3 — склоны массового смещения чехла («крип») с проявлениями эрозии; 4 — склоны «крипа» и единичных (вне масштаба схемы) проявлений оползания и эрозии; 5 — склоны «крипа» в пределах стабилизированных обвалов и осыпей (выше нижней границы древнего оледенения под покровом леса); 6 — склоны «крипа» и единичных (вне масштаба схемы) проявлений оползания и эрозии; 7 — склоны обвалов, осыпей и единичных (вне масштаба схемы) проявлений эрозии выше границы леса;8 — склоны обвально-осыпные ледниковых цирков выше границы леса*

Fig. 1. Scheme of ecological-geomorphological zoning of gravity-induced processes and corresponding slopes of a part of the Aibga Ridge and the Mzymta river basin (explanations in text) ***Ecological-geomorphological areas of the South ecological-geomorphological sub-zone:*** *1 — slopes of natural floodplain and terraces and slopes of technogenic embarkments and ditches of the joint auto and rail roads of the 2014 Winter Olympiad in the Mzymta river basin (unscaled); 2 — slopes of slides of different types (unscaled); 2 — slopes of slides as blocks, active and stabilized (in scale); 9 — slopes of embarkments and ditches of the auto roads and engineering infrastructure;* ***Ecological-geomorphological areas of the North ecological-geomorphological sub-zone:*** *3 — slopes of massive spreads and small brooks erosion; 4 — slopes of spreads and solitary (unscaled) cases of sliding and erosion; 5 — slopes of spreads and stabilized falls above the bottom border of paleo glaciation below forest line; 6 — slopes of spreads, topples, falls and solitary (unscaled) cases of sliding and; 7 — slopes of topples, falls, and solitary (unscaled) cases of erosion above forest line; 8 — slopes of topple-fall glaciers circuses with active topples and falls above forest line*

В процессе исследования разрабатывались содержание и методика эколого-геоморфологического районирования, на основании которого организуется мониторинг морфологии гравитационных склонов, подверженных современным гравитационным процессам. Под «мониторингом» понимается комплекс операций по регистрации явлений в ходе инструментальных наблюдений, сбору, передаче, накоплению и анализу информации о качественных и количественных характеристиках объекта исследований. Данные мониторинга позволяют оценить зафиксированные явления, в частности с точки зрения их «опасности», и сформировать прогноз их эволюции для формирования рекомендаций для принятия управляющих решений [*Агишев*, 2018].

«Дистанционный» мониторинг рельефа оползневых склонов базируется на применении современных аппаратных средств наземного или воздушно-космического зондирования. Их применение позволяет фиксировать изменения морфологии оползневых склонов с высокой точностью и детальностью [*Воскресенский и др.*, 2018]. Мониторинг включает следующие этапы. Предварительно, на основании натурных или аналитических исследований в среде геоинформационных систем (ГИС), выделяются участки вдоль линейного объекта, представляющие потенциальную опасность. В непосредственной близости от проявления склонового гравитационного процесса, т.е. соответствующей по генезису формы рельефа, определяются знаки государственной геодезической сети (ГГС). При их отсутствии размещаются опорные знаки для формирования локальной сети планово-высотного обоснования (ПВО) и проводятся измерения их координат высокоточными приборами глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС).

Следующий этап заключается в наземном зондировании рельефа. На местности, в прямой видимости объекта мониторинга, на опорных знаках ПВО размещаются приборы геодезического класса с различной методикой измерений (например, лазерный тахеометр-автомат, лазерный сканер, цифровая стереофотограмметрическая камера). На площади формы рельефа или ареала склоновых процессов осыпания, обваливания и т.п. явлений, размещаются автономные приёмники ГНСС, которые транслируют по каналам связи текущие координаты на данный момент времени.

При воздушно-космическом зондировании используются материалы съёмки с различных космических аппаратов (Landsat, Pléiades, ALOS, Sentinel и др.), которые трансформируются в принятую систему координат участка исследований, после чего проводится их анализ и фиксируются пространственные и прочие изменения на весьма большой по охвату площади. Для локального крупномасштабного зондирования могут быть использованы беспилотные летательные аппараты (БПЛА), позволяющие получать

после фотограмметрической постобработки крупномасштабный ортофотоплан и высотную модель поверхности исследуемого участка.

Данные измерений поступают в центр мониторинга, где проводится их анализ и принимаются необходимые решения предупреждающего характера.

ВЫВОДЫ

Выявлены два комплекса (парагенеза) склоновых рельефообразующих процессов:

- обваливание и осыпание на крутых склонах ледниковых цирков в «нивальной зоне» хр. Аибга;
- оползание блокового, блоково-пластичного, пластичного типа и «крип» в «эрозионной зоне» горного рельефа территории.

Территория Северного эколого-геоморфологического подрайона занимает «нивальную зону» ледниковых цирков, в которой господствуют обвалы и осыпи, а Южного — «эрозионную зону», где формируются оползни разного типа и размеров.

Трассы железной и автомобильной дорог и спортивные олимпийские объекты располагаются в Южном эколого-геоморфологическом районе, который характеризуется изменениями морфологии гравитационных склонов в результате строительства. Мониторинг морфологии склонов с целью выявления оползневых и др. гравитационных процессов с применением дистанционных методов наблюдения целесообразно сосредоточить на естественных и антропогенных склонах в долине р. Мзымта.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны НПФ «Экоцентр МТЭА» (г. Москва) и лично Л.В. Бычковской за предоставленные материалы и возможность проведения исследований. Исследование проводилось при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Совершенствование управления рисками оползневых и селевых потоков в горных районах» (BRICS2019-104, УИ RFMEFI61319X0097).

ACKNOWLEDGEMENTS

Authors are grateful to Environmental Center IFPA (Moscow) and personally L.V. Bychkovskaya for the materials provided and the opportunity to conduct research. The study was supported by a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation “Improving Risk Management of Landslide and Mudflows in Mountain Areas” (BRICS2019-104, UI RFMEFI61319X0097).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агишев Р.Р.* Лазерное зондирование окружающей среды: методы и средства. М.: Физматлит, 2018. 259 с.
2. *Ананьев Г.С., Андреева Т.С., Варущенко С.И., Воскресенский С.С., Леонтьев О.К., Лукьянова С.А., Спасская И.И., Спиридонов А.И., Ульянова Н.С.* Геоморфологическое районирование СССР и прилегающих морей. М.: Высшая школа, 1980. 343 с.
3. *Белый А.В.* Экологический мониторинг. Вологда: ВоГТУ, 2004. 196 с.
4. *Бондур В.Г., Захарова Л.Н., Захаров А.И., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н.* Мониторинг оползневых процессов с помощью космических интерферометрических радаров l-диапазона на примере обрушения склона берега реки Бурея. Исследование Земли из космоса, 2019. № 5. С. 3–14. DOI: 10.31857/S0205-9614201953-14.

5. *Воскресенский И.С., Сучилин А.А.* Опыт применения ГИС для регионального геоморфологического районирования при оценке воздействия на окружающую среду. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. Протвино (Московская обл.), 2016. Т. 22. Ч. 1. С. 173–183. DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-173-183.
6. *Воскресенский И.С., Сучилин А.А., Ушакова Л.А., Шафоростов В.М., Энтин А.Л.* Применение БПЛА для мониторинга оползневых и эрозионных процессов (на примере центра Русской Равнины). Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях. Иркутск: Издательство Института географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, 2018. С. 42–47.
7. *Воскресенский С.С.* Динамическая геоморфология. Формирование склонов. М.: Издательство Московского университета, 1971. 230 с.
8. *Капчеля А.М., Осиюк В.А.* Рельеф и экзогенные процессы Кодр Молдавии. Кишинёв: Штиинца, 1989. 228 с.
9. *Ковальчук І.П.* Регіональний еколого-геоморфологічний аналіз. Львів: Видавництво Інституту Українознавства, 1997. 440 с.
10. *Королёв В.А.* Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем. М.: КДУ, 2007. 415 с.
11. *Кружалин В.И.* Экологическая геоморфология суши. М.: Научный мир, 2001. 176 с.
12. *Кузьмин С.Б.* Опасные геоморфологические процессы и риск природопользования. Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2009. 195 с.
13. *Осипов В.И., Кутепов В.М., Зверев В.П., Авсюк Ю.Н., Алексеевский Н.И., Алешин А.С., Аникеев А.В., Варга А.А., Гридин В.И., Гулакян К.А., Каякин В.В., Круподеров В.С., Кюнтцель В.В., Макаров В.И., Махорин А.А., Мироненко В.А., Постоев Г.П., Родионов В.Н., Семёнов С.М., Сергеев А.И., Тимофеев Д.А., Чалов Р.С., Шеко А.И.* Опасные экзогенные процессы. М.: ГЕОС, 1999. 290 с.
14. *Трофимов В.Т., Харькина М.А., Григорьева И.Ю.* Экологическая геодинамика. М.: КДУ, 2008. 473 с.
15. *Хмелёва Н.В., Виноградова Н.Н., Самойлова А.А., Шевченко Б.Ф.* Бассейн горной реки и экзогенные процессы в его пределах. М.: Издательство Московского университета, 2000. 186 с.
16. *Щукин И.С.* Общая геоморфология. Т. II. М.: Издательство Московского университета, 1964. 564 с.
17. Эколого-геологические условия России. Т. 1. М.: КДУ, 2016. 302 с.
18. *Han Z.S.* Large-scale landslide-debris avalanche in Tibet, China: (1) April–June 2000, Yigong Landslide, Tibet, China. Landslide News, 2003. V. 14. P. 22–23.
19. *Petley D.* Damming events at Attabad. International Water Power and Dam Construction, 2011. V. 63. No 2. P. 27–29.

REFERENCES

1. *Agishev R.R.* Laser sensing of the environment: methods and tools. Moscow: Fizmatlit, 2018. 259 p. (in Russian).
2. Ananyev G.S., Andreeva T.S., Varushchenko S.I., Voskresenskiy S.S., Leontiev O.K., Lukyanova S.A., Spasskaya I.I., Spiridonov A.I., Ulyanova N.S. Geomorphological zoning of the USSR and adjacent seas. Moscow: Higher school, 1980. 343 p. (in Russian).
3. *Beliy A.V.* Environmental monitoring. Vologda: VoSTU (Vologda State Technical University), 2004. 196 p. (in Russian).
4. *Bondur V.G., Zapharova L.N., Chimirtodzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N.* Monitoring of landslide processes by means of L-band radar interferometric observations: Bureya river bank

caving case. Issledovanie Zemli iz kosmosa, 2019. No 5. P. 3–14. DOI: 10.31857/S0205-9614201953-14 (in Russian).
5. Ecological and geological conditions of Russia. V. 1. Moscow: KDU, 2016. 302 p. (in Russian).
6. *Han Z.S.* Large-scale landslide-debris avalanche in Tibet, China: (1) April–June 2000, Yigong Landslide, Tibet, China. Landslide News, 2003. V. 14. P. 22–23.
7. *Kapchelia A.M., Osiyuk V.A.* Relief and exogenic processes of Codrii of Moldova. Chisinau: Stiince, 1989. 226 p. (in Russian).
8. *Khemeleva N.V., Vinogradova N.N., Samoylova A.A., Shevchenko B.F.* A basin of a mountain river and exogenic processes within it. Moscow: Moscow University Press, 2000. 186 p. (in Russian).
9. *Korolev V.A.* Monitoring of geological, lithotechnical and ecological-geological systems. Moscow: KDU, 2007. 415 p. (in Russian).
10. *Kovalchuk I.P.* Regional ecological and geomorphological analysis. Lviv: Publishing House of the Institute of Ukrainian Studies, 1997. 440 p. (in Ukrainian).
11. *Kruzhalin V.I.* Ecological geomorphology of land. Moscow: Scientific World, 2001. 176 p. (in Russian).
12. *Kuz'min S.B.* Hazardous geomorphological processes and risk of nature management. Novosibirsk: Academic Publishing House "Geo", 2009. 195 p. (in Russian).
13. *Osipov V.I., Kutepov V.M., Zverev V.P., Avsyuk Yu.N., Alekseevskiy N.I., Aleshin A.S., Anikeev A.V., Varga A.A., Gridin V.I., Gulakyan K.A., Kayakin V.V., Krupoderov V.S., Kyuntsel V.V., Makarov V.I., Makhorin A.A., Mironenko V.A., Postoev G.P., Rodionov V.N., Semenov S.M., Sergeev A.I., Timofeev D.A., Chalov R.S., Sheko A.I.* Hazardous exogenous processes. Moscow: GEOS, 1999. 290 p. (in Russian).
14. *Petley D.* Damming events at Attabad. International Water Power and Dam Construction, 2011. V. 63. No 2. P. 27–29.
15. *Schukin I.S.* General geomorphology. V. II. Moscow: Moscow University Press, 1964. 564 p. (in Russian).
16. *Trofimov V.T., Harkina M.A., Grigorev I.J.* Ecological geodynamics. Moscow: KDU, 2008. 473 p. (in Russian).
17. *Voskresensky I.S., Suchilin A.A.* GIS-based regional geomorphological zoning for assessment of environmental impact of major pipelines. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Protvino (Moscow region), 2016. V. 22. Part 1. P. 173–183. DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-173-183 (in Russian, abs English).
18. *Voskresensky I.S., Suchilin A.A., Ushakova L.A., Shaforostov V.M., Entin A.L.* The application of UAV for erosion and landslide processes monitoring (case study of the central part of the Russian Plane). The use of unmanned aerial vehicles in geographical research. Irkutsk: Publishing House of the V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 2018. P. 42–47 (in Russian).
19. *Voskresensky S.S.* Dynamic geomorphology. The formation of the slopes. Moscow: Moscow University Press, 1971. 564 p. (in Russian).

УДК: 551.321.61 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-275-285**

А.Д. Китов[1], И.А. Денисенко[2], О.В. Лунина[3], А.С. Гладков[4], В.М. Плюснин[5], Е.Н. Иванов[6]

ДИСТАНЦИОННОЕ И ГЕОРАДАРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕДНИКА РАДДЕ ХРЕБТА МУНКУ-САРДЫК (ВОСТОЧНЫЙ САЯН)

АННОТАЦИЯ

Описание и изучение ледников хребта Мунку-Сардык (Восточный Саян) ведутся более 100 лет. Наиболее детально изучался первый по величине ледник Перетолчина. Второй по величине ледник Радде изучен значительно слабее. Мониторинг поверхностных характеристик ледника Радде наземными методами и с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) ведётся с 2006 г. В 2018 г. впервые было выполнено георадарное профилирование этого ледника. В результате удалось не только уточнить его поверхностные характеристики, но и оценить мощность льда и внутреннюю структуру (слой фирна, лёд, ложе). По данным ДЗЗ выявлены его геометрические изменения. Почти за 120 лет открытая часть ледника Радде сократилась с 0,4 до 0,09 км^2, а длина — с 1 до 0,4 км. Также выявлено разделение ледника на две части и интенсивное бронирование низа основной части языка поверхностными моренами и образование ледникового озера на самом леднике в нижней части второй его половины. Радиолокационное исследование с помощью георадара Око-2 позволило определить объём льда этого ледника — 0,003 км^3 и наибольшую толщину основного ледяного тела — 42 м. Основной ледник стекает с вершины Эскадрилья (3168 м) на север, натекает на ригель, от него поворачивает на северо-восток и в нижней части кара снова продолжает течь на север.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Восточная Сибирь, нивально-гляциальные образования, ледник, радиолокационные исследования, дистанционные исследования

[1] Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, д. 1, 664033, Иркутск, Россия;
e-mail: **kitov@irigs.irk.ru**
[2] Институт земной коры СО РАН, ул. Лермонтова, д. 128, 664033, Иркутск, Россия;
e-mail: **denisenkoivan.1994@mail.ru**
[3] Институт земной коры СО РАН, ул. Лермонтова, д. 128, 664033, Иркутск, Россия;
e-mail: **lounina@crust.irk.ru**
[4] Институт земной коры СО РАН, ул. Лермонтова, д. 128, 664033, Иркутск, Россия;
e-mail: **gladkov@crust.irk.ru**
[5] Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, д. 1, 664033, Иркутск, Россия;
e-mail: **egoryo@bk.ru**
[6] Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, д. 1, 664033, Иркутск, Россия;
e-mail: **plyusnin@irigs.irk.ru**

Aleksandr D. Kitov[1], **Ivan A. Denisenko**[2], **Oxana V. Lunina**[3], **Andrey S. Gladkov**[4], **Viktor M. Plyusnin**[5], **Egor N. Ivanov**[6]

REMOTE SENSING AND GPR STUDY OF THE RADDE GLACIER OF THE RIDGE MUNKU-SARDYK (THE EAST SAYAN)

ABSTRACT

The Munku-Sardyk (Eastern Sayan) glacier has been described and studied for more than 100 years. The first largest glacier of Peretolchina was studied in the most detailed detail. Radde's second-largest glacier is much weaker. Monitoring of surface characteristics of the Radde glacier by ground methods and using data of remote sensing of the Earth (RSE) has been carried out since 2006. In 2018, georadar profiling of this glacier was performed for the first time. As a result, it was possible not only to clarify its surface characteristics, but also to assess the power of the ice and the internal structure (a layer of firn, ice, bed). According to the RSE, its geometric changes have been revealed. Over 120 years, the open part of the Radde Glacier has shrunk from 0.4 to 0.09 km^2, and the length from 1 to 0.4 km. It also revealed the division of the glacier into two parts and the intensive reservation of the bottom of the main part of the tongue by surface moraines and the formation of a glacial lake on the glacier itself in the lower part of the second half. Radar research using the Oko-2 georadar, allowed to determine the volume of ice of this glacier 0.003 km^3 and the greatest thickness of the main ice body 42 m. The main glacier flows down from the Eskadriliy top, 3168 m, to the north, flows on the cross-bar and from it turns to the northeast, and at the bottom of the kar will continue to flow north again.

KEYWORDS: The Eastern Siberia, glacier, icing, radar-tracking researches, remote sensing researches of the Earth

ВВЕДЕНИЕ

Современное оледенение в различных горных районах заметно реагирует на происходящее в настоящее время потепление климата [IPCC, 2007]. Различные ледники неодинаково отражают эти изменения; иногда наблюдаются периоды стационарного состояния и даже наступания некоторых ледников в разных горных системах [*Котляков и др*., 2017; *Осипов и др*., 2017][7]. Малые ледники Сибири оперативнее откликаются на колебания климата и поэтому могут служить своеобразным индикатором. В районе самой высокой вершины Восточных Саян (Мунку-Сардык, 3 491 м, координаты: 100°35'50" в.д., 51°43'05" с.ш.) наиболее длительно (в т.ч. авторами) наблюдаются два ледника: Перетолчина (наибольший) и Радде (второй по величине) [*Перетолчин*, 1908] (рис. 1). Эти

[1] V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Ulan-Batorskaya str., 1, 664033, Irkutsk, Russia;
e-mail: **kitov@irigs.irk.ru**
[2] Institute of the Earth's Crust SB RAS, Lermontov str., 128, 664033, Irkutsk, Russia;
e-mail: **denisenkoivan.1994@mail.ru**
[3] Institute of the Earth's crust SB RAS, Lermontov str., 128, 664033, Irkutsk, Russia;
e-mail: **lounina@crust.irk.ru**
[4] Institute of the Earth's crust SB RAS, Lermontov str., 128, 664033, Irkutsk, Russia;
e-mail: **gladkov@crust.irk.ru**
[5] V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Ulan-Batorskaya str., 1, 664033, Irkutsk, Russia;
e-mail: **plyusnin@irigs.irk.ru**
[6] V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Ulan-Batorskaya str., 1, 664033, Irkutsk, Russia;
e-mail: **egoryo@bk.ru**

[7] Данные вопросы рассмотрены также в работе *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

ледники в основном исследовались наземными средствами, а с середины прошлого столетия с использованием данных ДЗЗ (аэросъёмка и космосъёмка) [*Осипов и др.*, 2017]. Однако, несмотря на всю ценность таких исследований (мониторинг геометрических характеристик ледников и составляющих их частей), интерес представляет измерение толщины льда, оценка объёма льда, а также изучение внутренней структуры ледяной толщи.

Средством, позволяющим заглянуть в подповерхностные структуры Земли, является георадарное зондирование (GPR). Эти исследования важны при изучении такого явления, как более интенсивное уменьшение толщины льда при незначительных площадных изменениях размеров ледника, например, как у ледника Азаровой в Кодаре [*Коваленко,* 2011], да и у того же ледника Радде. Поэтому измерение толщины ледника в дополнение отслеживания его поверхностных размеров является определяющим при оценке общего объёма горного оледенения.

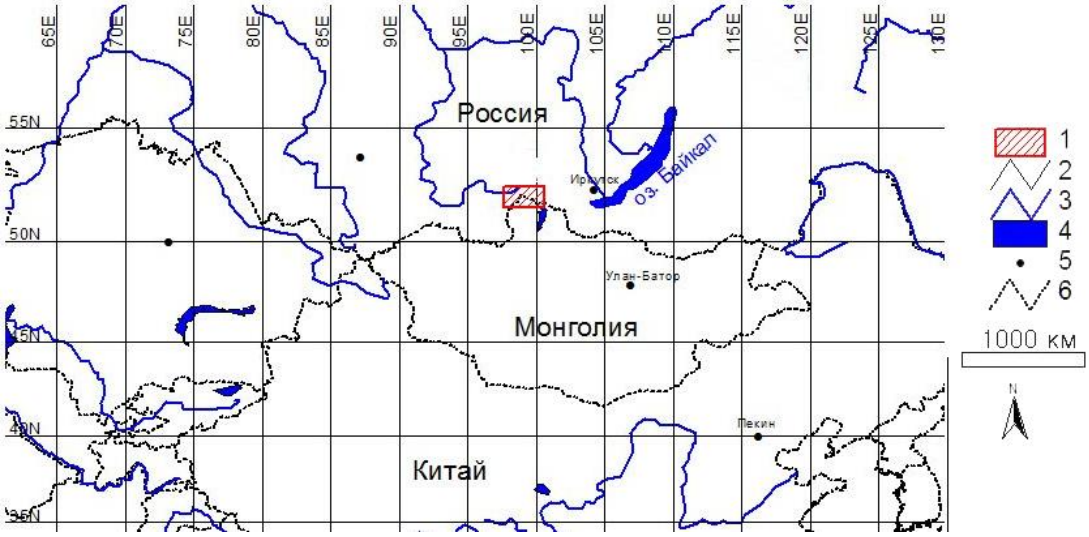


Рис. 1. Район исследования: 1 — район исследования массив Мунку-Сардык; 2 — координатная сетка; 3 — реки; 4 — озёра; 5 — города; 6 — государственные границы

Fig. 1. Area of study: 1 — Area study is the Munku-Sardyk massif; 2 — coordinate grid; 3 — rivers; 4 — lakes; 5 — cities; 6 — state borders

Кроме того, ледник может пересекать активные разломы, что наряду с другими факторами проявляется трещинами, бергшрундом на леднике, изменением направления течения льда и др. Ледник Радде при его исследовании оказался довольно сложным. В настоящее время это сдвоенный ледник — один, существенно деградировавший, упирается в основной поток льда (натекающий на ригель, или скальный уступ). В нижней части понижения перед ригелем образовалось ледниковое озеро (фактически на самом леднике). Сток этого озера определяется, вероятно, разломом. От разлома основной ледник почти под 45° делает изгиб на северо-восток и далее в нижней части продолжает течение на север. Конечный моренный комплекс основного ледника не однозначен. Этот ледник не имеет большого ледникового озера. На моренном комплексе перед полуразрушенным ригелем или крупнообломочной конечной мореной образуется сезонное озеро, а постоянное небольшое озерцо находится непосредственно за этой поперечной мореной. Анализ данных георадарного профилирования даёт материал на построение ряда гипотез и понимания строения этого и других ледников массива Мунку-Сардык.

Данная работа представляет продолжение исследований по определению мощности ледников горного массива Мунку-Сардык георадарными методами [*Китов и др.*, 2017].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения динамики и инвентаризации современного состояния ледников Мунку-Сардык использованы разномасштабные (с разным пространственным разрешением) космоснимки, полученные со спутников Quick Bird, Pleiades, Landsat 4, 5, 7, 8.

Георадарное профилирование ледника Радде впервые проведено в 2018 г. с помощью георадара Око-2 с антенным блоком АБДЛ «Тритон» (центральная частота 100 МГц) с диэлектрической проницаемостью 3,2 и дистанцией ожидания отражённой волны 120 м.

Навигационная информация собиралась с помощью портативных GPS-приёмников Garmin GPSmap-76Csx и GPSmap-64st. Запись приёмником велась в формате WGS-84 десятичных градусов.

Обработка георадиолокационных разрезов проводилась в программе «GeoScan-32» в несколько приёмов. Первоначально к радарограммам подбирались необходимые значения усиления сигналов, яркости и контрастности. Затем использовались стандартные режимы обработки.

Изменения площади ледника анализировались путём сопоставления разновременных космических снимков Ландсат с разрешением 15–30 м/пиксел 1994–2018 гг. (сцены: Ландсат 4, 13.07.1994; Ландсат 5, 25.08.1998, 06.08.2000; Ландсат 7, 09.08.2001, 12.08.2002, 11.08.2007, 17.07.2010; Ландсат 8, 08.08.2015, 25.07.2016, 29.07.2017, 17.08.2018). Границы ледника в 2006 г. уточнялись по снимку Quick Bird с разрешением 0,6 м/пиксел и в 2013 г. по Pleiades (13.07.2013) с разрешением 2,5 м. Снимки были привязаны к топографической карте масштаба 1: 100 000 и приведены в единую проекцию Пулково-1942 WGS-84, зона 17. Дешифрирование и векторизация границ ледника проводились в ручном режиме RGB-синтезированных снимков каналы 2-4-7 для Ландсат 7 и 3-5-7 для Ландсат 8. Все измерения выполнялись в программе ArcViewGIS-3.2a. Учитывая разрешение снимков 15 м/пиксель, систематическая погрешность определения площади ледника оценивается в 0,12 км^2 или 5 % от измеряемой величины.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика размеров ледника Радде по данным космосъёмки представлена в табл. 1.

Табл. 1. Динамика ледника Радде за 112 лет
Table 1. Dynamics of the Peretolchina Glacier for 112 years

Вид данных*	Год съёмки	Площадь, км^2	Длина, км
Реконструкция	1906	0,43	1,0
Каталог ледников СССР	1950	0,30	0,6
Топокарта	1960	0,38	0,8
Ландсат 5	2000	0,19	0,7
Quick Bird	2006	0,2	0,8
Ландсат 7	2010	0,18	0,7
Ландсат 8	2014	0,2	0,7
Ландсат-8	2015	0,1	0,5
Ландсат-8	2017	0,1	0,45
Ландсат-8	2018	0,09	0,43

*Графа «Вид данных» представляет использованный источник данных для определения характеристик ледника. Реконструкция границ ледника выполнена по данным ДЗЗ Quick Bird с уточнением границ по современным моренным комплексам. Данные по каталогу ледников СССР [Каталог…, 1973] формировались по аэросъёмке в 1950-х гг. В 1960-х гг. характеристики определены по топографической карте соответствующего года издания. В последующие годы площадь и длина ледника определялись в основном по данным ДЗЗ Ландсат.

Обследование ледника Радде по дистанционным данным и наземным заверкам показало, что ледник сократился значительнее по толщине, чем по площади, и активно бронируется поверхностными моренами; по сравнению с 1900 г. его вид существенно изменился, часть притоков исчезла (рис. 2).

Рис. 2. Вид ледника Радде во времена С.П. Перетолчина (слева) и в настоящее время. На снимке С.П. Перетолчина перед ледником видна конечная поперечная морена. Современный снимок сделан с этой морены.
I — основной ледник; II — деградировавшая часть ледника;
III — бывший основной приток ледника, стаявший в настоящее время
Fig. 2. A view of the Radde glacier, photo of S.P. Peretolchin (left) and the modern picture. In the picture of S.P. Peretolchin in front of the glacier is visible the final transverse moraine. The modern picture was taken from this moraine.
I — the main glacier; II — the degraded part of the glacier;
III — the former main influx of the glacier, which has already melted by now

По С.П. Перетолчину [1908] и Каталогу ледников СССР [1973], площадь ледника Радде была 0,3 км^2, а максимальная длина 0,6 км (эти же цифры соответствуют открытой части ледника). По данным топокарты 1960 г., площадь и длина соответственно 0,4 км^2 и 0,8 км. По данным ДЗЗ, в 2006 г. его площадь открытой части сократилась до 0,2 км^2, а длина практически не изменилась, в 2010 г. площадь и длина уменьшились до 0,18 км^2 и 0,7 км, хотя общая площадь ледника с поверхностными моренами осталась прежней. В настоящее время (2017 г.) площадь основной открытой части — 0,06 км^2, а с нижней бронированной — 0,11 км^2, длина соответственно — 0,5 км и общая — 0,8 км. Площадь отделившейся деградированной части — 0,048 км^2, а длина — 0,34 км. Общая площадь льда в цирке — 0,16 км^2. В 2018 г. суммарная площадь открытой части составила 0,0094 км^2, а длина 0,43 м.

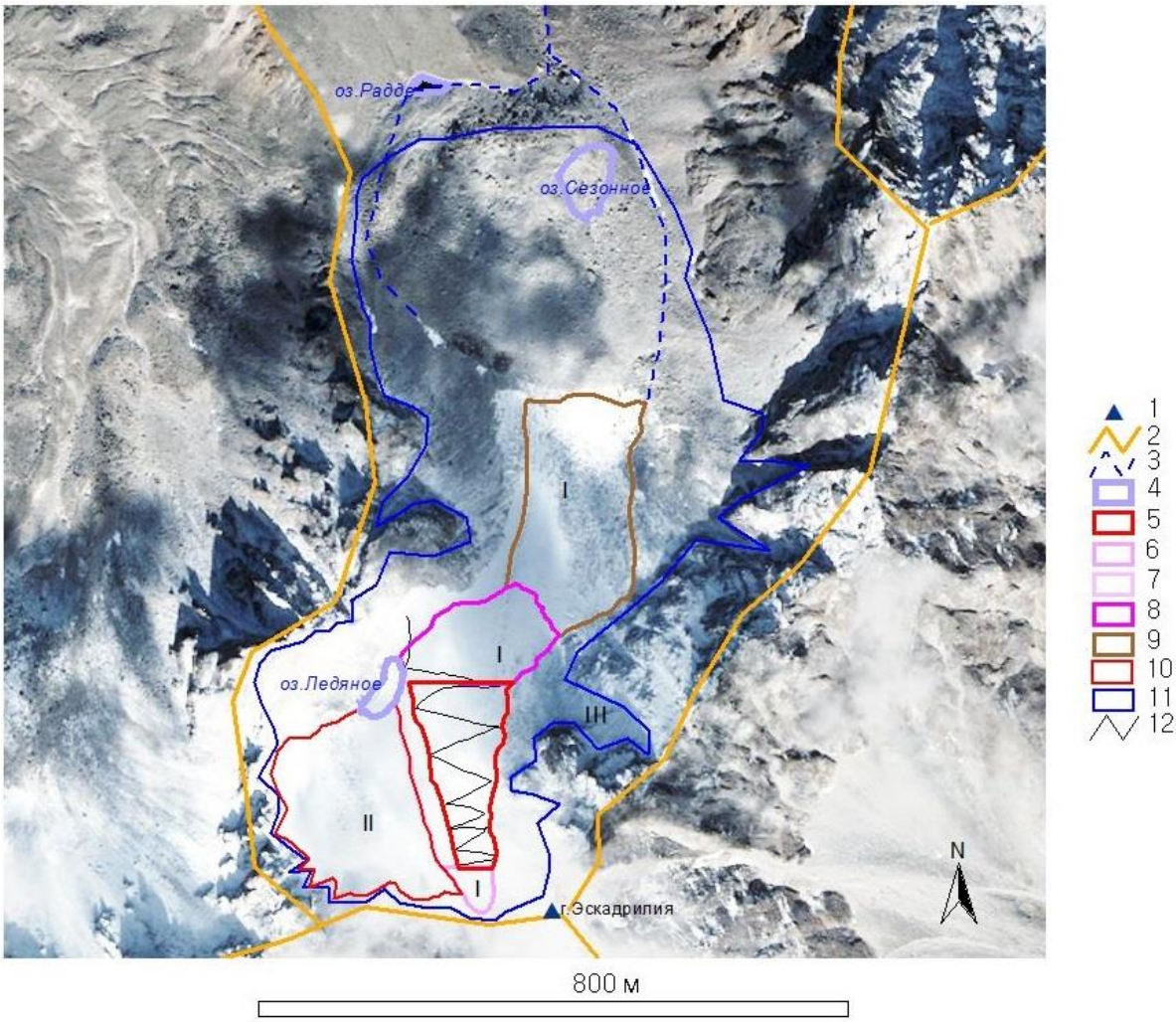


Рис. 3. Строение ледника Радде.
I — основной поток ледника; II — редуцированный ледник, упирающийся в основной поток; III — остаток от бывшего притока ледника. 1 — главные вершины; 2 — линии хребтов; 3 — сток с ледника; 4 — озёра (береговая линия); 5 — основное тело ледника, где измерялась толщина льда; 6 — верхний участок основного ледника; 7 — боковой западный участок (ледяной обрыв к леднику II); 8 — нижний участок основного ледника (открытая часть); 9 — участок основного ледника бронированный поверхностными моренами; 10 — редуцированный ледник (II); 11 — реконструкция ледника 1900 г. по фото и описанию С.П. Перетолчина; 12 — профили георадарного зондирования. Фон — снимок Quick Bird, 2006 г.
Fig. 3. The Radde Glacier building.
I — the main flow of the glacier; II — the reduced glacier that rests on the main stream; III — the remnant of the former tributary of the glacier. 1 — the main peaks; 2 — ridge lines; 3 — runoff from the glacier; 4 — lakes (coastline); 5 — the main body of the glacier, where the thickness of the ice was measured; 6 — the upper section of the main glacier; 7 — the lateral western section (ice cliff to Glacier II); 8 — the lower section of the main glacier (open part); 9 — the section of the main glacier armored by surface moraines; 10 — reduced glacier (II); 11 — reconstruction of the glacier of 1900 according to the photo and description of S.P. Peretolchin; 12 — geo-radar sensing profiles. Background — picture Quick Bird, 2006

Соответственно, объём по формуле $V = kS^p$ (при k = 0,0356, p = 1,53 [*Мачерет*, 2006]) в 1900 г. для ледника с реконструированной общей площадью S = 0,42 км^2, составлял 0,0094 км^3. В настоящее время (2017 г.) при S = 0,19 м^2 объём V = 0,00158 км^3. При этом объём западной деградированной части — 0,00039, основной — 0,00053, нижней, бронированной моренами — 0,00066 км^3.

Исследования ледника Радде выявили его особенности. Фактически там два ледника — один упирается в другой, образуя наверху в цирке понижение и подпрудное озеро. Основной ледник (I, рис. 2, 3) стекает с вершины Эскадрилья в северном направлении, а затем в средней части почти на 45° поворачивает к северо-востоку и образует крутой сброс, затем снова поворачивает на север и выполаживается к современным конечным моренам. При наблюдении с соседних хребтов и конечных морен казалось, что он пологий на верхнем участке, но на самом деле он довольно крутой, и перемещение по нему без кошек было бы невозможно. Вероятно, ледник лежит на ригеле, по которому стекает с вершины, а затем поворачивает и течёт вниз (рис. 3).

Другой ледник (II, рис. 2, 3) стекает с северного, северо-западного склона цирка и упирается нижней частью с разреженными поверхностными моренами в основной ледник (I), образуя в самой нижней части озеро с плавающими кусками фирна, сорвавшимися с основного ледника (фактически озеро на леднике). При наблюдении с основного ледника казалось, что упирающийся в него ледник объёмный в верхней части, но при подъёме на хребет выяснилось, что это почти стаявший присклоновый (пристенный) ледник.

Большой приток ледника (III, 2, 3), описанный С.П. Перетолчиным [1908] (рис. 2), ещё выделялся на комоснимке 2006 г. (рис. 3). Однако в настоящее время он полностью стаял.

По сравнению с предыдущим годом, основной ледник существенно деградировал, просел в нижней части языка и ещё больше забронировался поверхностными моренами. Кроме того, в моренном поле конечных морен образовалось значительных размеров сезонное озеро. Так что ледник Радде теперь имеет три озера — наверху на самом леднике (оз. Ледяное), внизу на современных конечных моренах (оз. Сезонное) и ледниковое небольшое озеро (оз. Радде) за конечными моренами ниже перевала 26-го Партсъезда (рис. 3).

Обработка георадарных данных проводилась следующим образом. Продольный профиль пройдён от оз. Ледяное вверх до верхней отметки 3083 м. Поперечные профили проходились по леднику сверху (от отметки 3083 м) вниз «змейкой». Из этих диагональных треков формировались поперечные параллельные профили по сетке с шагом 10 м. На каждый диагональный профиль, в зависимости от его длины, строилось от 1 до 4 дополнительных поперечных профилей. Всего получилось 26 таких профилей. В пределах исходного диагонального профиля поперечным подпрофилям присваивались значения соответствующей радарограммы диагонального профиля (диагональный профиль проецировался на соответствующий поперечный подпрофиль и по ширине ледника сжимался или растягивался). Считалось, что в пределах 10–40 м рельеф ложа существенно не меняется [*Мачерет*, 2006; *Китов и др.*, 2017]. Рельеф дневной поверхности ледника строился по данным ДЗЗ Aster. В результате были построены поверхности фирна, ледяного ложа ледника, ложа донных морен и ложа на границе с коренными породами (рис. 4) и вычислены объёмы соответствующих структурных слоёв ледника.

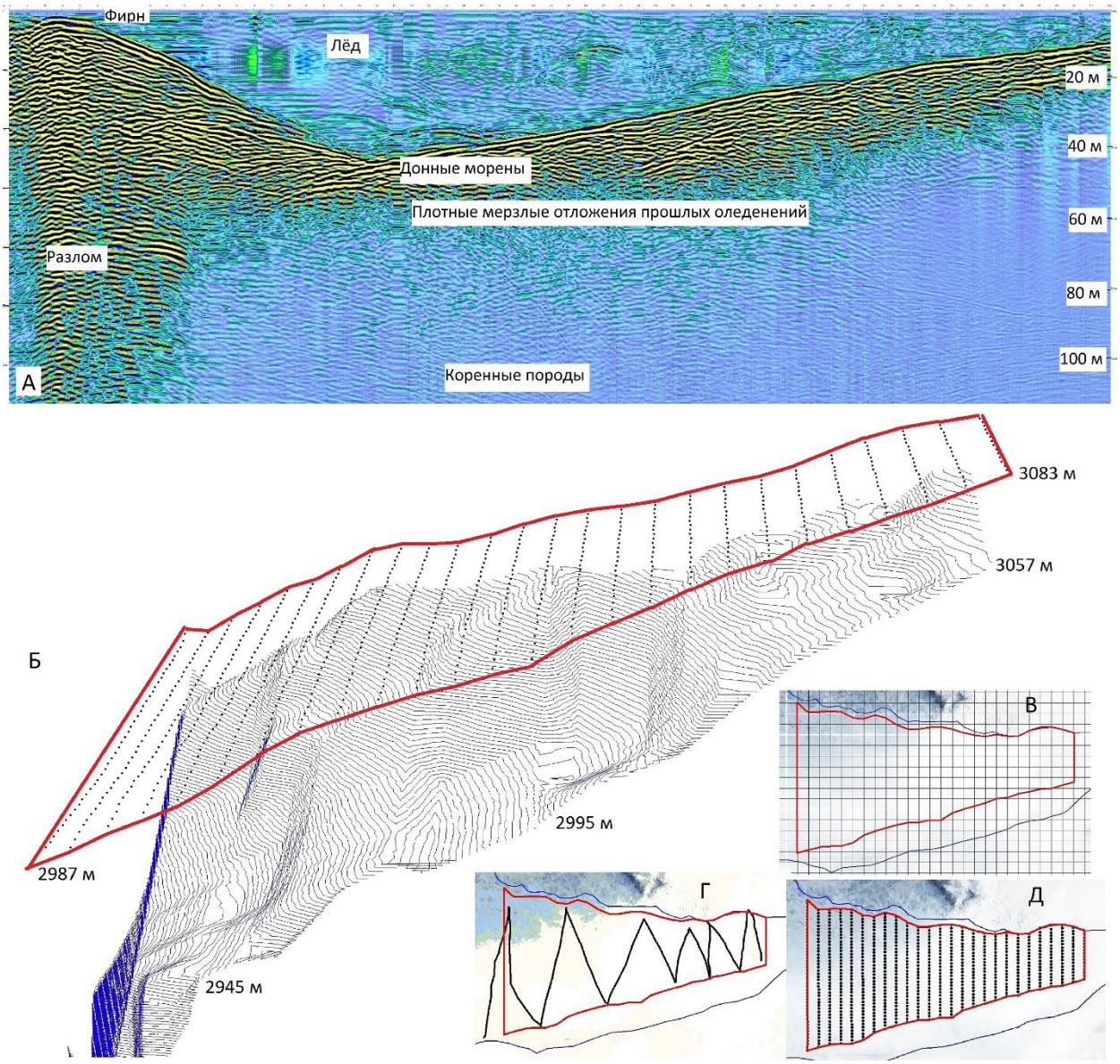


Рис. 4. Структура ледника Радде и 3D-вид ложа ледника:
А — радарограмма продольного профиля
(от оз. Ледяное в сторону вершины Эскадрилья);
Б — рельеф ледяного ложа и линии профилей на дневной поверхности ледника;
В — сетка для построения поперечных профилей;
Г — вид в плане на исследованную часть ледника с исходными профилями, рис. 3;
Д — результирующие профили для построения 3D-модели (пояснение в тексте)
Fig. 4. Radde Glacier Structure:
A — radarogramm of the longitudinal profile (from the Ledynoe Lake to the Eskadrilia Top);
Б — the surface of the ice bed and the profile line on the daytime surface of the glacier;
B — the grid to build cross profiles;
Г — the plan view of the studied part of the glacier (fig. 3); Д — resulting profiles to build the 3D-model (explanation in text)

По результатам георадарного профилирования и предварительным расчётам в ArcViewGIS-3.2a для основной части ледника 5, на которой проводилось георадарное

исследование (рис. 3, 4 Б), объём фирна составил 0,0002 км^3, фирна и ледяного тела — 0,00086 км^3, объём вместе с рыхлыми донными моренами — 0,0009 км^3. Самый нижний слой ледника до коренных пород представляют мёрзлые грунты, вероятно, отложения прошлых оледенений объёмом 0,0003 км^3. Тогда общий объём ледника этой исследованной части составил 0,00125 км^3.

По данным георадарного исследования удалось не только измерить глубину льда и соответственно оценить объём ледника, но и выделить некоторые внутренние структуры ледника (рис. 4 А).

На продольной радарограмме (рис 4 А, она для компактности рисунка не привязана к рельефу, её необходимо развернуть под углом рис. 4 Б) выделился самый тонкий поверхностный слой фирна, ниже основная ледяная толща ледника с отдельными неоднородностями (максимальная толщина около 40 м), ниже выделилось ложе, состоящее из рыхлых отложений со льдом, представляющих донные морены, ещё ниже — переходный слой из плотных пород, оставшихся от прошлого оледенения. В нижней части ледника (слева на радарограмме) выделился разлом, заполненный рыхлыми породами со льдом, вероятно, через этот канал происходит сток от оз. Ледяное (рис. 3).

С помощью специальных инструментов ArcViewGIS была построена 3D-модель ледника (рис. 4 Б). Рельеф ложа представлен изолиниями (указаны значения некоторых изолиний: верней — 3057 м, в середине участка — 2995 м и в нижней части — 2945 м). Показана граница исследованного участка на дневной поверхности ледника с поперечными профилями, построенными по сетке из исходных профилей с шагом 10 м, пикеты каждого профиля — с шагом 3 м. Верхняя отметка этой поверхности — 3083 м, нижняя – 2987 м. На врезке (рис. 4 В) этот участок ледника представлен в плане (рис. 3) с сеткой. На рис. 4 Г — линии исходных профилей. На рис. 4 Д — поперечные профили для построения 3D-модели и поверхностей фирна, донных морен и ложа ледника. Сравнивая дневную поверхность с поверхностью ложа, можно оценить толщину ледника. Так, в верхней его части толщина 26 м (3083–3057, рис. 4 Б).

Следует отметить, что в 2017 г. зафиксировано наибольшее стаивание ледников массива. Фактически не сохранились многолетние снежники, большая их часть перешла в стадию сезонных. В 2018 г. многолетние снежники у ледника Радде увеличились, увеличив зону питания ледника. В 2019 г. исследовать ледник Радде не удалось из-за затяжного сильного ненастья в горах, вызвавшего вторую волну подтопления в Нижнеудинском и Тулунском районах Иркутской области.

ВЫВОДЫ

Использование дистанционных средств наземного, воздушного и космического базирования позволяет оперативно отслеживать изменения нивально-гляциальных образований в пространстве на поверхности Земли и в её толще. Для этого применяются приборы на принципах электромагнитного излучения в большом диапазоне длин волн. Наиболее востребованы для мониторинга ледников данные ДЗЗ Ландсат, а для исследования толщи ледников (толщины льда, внутренней структуры) георадар Око-2 с антенным блоком АБДЛ «Тритон». Площадь и толщина основных ледников горного массива Мунку-Сардык постоянно уменьшается. За 112 лет наблюдения площадь всего ледника Радде уменьшилась с 0,43 до 0,09 км^2, а его толщина — на 30 м, и, соответственно, объём — в 3 р. Площадь открытой основной части ледника Радде (I) уменьшилась за 68 лет с 0,3 до 0,06 км^2, хотя общая площадь с учётом всех его составляющих (ледники I, II и лёд под моренным чехлом) уменьшилась до 0,2 км^2. Для дальнейшего подповерхностного исследования необходимо варьирование параметрами георадара. Также планируется георадарное профилирование нижней части ледника Радде (после его отворота на северо-восток). На основе информации ДЗЗ составлены базы

данных по ледникам Южной Сибири [*Китов, Плюснин*, 2015], которые обновляются по результатам проводимого мониторинга.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено по программе ФНИ «Геоинформационное картографирование и математическое моделирование географической среды в условиях глобализации и воздействия на природные и социально-экономические процессы в Сибири и на сопредельных территориях»; при поддержке РФФИ, грант № 20-05-00253А «Трансформация геосистем Байкальской природной территории».

ACKNOWLEDGEMENTS

Study on program FSI “Geoinformation mapping and mathematical modelling of geographic Wednesday in the context of globalization and the impact on the natural and socio-economic processes in Siberia and adjacent territories”; supported by the Russian Foundation of Basic Research, grant No 20-05-00253A “Transformation of geosystems of the Baikal natural area”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каталог ледников СССР. Т. 16. Вып. 1. Ч. 3–5. Вып. 2. Ч. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 64 с.
2. *Китов А.Д., Плюснин В.М.* Базы данных ледников Прибайкалья. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2015. Т. 21. Ч. 1. С. 318–332. DOI: 10.24057/2414-9179-2015-1-21-318-332.
3. *Китов А.Д., Гладков А.С., Лунина О.В., Плюснин В.М., Иванов Е.Н., Серебряков Е.В., Афонькин А.М.* Изменения мощности ледника Перетолчина (Восточный Саян). ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2017. Т. 23. Ч. 1. С. 405–417. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-1-23-405-417.
4. *Коваленко Н.В.* Режим и эволюция малых форм оледенения. М.: МАКС Пресс, 2011. 240 с.
5. *Котляков В.М., Чернова Л.П., Муравьёв А.Я., Хромова Т.Е., Зверкова Н.М.* Изменение горных ледников в Северном и Южном полушариях за последние 160 лет. Лёд и Снег, 2017. Т. 57. № 4. С. 453–467. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-453-467.
6. *Мачерет Ю.Я*. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
7. *Осипов Э.Ю., Осипова О.П., Клевцов Е.В.* Инвентаризация ледников Восточного Саяна по материалам космических съёмок. Лёд и Снег, 2017. Т. 57. № 4. С. 483−497. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-483-497.
8. *Перетолчин С.П.* Ледники хребта Мунку-Сардык. Известия Томского технического института. Т. 9. Томск: Типолитография Сибирского товарищества печатного дела, 1908. 60 с.
9. IPCC. Climate change 2007. The physical science basis. Contribution of working group 1 to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva: Published by IPCC, 2007. 996 p.

REFERENCES

1. IPCC. Climate change 2007. The physical science basis. Contribution of working group 1 to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva: Published by IPCC, 2007. 996 p.

2. *Kitov A.D., Plyusnin V.M.* Databases of the Baikal region glaciers. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2015. V. 21. Part 1. P. 318−332. DOI: 10.24057/2414-9179-2015-1-21-318-332 (in Russian, abs English).
3. *Kitov A.D., Gladkov A.S., Lunina O.V., Plyusnin V.M., Ivanov E.N., Serebryakov E.V., Afon'kin A.M.* Changes in thickness of Peretolchin glacier (Eastern Sayan). InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2017. V. 23. Part 1. P. 405-417. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-1-23-405-417 (in Russian, abs English).
4. *Kotlyakov V.M., Chernova L.P., Murav'yov A.Ya., Khromova T.E., Zverkova N.M.* Changes 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. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-453-467 (in Russian).
5. *Kovalenko N.V.* Mode and the evolution of small forms of glaciation. Moscow: MAKS Press, 2011. 240 p. (in Russian).
6. *Macheret Ju.Ja*. Radio-echo sounding of glaciers. Moscow: Scientific World, 2006. 392 p. (in Russian).
7. *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. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-483-497 (in Russian).
8. *Peretolchin S.P.* Glaciers of the Munku-Sardyk Range. News of the Tomsk Technical Institute. V. 9. Tomsk: Typolithography of the Siberian Printing Association, 1908. 60 p. (in Russian).
9. USSR Glacier Inventory. V. 16. Iss. 1. Part. 3−5. Iss. 2. Part. 1. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973. 64 p. (in Russian).

УДК: 912.4 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-286-297**

И.А. Рыльский[1], Е.Н. Ерёмченко[2], Т.В. Котова[3]

УСТРАНЕНИЕ ТЕНЕЙ ОТ ОБЛАКОВ НА МАТЕРИАЛАХ АВИАЦИОННЫХ СЪЁМОК В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ

АННОТАЦИЯ

Выполнение аэрофотосъёмочных работ зачастую невозможно из-за наличия высоких облаков с контрастными тенями, не позволяющими получить пригодные для дешифрирования материалы. При этом в значительной доле проектов бесснежный сезон, пригодный для съёмки, очень короток. Невозможность выполнения аэрофотосъёмки с полётами ниже облаков приводит к увеличению сроков и удорожанию работ. В ряде случаев проекты не удаётся завершить.

Существующее программное обеспечение не позволяет решить задачу выравнивания яркостей в тенях по ряду причин. Основная причина — невозможность идентифицировать границы теней с использованием только спектральных характеристик снимков, невозможность определить величину коррекции для затенённых участков.

Для решения данной задачи предлагается использовать эталонные изображения худшего разрешения, полученные со спутника. Эталонные изображения используются для локализации и определения величины спектральной коррекции аэрофотоснимков. Работа ведётся с единичными ортофотоснимками или ортофотомозаиками в единой системе координат. Для определения границ затенённых зон и значений поправок в яркости используются методы картографической алгебры на регулярных массивах данных. Далее полученные матрицы поправок подлежат фильтрации и применяются к аэрофотоснимкам высокого разрешения.

В работе приводится пример использования бесплатных спутниковых снимков для устранения или снижения контрастности теней на аэрофотоснимках с детальностью 20 см. Созданный прототип программного обеспечения позволяет выполнить аддитивную или мультипликативную коррекцию массива отдельных аэрофотоснимков.

Предлагаемый подход требует большего времени на обработку данных, однако даёт гораздо более приемлемые для визуального (ручного) дешифрирования результаты. Метод не рекомендован для использования при работе со снимками детальнее 10 см, при решении мониторинговых задач с частыми повторными съёмками, а также при необходимости проводить автоматизированное дешифрирование по спектральным эталонам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аэрофотосъёмка, космические снимки, дистанционное зондирование, ГИС, геоинформационные данные

[1] Московский государственный университет, Географический факультет, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail:* **rilskiy@mail.ru**
[2] Московский государственный университет, Географический факультет, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail:* **eugene.eremchenko@gmail.com**
[3] Московский государственный университет, Географический факультет, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail:* **tatianav.kotova@yandex.ru**

Ilya A. Rylskiy[1], **Evgeniy N. Eremchenko**[2], **Tatiana V. Kotova**[3]

ELIMINATION OF CLOUD SHADOWS ON MATERIALS OF AVIATION SHOOTING IN THE VISIBLE RANGE

ABSTRACT

Aerial photography is often impossible due to the presence of high clouds with contrasting shadows that do not allow to obtain materials suitable for decryption. At the same time, in a significant proportion of projects in Russia, the snowless season suitable for surveying is very short. The inability to perform aerial photography while flying below the clouds leads to cost increasing. In some cases, projects cannot be completed.

Existing software does not allow to solve the problem of equalizing the brightness in the shadows for several reasons. The main reason is the inability to identify the boundaries of the shadows using only the spectral characteristics of the images, the inability to determine the amount of correction for shaded areas.

To solve this problem, it is proposed to use reference images of the worse resolution obtained from the satellites. Reference images are used to localize and determine the magnitude of the spectral correction of aerial photographs. The work is performed with single orthophotographs or orthophotomosaics in the same coordinate system. To determine the boundaries of the shaded zones and the values of the corrections in brightness, methods of cartographic algebra on regular data arrays are used. Further, the obtained correction matrices are subject to filtering and are used to correct high-resolution aerial photographs.

The paper gives an example of the use of free (or cheap) satellite images to eliminate or reduce the contrast of shadows on aerial photographs with a detail of 20 cm. The created prototype software allows to perform additive or multiplicative correction of an array of individual aerial photographs.

The proposed approach requires more time for data processing, but gives much more acceptable results for visual (manual) decryption. The method is not recommended for use when working with images in more than 10 cm, when solving monitoring tasks with frequent repeated surveys, and also, if necessary, to carry out automated decoding using spectral standards.

KEYWORDS: airborne imagery, satellite images, remote sensing, GIS, geoinformation data

ВВЕДЕНИЕ

Проблематика наличия теней на снимках

Выполнение аэрофотосъёмочных работ всегда достаточно сильно зависело и будет зависеть от погодных условий. В эпоху тяжёлых авиационных систем требования по проведению АФС допускали работу только в ясную, безоблачную погоду. Позднее, когда появились цифровые камеры, это требование в целом осталось, однако появилась возможность работать с малых высот, ниже облачного покрова (т.е. в пасмурную погоду). Работа при наличии неблагоприятных явлений (осадки, туман, дымка) не практикуется по объективным причинам и, вероятно, не будет практиковаться в ближайшие годы.

[1] Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Moscow, 119991, Russia; *e-mail:* **rilskiy@mail.ru**
[2] Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Moscow, 119991, Russia; *e-mail:* **eugene.eremchenko@gmail.com**
[3] Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Moscow, 119991, Russia; *e-mail:* **tatianav.kotova@yandex.ru**

Тем не менее существует ещё один тип погоды, который встречается очень часто, но в большинстве случаев считается малопригодным для ведения съёмочных работ. Это погода с переменной облачностью или с разорванной облачностью [Руководство..., 1986].

В этом случае осадков нет, а облака могут находиться существенно выше необходимого уровня съёмки (300–1500 м); при этом их тени и крайне изменчивые условия освещённости территории не позволяют выполнить нормализацию оптической плотности по полю кадра. Это приводит к возникновению недоэкспонированных или переэкспонированных кадров, а также кадров, на которых одновременно встречаются пере- и недоэкспонированные участки.

Если солнце стоит низко над горизонтом или присутствуют высотные облака, рассеивающие лучи и смягчающие тени, то дешифровочные свойства материалов, полученных в такую погоду, могут быть приемлемы для визуального (ручного) дешифрирования. Однако если используются автоматизированные методы дешифровки или тени имеют высокую контрастность, то в этом случае результаты залёта будут неприемлемы [Руководство..., 1989]

В то же время огромное количество регионов на территории РФ отличают одновременно две особенности:

- короткий бесснежный период (1−3 месяца);
- высокая степень увлажнённости ландшафтов.

Эти особенности ведут к тому, что в течение короткого лета бóльшая часть солнечной погоды без осадков представляет собой как раз погоду с наличием отдельных мелких облаков с высококонтрастными тенями. Эти условия характерны для районов тундры, лесотундры и северо-таёжной зоны, а также для районов с муссонным (Дальний Восток) или морским климатом (Калининградская, Ленинградская, Псковская, Архангельская, Мурманская обл., Камчатский край, Курильские о-ва).

Невозможность получения приемлемых материалов АФС в подобных погодных условиях приводит к удлинению сроков работ, их серьёзному удорожанию (от 25 до 200 % в зависимости от территории), а примерно в 30 % случаев — к срыву съёмочных работ (особенно при работах в конце съёмочного сезона). Таким образом, решение подобной задачи является весьма важным для хозяйства страны и информационного обеспечения проектов на территории РФ.

Недостатки существующих методов борьбы с тенями от облаков

Проблема устранения теней от облаков программными методами состоит в определении границы тени от облака (облаков). Большинство программных сред, предлагающих средства подавления данного негативного эффекта (например, Erdas Imagine, Inpho OrthoVista), работают примерно следующим образом:

- рассматриваются уже ортотранформированные отдельные снимки;
- снимки рассматриваются как совокупность перекрывающихся изображений;
- различия в яркости на изображениях в зоне перекрытия трактуются как дешифровочный признак тени, зона максимально быстрых «скачков» яркости считается краем тени;
- совокупность зон с быстрыми перепадами яркости формирует (тем или иным способом геометрических построений) контуры «теней» или «засветов» на итоговом изображении;
- полученные контуры «теней» и «засветов» используются для коррекции яркостей, при этом для расчёта величин поправок в спектральные яркости используются средние значения яркостей по всему набору снимков;
- итоговые результаты исправления яркостей обычно становятся видны только после создания итоговой ортофотомозаики.

Нетрудно догадаться, что подобные способы локализации границ теней от облаков являются, как минимум, спорными [*Dare*, 2005] и на практике дают неприемлемые результаты — от полной деградации изображений до психоделических переливов цветов на участках перехода от тени к свету. При этом (в зависимости от алгоритма и конкретного вида программного обеспечения) отдельные объекты вроде темнохвойных лесов, ярких пятен травы или изменений цвета воды в реках могут трактоваться так же, как тени от облаков с последующим внесением некорректных исправлений в итоговые изображения [*Guo et al.*, 2011]. Отметим, что при данном подходе не идёт речь об исправлении отдельных снимков — только в совокупности.

Рис. 1. Пример аэроснимка с тенями от облаков, непригодного для дешифрирования
Fig. 1. Example of aerial image with cloud shadows, unsuitable for decryption

Попытки найти границы теней на отдельных снимках малорезультативны (рис. 1) в силу того, что только спектральных признаков для этого мало (тень на светлом поле ярче освещённого солнцем хвойного леса), текстурные признаки отсутствуют [*Finlayson et al.*, 2002], а оценка топологии формы затруднена из-за того, что на одном кадре тень даже от небольшого облака бывает видна далеко не всегда.

Именно в силу вышеописанной проблематики и недостатков программных методов обработки изображений, снятых в условиях разорванной облачности, был разработан иной метод исправления теней на снимках.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Новый подход к исправлению теней и источники вспомогательных данных для этого

Суть предлагаемого метода сводится к следующему: поскольку по одиночному снимку определить границы теней облаков практически невозможно, а по их совокупности возможно, но с крайне неоднозначным результатом, то, следовательно, для определения этих границ требуется некий эталон.

Логично предположить, что эталон должен:

- быть снимком того же оптического диапазона (в нашем примере — видимого, но могут быть и иные варианты);

- быть снят примерно в тот же фенологический период (уровень развития листвы должен быть таким же, как на аэрофотосъёмке);
- быть максимально приближенным к дате аэрофотосъёмки;
- не иметь теней от облаков или изображений самих облаков;
- обладать разрешением не хуже 10 м (на снимке должны читаться основные ландшафтные элементы вроде мелких рек, дорог, крупных зданий);
- быть бесплатным или иметь стоимость на уровне не выше 1−2 % от стоимости аэрофотосъёмки на данной территории.

Всем этим критериям отвечают только космические снимки с детальностью 2–15 м. Снимки с детальностью 15 и 10 м (Landsat 8, Sentinel) обладают наибольшей универсальностью — они имеют охват более 170x170 км (в большинстве случаев достаточно 1–2 сцен, чтобы полностью покрыть любой мыслимый объём работ при площадной аэрофотосъёмке). Они бесплатны, имеют многократное покрытие всей планеты и регулярно обновляются.

Недостатком данных Landsat и Sentinel является их низкая детальность, позволяющая использовать их для исправления теней на снимках с разрешением 15 см и хуже. Для более детальных снимков (3–15 см) требуется более высокое разрешение — близкое по детальности к сверхдетальным снимкам. Однако в этом случае возрастает стоимость данных (до 14–20 долларов США за 1 км^2, что дорого), и существенно снижается вероятность наличия архивных данных на данную территорию.

2. Подготовка данных

Работа ведётся с уже ортотрансфомированными изображениями. И данные аэрофотосъёмки, и космические снимки подвергаются ортотрансформации с использованием одной и той же модели рельефа, в единой системе координат (допустим, UTM). Весь массив снимков и эталон приводятся в примерное соответствие (цветовой баланс, общая яркость по полю кадра) с помощью стандартных процедур корректировки растров [*Levine, Bhattacharyya,* 2005]. Обычно эталон корректируется по причине меньшего на несколько порядков объёма данных. В ряде случаев эта процедура может быть бесполезна — при значительных яркостных различиях кадров аэрофотосъёмки. В этом случае эталон просто приводится в наиболее приемлемый (с точки зрения дальнейшей обработки и её целей) вид (рис. 2).

Для каждого аэрофотоснимка устанавливается используемый для его исправления космический эталон — далее это сопоставление мы назовем парой «эталон-аэрофото». Для каждой пары «эталон-аэрофото» также установим единые габариты зоны анализа; обычно это габариты ортофототрансформированного аэрофотоснимка, подвергаемого исправлению.

При этом будут наблюдаться:

- отличия в местоположении контуров, вызванные различным разрешением снимков (возможное смещение границ объектов на величину до 1 пикс космического снимка, т.е. до 10–15 м в плане);
- отличия в местоположении контуров, появляющиеся вследствие недостаточно точной ориентации аэрофотоснимков с детальностью 15–20 см, которыми можно пренебречь, т.к. они обычно не превышают 3–4 пикс, т.е. 45–80 см, что несущественно;
- отличия в местоположении контуров, возникающие из-за недостаточно точной привязки космического снимка, которые могут достигать 2–3 пикс, т.е. 20–30 м;
- различия в яркостях по каждому каналу вне зависимости от наличия или отсутствия теней на снимках.

Рис. 2. Геопривязанный космический снимок (Sentinel)
и каталог ортотрансформированных аэрофотоснимков
Fig. 2. Georeferenced satellite image (Sentinel)
and catalog of orthorectified aerial images

Работа с каждым из снимков ведётся по всем каналам изображения, что позволяет не менять алгоритм работы при использовании 1,3,4 и большего количества каналов [*Finlayson et al.*, 2009]. Каждый из каналов представляется как поверхность, преобразуясь (в нашем случае) в данные формата ArcInfo GRID [*Капралов и др.*, 2004]. Эта операция, к примеру, проделывается с красным каналом аэрофотоснимка и космоснимка для пары «эталон-аэрофото». Полученные две поверхности будут иметь в первую очередь пространственные несовпадения, обусловленные причинами, описанными выше.

Для устранения пространственных несовпадений необходимо определить параметры оптимального сдвига одного из изображений. Их мы будем определять для космоснимка, как обладающего меньшей точностью привязки, чем аэрофотоснимок. Очевидно, что достоверно и гарантированно определить необходимые величины сдвига точнее, чем на 1 пикс, невозможно. Также, принимая во внимание вышесказанное, эти величины не могут составлять более 3 пикс по каждой из осей (для равнинных регионов). Следовательно, оптимальным смещением будет обладать одно из изображений, смещённых по каждой из осей на некую величину (dX и dY): 3, -2, -1, 0, 1, 2, 3 пикс — всего 49 вариантов (7 вариантов по оси X и 7 по оси У).

Для аэрофотоснимка произведём уменьшение разрешения до уровня космического снимка — это позволит сэкономить вычислительные мощности. Для каждого из 49 вариантов смещения космоснимка вычислим поверхность разностей спектральных яркостей для каждой ячейки изображения (поверхность dI), после чего возведем её в квадрат (dI^2). Вычислив сумму ячеек в dI^2 для для каждого из 49 вариантов смещений dX и dY, выберем значения dX и dY, при которых сумма ячеек dI^2 минимальна. В случае наличия нескольких вариантов dX и dY с одинаковыми минимальными суммами dI^2 используется минимальное значение dX и dY. Такая ситуация возможна в местности с полностью однородным ландшафтом — лес, тундра, луговая растительность.

Теоретически вычисление суммы квадратов дельт яркостей даёт результат хуже, чем вычисление коэффициента корреляции Пирсона. Однако на практике вычисление

коэффициента корреляции для 49 вариантов занимает существенно (в несколько раз) большее время, не давая сколько-нибудь заметной разницы в результатах.

Определив оптимальные значения смещения dX и dY (в пикс), смещаем космический снимок на соответствующие значения в м. После этого можно переходить к работе непосредственно с яркостями пары «эталон-аэрофото».

3. Исправление готовых ортофотоснимков

Существует два основных подхода к внесению коррекций в яркости снимков, направленных на достижение одной цели — уравнивание яркостей. Это аддитивный и мультипликативный подходы.

Рис. 3. Ортофотоснимок без исправления теней
Fig. 3. Ortoimage without shadow elimination

Рис. 4. Ортофотоснимок с исправленными тенями
Fig. 4. Ortoimage with shadow elimination

Суть аддитивного подхода — вычисление поверхности разницы между эталоном (космоснимок) и исправляемыми данными (аэрофото), после чего к данным аэрофотоснимка прибавляется поверхность разницы. Метод малочувствителен к наличию на снимках контрастных мелких объектов, однако при значительных изменениях яркости по полю кадра или больших отличиях в яркостях эталона и аэрофотоснимка приводит к сильному вырождению снимков — потеря контрастности, искажения цветов.

Суть мультипликативного подхода — вычисление поверхности частного между эталоном (космоснимок) и исправляемыми данными (аэрофото), после чего данные аэрофотоснимка умножаются на поверхность частного. Метод чувствителен к наличию на снимках контрастных мелких объектов, однако при значительных изменениях яркости по полю кадра или больших отличиях в яркостях эталона и аэрофотоснимка не приводит к потере контрастности, позволяет работать даже при сильных отличиях эталона от исходных аэрофотоснимков [*Shor, Lischinski,* 2008].

На основании субъективных оценок и статистики применения данного подхода можно сделать вывод, что мультипликативный метод даёт более применимый на практике результат (рис. 3 и 4). Причина в том, что при малых различиях, удобных для аддитивного метода, исправлением яркостей в тенях от облаков можно и пренебречь. А при значительных различиях, когда коррекции не избежать, он даёт худший результат.

В обоих случаях получаемые поверхности нуждаются в фильтрации (рис. 5), сглаживании и приведении к разрешению аэрофотоснимка. В противном случае они будут иметь различные «артефакты» в виде квадратов-пикселов космического снимка, пикселов-выбросов и ореолов вокруг высококонтрастных изображений. Обычно для фильтрации применяется скользящее окно с радиусом 1–5 пикс космического снимка. Также возможно исключение отдельных участков из поверхности-дельты или поверхности-частного в тех районах, в которых есть высококонтрастные объекты с размерами менее или равным разрешению космоснимка.

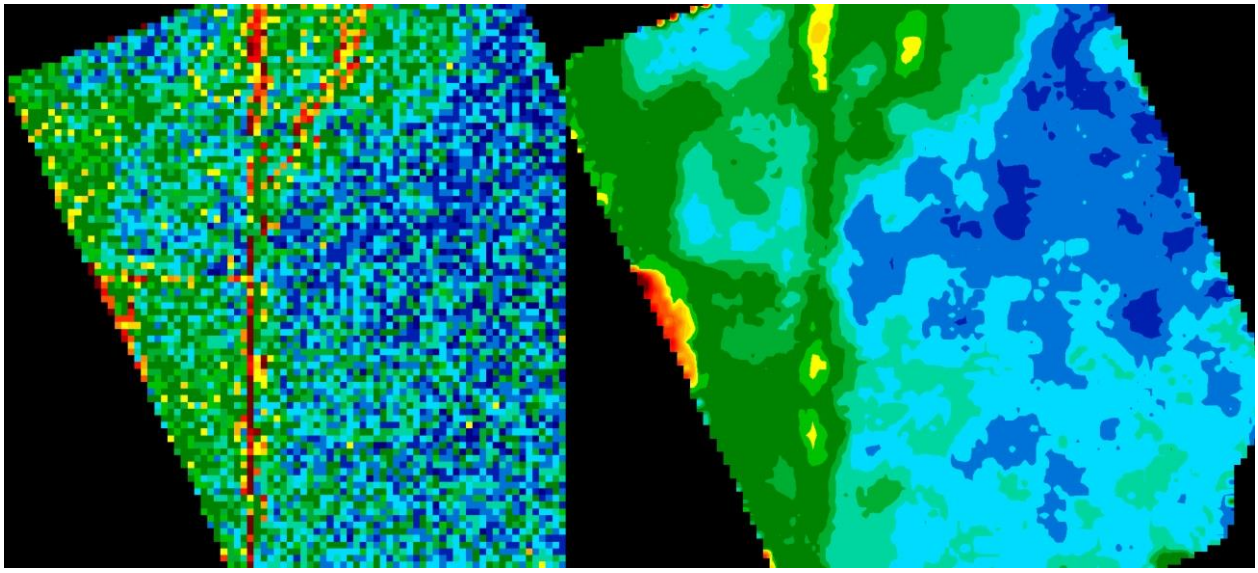


Рис. 5. Поверхности разницы спектральных яркостей — исходная (слева) и после фильтрации (справа)
Fig. 5. Spectral brightness difference surfaces — original (left) and filtered (right)

4. **Исправление готовых ортофотомозаик**

Нетрудно заметить, что использование фильтрационных алгоритмов со скользящим окном неизбежно ведёт к размыванию границ зон теней (или засветки). Ширина зоны перехода при этом, как следует из сказанного выше, составляет до 5 пикс (т.е. до 50–70 м). Тем не менее, на практике это не является принципиальной проблемой, в силу того что тень от облака на земле не является резкой границей, а как раз представляет собой зону перехода яркостей шириной до 100 м (в зависимости от высоты облачности и её оструктуренности) [*Zhu et al.*, 2010]. Таким образом, при создании из полученных исправленных изображений итоговой ортофотомозаики данная особенность мало влияет на визуальные качества и в значительной степени нивелируется за счёт избыточности кадров и дополнительного их уравнивания по яркостям между собой (осуществляется программным обеспечением для создания мозаик, например, Inpho OrthoVista).

Рис. 6. Ортофотомозаика без исправления теней
Fig. 6. Ortomosaic without shadow elimination

Рис. 7. Ортофотомозаика с исправлением теней
Fig. 7. Ortomosaic with shadow elimination

Однако всё меняется в том случае, если мы пытаемся исправить тени на готовой ортофотомозаике (рис. 6). В этом случае резкие границы теней на соседних проходах (возникают за счёт движения облаков) не имеют природного размытия границ и чрезвычайно контрастны [*Liu, Gleicher,* 2008]. Описанный выше метод позволяет изменить яркости в центральных частях теней и засветов до эталонных значений, однако на границах между соседними снимками в мозаике начинают возникать световые ореолы. Это визуально нежелательно, а также ухудшает дешифровочные качества изображения по сравнению с созданием его из единичных снимков с исправленными тенями.

Тем не менее в любом случае итоговый результат всё равно лучше исходного (рис. 7). Положительной чертой данного метода является его большая скорость (в 4–6 р. и более), а также возможность использовать метод в том случае, если работа с исходными снимками не представляется возможной — данные предыдущих лет, работа с материалами других подрядчиков, недостаток времени и т.п. ситуации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результатами исследований и вышеприведённых соображений стало создание прототипа программного продукта на базе внутреннего языка программирования ArcView. Созданное программное обеспечение делает возможной работу с каталогизированными наборами ортотрансформированных изображений, подлежащих коррекции с использованием эталона.

При пакетной обработке данных возможна обработка группы изображений с использованием (т.е. в пределах) одного эталона. Спектральные каналы не имеют значения, но их число не должно превышать 3 (RGB или CIR). Разрядность изображений — 8 бит, в перспективе — 16 бит.

Рекомендованные настройки и параметры отлажены для разрешающей способности в 15–20 см для аэрофотоснимков и 10–15 м для космоснимков. Система координат растровых изображений должна быть единой (не реализовано перепроецирование «на лету»).

Основное назначение для данной работы — ортотрансформация кадров среднеформатных камер, используемых самостоятельно или в составе комплексов воздушного лазерного сканирования. Подход и программное обеспечение неприменимы для решения задач по мониторингу объектов с периодичностью менее 1 года, т.к. обеспечить адекватное по времени покрытие космическими данными чаще чем 1–2 р. в год невозможно или маловероятно — в этом случае будет возникать нестыковка наподобие следующей: на космоснимке объект есть, а на аэрофотосъёмке — нет.

Результаты обработки изображений при необходимости создания ортофотомозаики говорят о том, что наиболее оптимальным является сначала исправить тени на отдельных снимках, а потом создать из них ортофотомозаику, нежели исправлять уже готовую ортофотомозаику.

Технически программное обеспечение позволяет производить обработку снимков размером до 150 Мпикс. Теоретически предельным размером обрабатываемого изображения является 400–450 Мпикс, однако подобное тестирование не проводилось ввиду отсутствия подобных данных у авторов. На начало 2020 г. 150 Мпикс — предельное разрешение для среднеформатных камер; существуют и широкоформатные камеры подобного разрешения (более старые модели). Разрешение 400 и более Мпикс на 2020 г. не достигнуто ни одной из коммерчески доступных камер.

Описанный подход применим не только к изображениям кадровых камер, но и к изображениям со сканеров с ПЗС-линейкой. Единственным условием применимости является единство проекции, привязки и её качество (не хуже 2–3 пикс спутникового

изображения), а также необходимость ортотрансформировать все изображения до начала обработки.

ВЫВОДЫ

Вышеописанные методы работы с изображениями были реализованы на практике в виде программного комплекса-прототипа на базе ГИС-пакета ArcView с использованием внутреннего языка программирования. Полученные результаты (как в части обработки отдельных ортофотоснимков, так и мозаик ортофотоснимков) говорят о перспективности подхода. Это открывает широкие перспективы для дальнейшего совершенствования данного метода и оптимизации процесса аэрофотосъёмки в условиях малопригодных погодных условий в районах Крайнего Севера и Дальнего Востока.

Работа с использованием данного метода более оптимальна в режиме работы с отдельными ортофотоизображениями, нежели с готовыми ортофотомозаиками. Это даёт существенно более качественное итоговое изображение, однако требует в 4–5 р. большего количества машинного времени. В случае реальных проектов, площадь которых измеряется тысячами км^2, это может занимать существенное количество времени.

Подход позволяет значительно улучшить визуальное восприятие изображений и их дешифровочные качества при визуальной (ручной) обработке. Подход не позволяет выполнить оптическую нормализацию кадров для целей автоматизированного дешифрирования. Предположительно, в горных условиях (затенённые ущелья, горы, отбрасывающие значительные тени) данный подход может дать некорректные результаты.

Тем не менее продемонстрированные результаты позволяют утверждать, что достигнутые результаты в работе с изображениями при незначительной сложности в обработке дают существенно более качественный результат на выходе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках госбюджетной тематики исследований Регионального центра Мировой системы данных (Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова) при содействии АО «Арк-он».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was performed within the framework of a state budget theme of Regional Center of World Data System (Geographical Faculty of Moscow State University named after M.V. Lomonosov) in a collaboration with JSC “Ark-on”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Капралов Е.Г., Кошкарев А.В., Тикунов В.С.* Основы геоинформатики. Учебное пособие для студентов вузов в 2-х книгах. М.: Академия, 2004. 480 с.
2. Руководство по аэрофотосъёмке в картографических целях. Военно-топографическое управление Генерального Штаба. М.: Редакционно-издательский отдел, 1989. 105 с.
3. Руководство по аэрофотосъёмочным работам. М.: Министерство гражданской авиации, 1986. 176 с.
4. *Dare M.* Shadow analysis in high-resolution satellite imagery of urban areas. Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 2005. V. 71. P. 169–177. DOI: 10.14358/PERS.71.2.169.
5. *Finlayson G., Drew M., Lu C.* Entropy minimization for shadow removal. International Journal of Computer Vision, 2009. No 85. P. 35–57.
6. *Finlayson G.D., Hordley S.D., Drew M.S.* Removing shadows from images. 7th European Conference on Computer Vision. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002. P. 823–836.

7. *Guo R., Dai Q., Hoiem D.* Single-image shadow detection and removal using paired regions. CVPR (The Conference on Computer Vision and Pattern Recognition), Colorado Springs. IEEE, 2011. P. 2033–2040.
8. *Levine M.D., Bhattacharyya J.* Removing shadows. Pattern Recognition Letters, 2005. V. 26. Iss. 3. P. 251–265. DOI: 10.1016/j.patrec.2004.10.021.
9. *Liu F., Gleicher M.* Texture-consistent shadow removal. ECCV (10th European Conference on Computer Vision), Marseille, France, 2008. Lectures Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. V. 5305. P. 437–450. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-88693-8_32.
10. *Shor Y., Lischinski D.* The shadow meets the mask: Pyramid-based shadow removal. Computer Graphics Forum, 2008. V. 27. Iss. 2. P. 577–586. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2008.01155.x.
11. *Zhu J., Samuel K., Masood S.Z., Tappen M.* Learning to recognize shadows in monochromatic natural images. CVPR (IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition), San-Francisco, CA, USA, 2010. Proceedings. P. 223−230. DOI: 10.1109/CVPR.2010.5540209.

REFERENCES

1. *Dare M.* Shadow analysis in high-resolution satellite imagery of urban areas. Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 2005. V. 71. P. 169–177. DOI: 10.14358/PERS.71.2.169.
2. *Finlayson G., Drew M., Lu C.* Entropy minimization for shadow removal. International Journal of Computer Vision, 2009. No 85. P. 35–57.
3. *Finlayson G.D., Hordley S.D., Drew M.S.* Removing shadows from images. 7th European Conference on Computer Vision. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002. P. 823–836.
4. Guidance in aerial photography. Moscow: Ministry of Civil Aviation, 1986. 176 p. (in Russian).
5. Guidance in aerial photography for cartographic purposes. Military Topographical Directorate of the General Staff. Moscow: Printing and publication department, 1989. 105 p. (in Russian).
6. *Guo R., Dai Q., Hoiem D.* Single-image shadow detection and removal using paired regions. CVPR (The Conference on Computer Vision and Pattern Recognition), Colorado Springs. IEEE, 2011. P. 2033–2040.
7. *Kapralov E.G., Koshkarev A.V., Tikunov V.S.* Fundamentals of geoinformatics. Moscow: Academy, 2004. 480 p.
8. *Levine M.D., Bhattacharyya J.* Removing shadows. Pattern Recognition Letters, 2005. V. 26. Iss. 3. P. 251–265. DOI: 10.1016/j.patrec.2004.10.021.
9. *Liu F., Gleicher M.* Texture-consistent shadow removal. ECCV (10th European Conference on Computer Vision), Marseille, France, 2008. Lectures Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. V. 5305. P. 437–450. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-88693-8_32.
10. *Shor Y., Lischinski D.* The shadow meets the mask: Pyramid-based shadow removal. Computer Graphics Forum, 2008. V. 27. Iss. 2. P. 577–586. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2008.01155.x.
11. *Zhu J., Samuel K., Masood S.Z., Tappen M.* Learning to recognize shadows in monochromatic natural images. CVPR (IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition), San-Francisco, CA, USA, 2010. Proceedings. P. 223−230. DOI: 10.1109/CVPR.2010.5540209.

УДК: 528.77; 551.584.2 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-298-312**

М.Ю. Грищенко[1], Е.Ю. Сарычев[2], М.И. Варенцов[3], Т.Е. Самсонов[4]

ОПЫТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОЩАДИ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ ДЛЯ ЗАДАЧ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ МОСКВЫ)

АННОТАЦИЯ

Детализированное моделирование погоды и климата для городских территорий востребовано в различных научных и прикладных задачах, начиная с численного прогноза погоды и заканчивая оценкой биоклиматических условий города и долгосрочным градостроительным планированием. Применение современных метеорологических моделей для городских условий требует определения набора параметров, характеризующих городскую среду и особенности застройки. Одним из таких параметров является доля площади, занимаемой городской застройкой.

В данной работе предложена универсальная методика определения доли площади городской застройки, основанная на дешифрировании космических снимков высокого пространственного разрешения со спутников Sentinel-2. Апробация методики проведена на примере территории города Москвы, характеризующейся разнообразием форм городской застройки. Расчёты площади, занятой городской застройкой, выполнены для ячеек расчётной сетки мезомасштабной численной метеорологической модели COSMO размером 1×1 км. Для верификации разработанного метода использованы краудсорсинговые картографические данные OpenStreetMap, по которым также произведена оценка доли площади зданий по ячейкам модельной сетки. Данные о доли площади застройки, полученные в результате дешифрирования космических снимков и по данным OpenStreetMap, показали хорошее взаимное согласие, что подтверждает перспективность использования предложенной методики. На примере территорий, по которым два метода показывают существенные расхождения, выявлены их типичные причины, а именно отсутствие информации о зданиях в базе данных OpenStreetMap или же маскировка зданий деревьями, не позволяющая их дешифрировать по космическим снимкам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: городская застройка, параметры городской среды, климат города, Sentinel-2, COSMO

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

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail:* **evgen.sarychev.1@gmail.com**

[3] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр и Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, стр. 4, 119234, Москва, Россия; *e-mail:* **mvar91@gmail.com**

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

Mikhail Yu. Grischenko[1], **Evgeny Yu. Sarychev**[2], **Mikhail I. Varentsov**[3], **Timofey E. Samsonov**[4]

EXPERIENCE IN DETERMINING THE BUILDING AREA USING SATELLITE IMAGES FOR THE PURPOSES OF METEOROLOGICAL MODELING (CASE OF MOSCOW CITY)

ABSTRACT

Detailed weather and climate modeling for urban areas is in demand in various scientific and applied tasks, starting from a numerical weather forecast and ending with an assessment of the bioclimatic conditions of the city and long-term urban planning. The application of modern meteorological models for urban areas requires the determination of a set of parameters characterizing the urban environment and urban canopy features. One of these parameters is the area fraction, occupied by buildings.

In this paper, we propose a universal method for determining building area fraction based on the interpretation of high-resolution satellite images from the Sentinel-2 satellites. The methodology was tested on the example of the territory of the city of Moscow, characterized by a variety of forms of urban development. The calculation of the building area fraction was performed for the cells of the computational grid of the COSMO mesoscale numerical meteorological model with 1 km spacing. To verify the developed method, we used an alternative estimate of the building area fraction based on the crowdsourcing cartographic data OpenStreetMap. The data on the building area fraction derived from the satellite images and from OpenStreetMap data have shown a good mutual agreement, which confirms the promise of using the proposed methodology. On the example of territories where the two methods show significant differences, their typical causes are identified, namely the lack of information about buildings in the OpenStreetMap database, or the masking of buildings by trees, which does not allow them to be revealed from satellite images.

KEYWORDS: building area, urban environment parameters, urban climate, Sentinel-2, COSMO

ВВЕДЕНИЕ

Одними из основных трендов развития современной метеорологии и климатологии является всё более активное применение методов численного моделирования и повышение пространственного разрешения используемых моделей. В случае региональных моделей атмосферы, используемых для прогноза погоды и моделирования климата для ограниченной территории, горизонтальный шаг сетки составляет, как правило, 1–3 км или даже меньше. Модели, работающие с такими шагами сетки, называются мезомасштабными, т.к. позволяют явно разрешать практически весь спектр мезомасштабных процессов в атмосфере [*Orlanski*, 1975].

Применение метеорологических моделей со столь высоким пространственным разрешением особенно перспективно для крупных городов. Детализированное

[1] Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Leninskiye Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail:* **m.gri@geogr.msu.ru**
[2] Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Leninskiye Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail:* **evgen.sarychev.1@gmail.com**
[3] Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Research Computing Center, Faculty of Geography, Leninskiye Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail*: **mvar91@gmail.com**
[4] Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Leninskiye Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail:* **tsamsonov@geogr.msu.ru**

моделирование погоды и климата для урбанизированных территорий востребовано в различных научных и прикладных задачах, включая численный прогноз погоды и качества воздуха, оценку биоклиматических условий города, долгосрочное градостроительное планирование и т.д. [*Baklanov et al.,* 2018].

Метеорологические модели, применяемые для городских условий, должны адекватно воспроизводить характерные особенности городского климата, определяемые термодинамическими свойствами урбанизированной поверхности и антропогенной деятельности. Яркий пример таких особенностей — эффект городского острова тепла; также влияние города изменяет условия влажности, ветра, осадков и т.д. [*Landsberg,* 1981; *Oke et al.,* 2017]. Характерной чертой городского климата является его ярко выраженная мозаичность, определяемая чередованием различных типов застройки, промышленных территорий и парков.

Даже при шаге расчётной сетки в первые сотни метров учёт в модели отдельных зданий и других элементов городского ландшафта не представляется возможным. Поэтому для описания влияния городской поверхности на состояние атмосферы используются так называемые «параметризации», или модели городской среды различной степени сложности [*Garuma,* 2018]. Все они предполагают, что ячейка модельной сетки или её часть занята однородной городской средой, характеризуемой набором статистических характеристик. Достоверность определения этих статистических характеристик во многом определяет качество результатов моделирования. Соответственно, необходимой составляющей работы по моделированию погоды и климата для городских условий является определение необходимых характеристик городской среды [*Oke et al.,* 2017; *Ching et al.,* 2019; *Masson et al.,* 2020]. Набор параметров, требуемых для различных моделей и параметризаций, может варьировать, но практически во всех случаях включает долю площади урбанизированной территории, теплофизические свойства городских поверхностей и ряд морфометрических параметров — долю площади, занятой зданиями, их среднюю высоту, её отношение к средней ширине улиц.

Существуют различные методы определения необходимых для моделирования параметров городской среды. Топографические и морфометрические параметры застройки могут быть эффективно извлечены из баз пространственных данных, содержащих информацию об отдельных зданиях и других элементах городской среды в векторном виде [*Chen, Ng,* 2011; *Gál, Unge*r, 2014; *Lindberg,* 2007; *Samsonov et al.,* 2015]. Наиболее надёжной и детальной информацией такого вида обладают государственные картографические агентства или коммерческие компании. Как следствие, такие данные крайне редко находятся в открытом доступе, их получение и использование сопряжено со значительными сложностями. Одной из альтернатив является использование краудсорсинговой (создаваемой волонтёрами) картографической информации, например, полученной в рамках проекта OpenStreetMap[1] (далее — OSM). Данные OSM зарекомендовали себя как достаточно надёжный и удобный источник информации для получения параметров городской среды *[Samsonov et al*., 2015; Климат Москвы…, 2017]. Однако для многих городов степень полноты данных OSM оставляет желать лучшего.

Другим перспективным источником информации о необходимых для моделирования характеристиках городской среды являются спутниковые снимки высокого пространственного разрешения. Данные, которые получают с помощью различных спутников, иногда невозможно добыть другими способами [*Касимов и др.,* 2013]. Главными преимущества использования данных космической съёмки является их относительная дешевизна и глобальное покрытие.

[1] Электронный ресурс: https://www.openstreetmap.org/

Один из популярных методов использования спутниковых снимков в городской климатологии — выделение т. наз. «локальных климатических зон» (ЛКЗ). Теория ЛКЗ позволяет выделить среди бесконечного числа возможных сочетаний застройки и подстилающей поверхности наиболее распространённые и устойчивые, а именно 10 типов застройки и 7 типов естественной поверхности. Среди методов выделения ЛКЗ наиболее популярным является попиксельная классификация спутниковых снимков, используемая в т.ч. в рамках международного краудсорсинового проекта WUDAPT (World Urban Database and Access Portal Tools) [*Bechtel et al.*, 2015; *Ching et al.*, 2018]. Переход от классов ЛКЗ к необходимым для моделей количественным параметрам городской среды осуществляется путём установления соответствия между типом ЛКЗ и фиксированными (табличными) значениями соответствующих параметров и их дальнейшего агрегирования по ячейкам сетки модели [*Brousse et al.*, 2016; *Hammerberg et al.*, 2018]. Однако такой подход является заведомым упрощением, т.к. существенно ограничивает вариативность параметров городской среды в модели.

Спутниковые снимки высокого пространственного разрешения также являются перспективным источником информации для получения морфометрических характеристик застройки и городской среды напрямую [*Lu et al.*, 2010; *Peeters, Etzion*, 2012]; в т.ч. опыт предшествующих исследований указывает на перспективность использования космических снимков для дешифрирования городской застройки и определения занимаемой ею площади, которая является одним из ключевых параметров городской среды, необходимых для моделирования. Однако, насколько известно авторам, подобные исследования ранее проводились только для небольших тестовых территорий, но не в масштабах крупных городов, что требуется для задач моделирования.

Цель данной работы — разработка методических приёмов извлечения с космических снимков доли площади городской застройки для ячеек регулярной сетки с шагом 1 км. Работа выполнена для Москвы, крупнейшего мегаполиса России и Европы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Территория исследования

Москва — столица и крупнейший город Российской Федерации, крупнейшая моноцентрическая агломерация Европы. Население города составляет 12 млн чел., городской агломерации — 16–17 млн чел. Площадь города как административной единицы составляет 2561,5 км² (с учётом Новой Москвы), а площадь наиболее плотно урбанизированной части города составляет примерно 1000 км² (без учёта пригородов и городов-спутников).

Москва отличается довольно высокой плотностью застройки и большим разнообразием её форм. В центре города преобладает средне- и малоэтажная жилая и торгово-деловая застройка. Основная часть города застроена средне- и многоэтажными жилыми массивами, более или менее озеленёнными. Для города характерны промышленные зоны с разными типами застройки: плотная с крупными строениями, плотная с мелкими строениями, разреженная с крупными строениями, разреженная с мелкими строениями [*Грищенко, Ермилова,* 2018]. На окраинах города и в пригородах широко распространена малоэтажная застройка усадебного типа. Таким образом, Москву можно рассматривать как пример большого города с разнообразными типами застройки.

Важно отметить, что Московский мегаполис ранее неоднократно рассматривался как объект исследования городской климатологии [Климат Москвы…, 1969; 2017; *Мягков,* 2006; *Кузнецова и др.*, 2017; *Lokoshchenko,* 2014; 2017] в т.ч. в рамках работ по моделированию погоды и климата для городских условий [*Варенцов и др.*, 2017; *Кислов, Константинов,* 2011; *Varentsov et al.*, 2018; 2019]. В предшествующих исследованиях по моделированию метеорологического режима Москвы для определения параметров

городской поверхности использовались данные OSM[1], хорошо зарекомендовавшие себя для решения этой задачи [*Samsonov et al*., 2015; Климат Москвы…, 2017]. Для Москвы также выполнена классификация и картографирование локальных климатических зон [*Самсонов, Тригуб,* 2018]. Перспективы продолжения исследований по моделированию погоды и климата Московского мегаполиса делают востребованным развитие новых методов определения параметров городской среды, а имеющийся задел по работе с другими источниками данных позволяет верифицировать и калибровать новые методы.

Материалы и методы

Для проведения исследования с портала EarthExplorer[2] отобраны снимки со спутников Sentinel-2 на территории Москвы в «старых» границах и ближайших пригородов, а именно для участка 40×40 км, который ограничен параллелями 55°28'58" с.ш. и 56°00'20" с.ш. и меридианами 37°14'22" в.д. и 37°59'10" в.д.

Для определения площади застройки использованы снимки в следующих спектральных каналах оптического диапазона: 0,459–0,525 мкм (синий), 0,542–0,578 мкм (зелёный), 0,65–0,68 мкм (красный) и 0,78–0,89 мкм (ближний инфракрасный). Пространственное разрешение снимков в этих каналах составляет 10 м. Необходимо использовать наиболее актуальные снимки, полученные в течение вегетационного периода, когда дешифрирование растительности наиболее эффективно, т.е. для периода с мая по сентябрь. После анализа нескольких сцен, удовлетворяющих указанным критериям, для дальнейшей работы выбрана одна, зарегистрированная 30 августа 2019 г.

В качестве основного метода выявления зданий по космическим снимкам выбрана контролируемая классификация методом максимального правдоподобия. Поскольку спектральные характеристики затенённых частей зданий близки к спектральным характеристикам водных объектов, сперва необходимо выделить на снимке водные объекты и исключить их из дальнейшего анализа. Сделать это можно с помощью той же классификации методом максимального правдоподобия, а также по результатам анализа гистограммы снимка.

Следующий этап является основным с точки зрения проведения дешифрирования, т.к. от качества его выполнения зависит итоговый результат работы. Он заключается в выделении эталонов различных городских объектов, а именно: зданий, дорожного полотна, участков открытого грунта, древесной и луговой растительности. Один эталон (эталонный участок) включает серию пикселов снимка, отнесённых к одному объекту. Так, в качестве эталона зданий может выступать одно какое-либо здание, чётко выделяющееся на снимке. Эталоны должны характеризоваться максимальной внутренней гомогенностью (т.е. все пикселы эталона должны иметь максимально близкие спектральные характеристики) и максимальной внешней гетерогенностью (т.е. спектральные характеристики пикселов разных эталонов должны различаться). Процесс выделения эталонов (равно как и их набор) индивидуален для каждого города и практически неформализуем. На основе выделенных эталонов осуществляется классификация многозонального снимка, состоящего из каналов оптического диапазона (синий, зелёный, красный, ближний инфракрасный) методом максимального правдоподобия. Классификация осуществлена инструментами ПО ArcGIS (панель инструментов Image Classification), но может быть равным образом реализована и в других программных пакетах, таких, как, например, ERDAS Imagine.

Здания, выделенные по итогам контролируемой классификации, далее переведены в векторный формат и использованы для расчёта доли площади зданий по ячейкам модели COSMO с шагом сетки 1×1 км. Идентичная расчётная сетка использовалась в

[1] Электронный ресурс: https://www.hotosm.org/
[2] Электронный ресурс: https://earthexplorer.usgs.gov/

предшествующих исследованиях с данной моделью для Москвы. При необходимости может быть использована любая другая сетка.

Для оценки качества определения площади зданий по космическим снимкам использован альтернативный источник информации, а именно данные OSM (слой зданий в векторном формате). По данным OSM также определена доля площади зданий по ячейкам модели COSMO. С учётом опыта предшествующих исследований можно с уверенностью утверждать, что для большинства районов Москвы они достаточно адекватно отражают реальную картину.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчёта доли площади зданий по космическим снимкам высокого пространственного разрешения для ячеек расчётной сетки COSMO представлены в картографической форме на рис. 1. Результаты расчётов аналогичной величины по векторным данным OSM представлены на рис. 2.

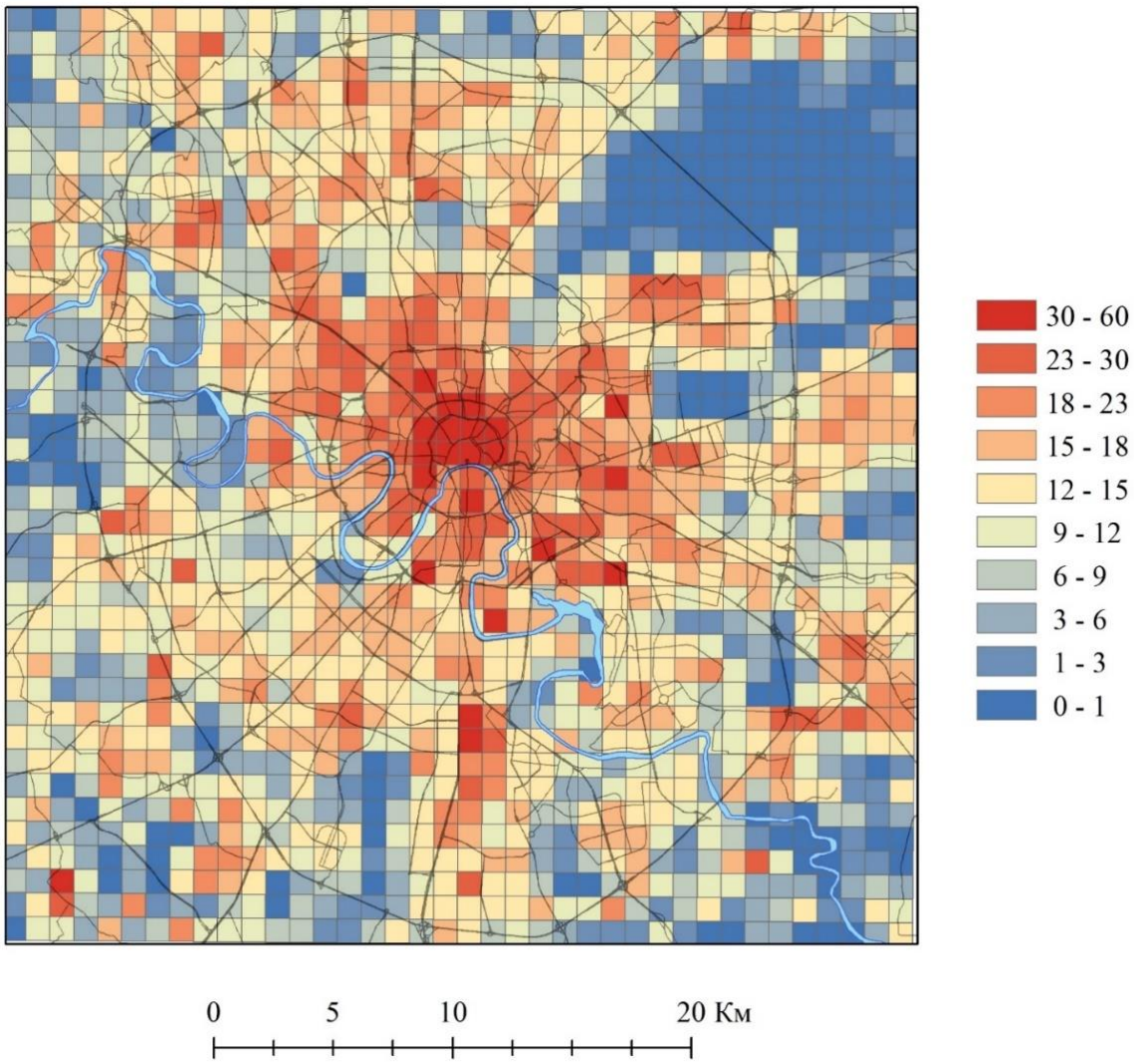


Рис. 1. Доля площади зданий (%) для ячеек расчётой сетки модели COSMO с размером 1×1 км, определённая по спутниковым снимкам Sentinel-2
Fig. 1. The fraction of the building area (%) for the 1×1 km COSMO model cells, determined from Sentinel-2 satellite images

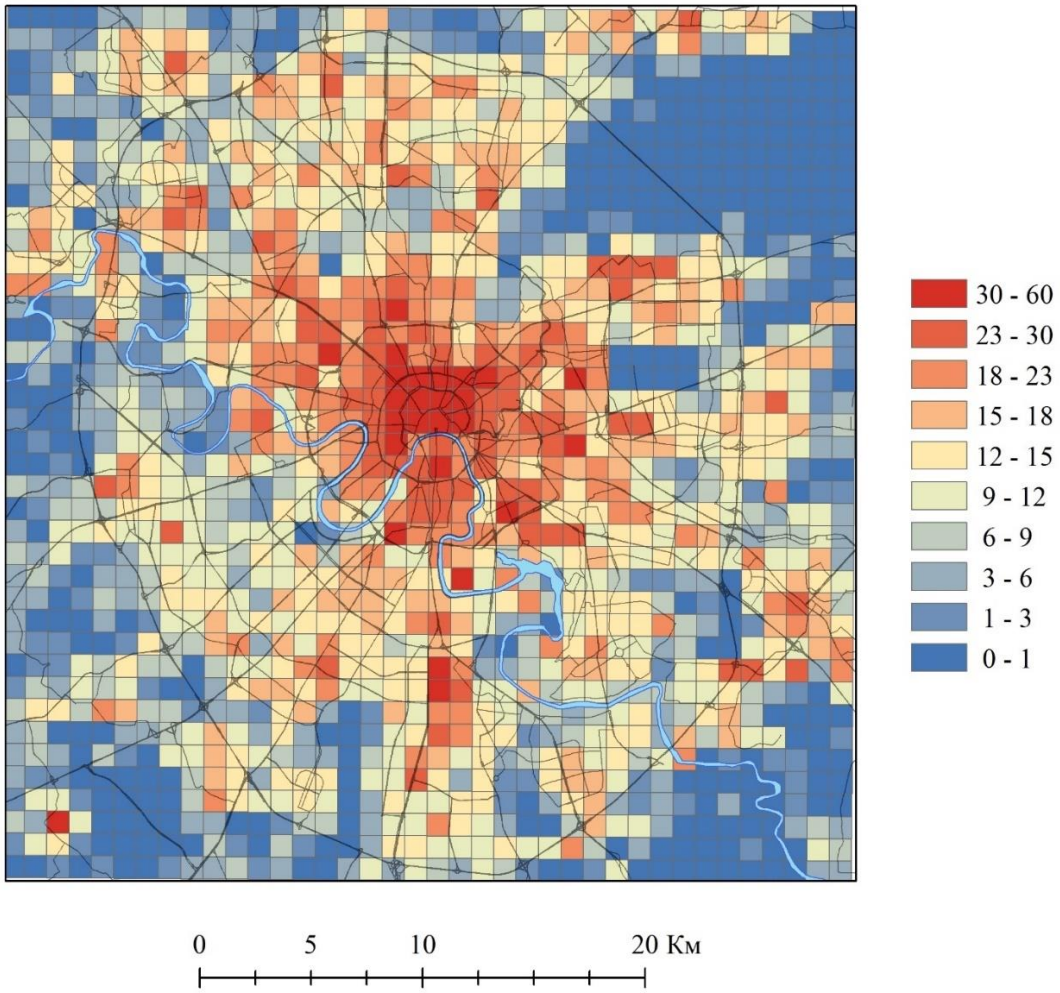


Рис. 2. Доля площади зданий (%) для ячеек расчётой сетки модели COSMO с размером 1×1 км, определённая по векорным данным OSM
Fig. 2. The fraction of the building area (%) for the 1×1 km COSMO model cells, determined from OpenStreetMap data

Пространственная дифференциация доли площади зданий, определённой по космическим и векторным данным, достаточно хорошо согласуется. Максимальные значения наблюдаются в ЦАО и составляют около 60 %. Кроме этого, встречаются отдельные участки за пределами центральной части города, в которых также наблюдается значительная доля площади зданий — от 25 до 60 %. В основном они характерны для промышленных зон, но есть несколько исключений: крупные торговые центры (например, ТЦ «Мега Белая Дача» и ТЦ «Садовод»), тепличные хозяйства (а именно, тепличное хозяйство агрокомбината «Московский» на юго-западе города). Для жилых районов характерна доля площади зданий от 6 % до 22 %. Для массивов малоэтажной застройки, расположенных в пригородах, характерна доля площади зданий порядка 0,3–2,6 %.

Для более детального исследования различий между двумя методами построена диаграмма рассеяния для сравниваемых значений доли площади зданий (рис. 3), а также карта разности значений, определённых по космическому снимку и по векторным данным (рис. 4); рассчитаны статистические характеристики сравнения — средняя и среднеквадратичная ошибки, коэффициент корреляции.

Диаграмма рассеяния показывает, что результаты применения двух методов хорошо согласуются друг с другом для ячеек сетки с долей площади зданий более 10–

15 %. Лишь для наиболее плотно застроенных ячеек с долей площади зданий порядка 30–45 % значения, полученные по спутниковым данным, преимущественно занижены на 1–5 % относительно данных OSM. Расхождения между двумя методами существенно увеличивается для слабозастроенных территорий с долей площади зданий менее 10–15 % (по данным OSM). Для таких территорий значения, полученные по спутниковым данным, могут существенно (на 10−20 %) завышать значения, полученные по данным OSM.

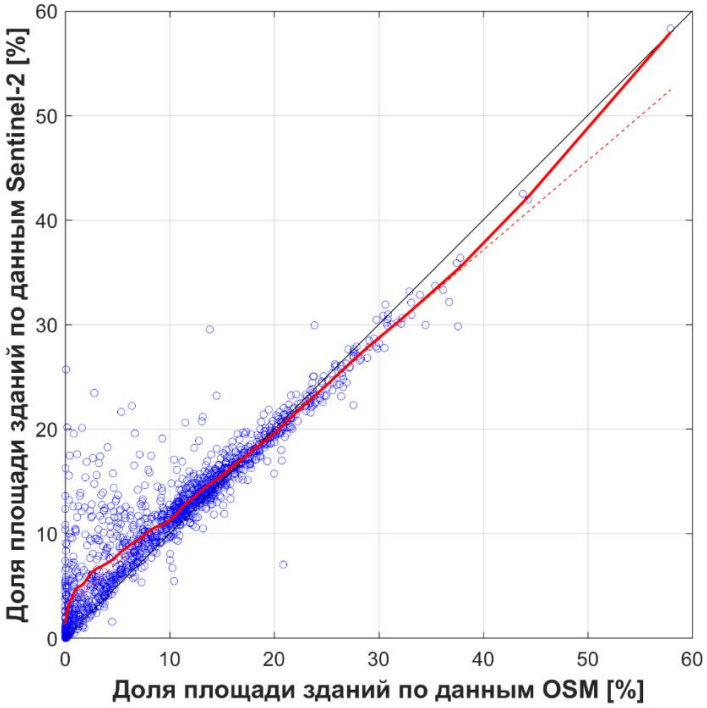


Рис. 3. Сравнение значений доли площади зданий, определённых по данным OSM и по космическому снимку. Красная сплошная линия показывает аппроксимирующую кривую, построенную методом локально-линейной регрессии с использованием 20 % данных (алгоритм LOWESS); красная пунктирная линия — линейный тренд; чёрным цветом показана линия идеального соответствия

Fig. 3. Comparison of the buildings area fraction values, determined from OSM data and satellite images. The red solid line shows the approximating curve constructed by the method of local linear regression using 20 % of the data (LOWESS algorithm), the red dashed line is the linear trend, and the black line shows the line of ideal fit

В среднем по рассматриваемой территории доля площади зданий составляет 11,4 % по данным Sentinel-2 и 9,8 % по данным OSM, т.е. среднее завышение оценки по спутниковым данным составляет 1,5 %. Среднеквадратичная ошибка составляет 3,3 %. Если рассмотреть только модельные ячейки с долей площади зданий по данным OSM > 10 %, то ошибки уменьшаются — среднее завышение составляет 0,4 %, среднеквадратичная ошибка — 1,8 %. Коэффициент корреляции между значениями, полученными по двум методам, составляет 0,92 для всей рассматриваемой территории и 0,95 для ячеек с долей площади зданий по данным OSM > 10 %.

Анализ пространственного распределения разности сравниваемых значений показал, что занижение доли площади зданий, определённой по спутниковым данным,

относительно данных OSM, характерно для центральной части города с наиболее плотной застройкой, а завышение, напротив — для территорий на окраине мегаполиса с преобладающей малоэтажной застройкой усадебного типа (рис. 4).

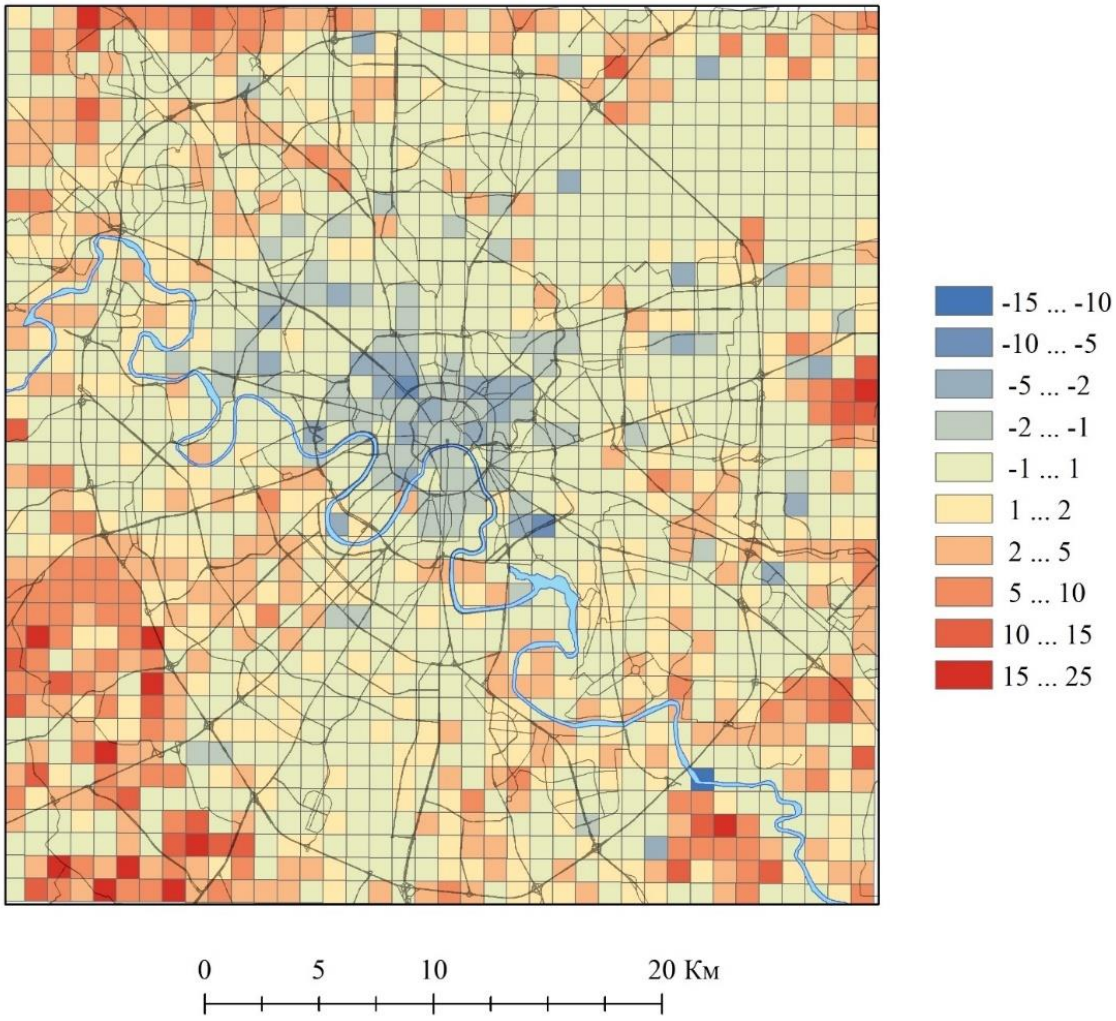


Рис. 4. Разность значений доли площади зданий, определённых по космическому снимку и по векторным данным OSM, %
Fig. 4. The difference in the buildings area fraction values determined from the satellite image and from the OSM vector data, %

Причины возникновения расхождений между двумя методами рассмотрены на примере отдельно выбранных территорий с наибольшими расхождениями. На примере территории поселка Мещёрский на западной окраине Москвы рассмотрен пример завышения площади зданий по космическим данным относительно данных OSM (рис. 5). Доля площади зданий для этой территории составляет 23,5 % по спутниковым данным и только 2,8 % по данным OSM. Причина столь существенного расхождения тривиальна и заключается в том, что значительная часть зданий — преимущественно, частных домов и коттеджей — не представлена в данных OSM, но легко определяется с помощью контролируемой классификации космического снимка. Данный пример показывает очевидное преимущество результатов дешифрирования космических снимков над анализом краудсорсиговых векторных картографических данных. Схожая ситуация имеет место и для многих других территорий, занятых малоэтажной усадебной застройкой.

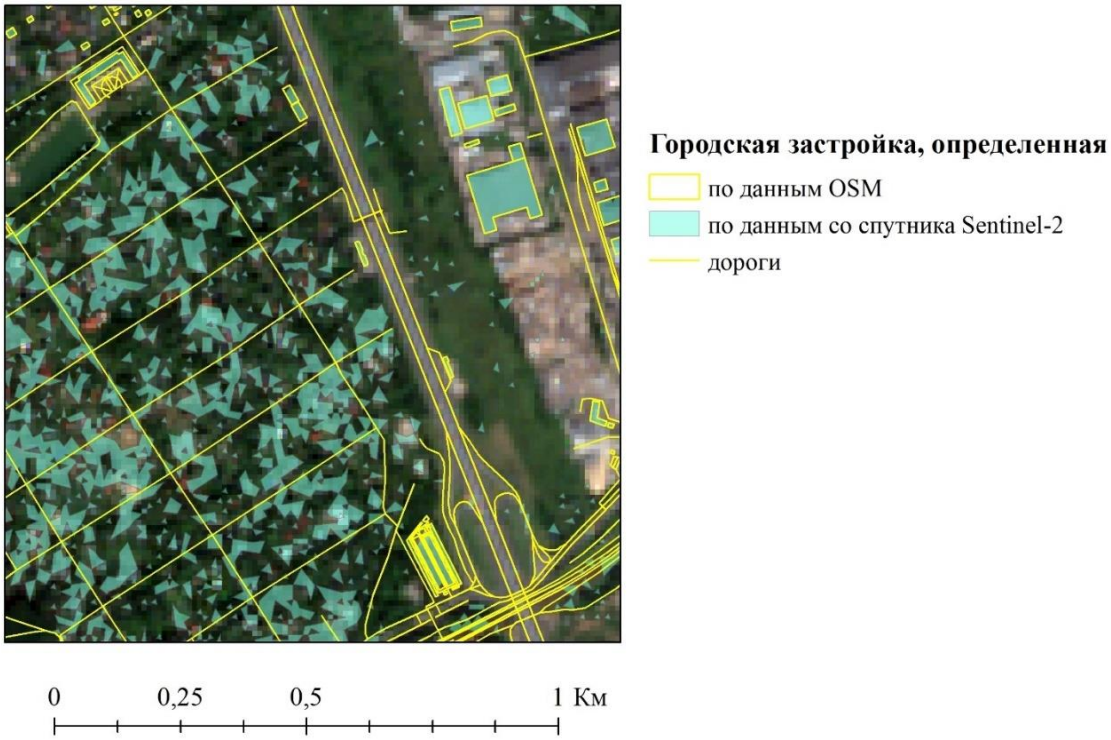


Рис. 5. Сравнение городской застройки, выделенной по космическим снимкам и представленной в базе данных OSM для территории поселка Мещёрский, Москва
Fig. 5. Comparison of urban development revealed from satellite imagery and presented in the OSM database for the Meshchiorsky settlement area, Moscow

Рис. 6. Сравнение городской застройки, выделенной по космическим снимкам и представленной в базе данных OSM для территории в районе ул. Вешних Вод, Москва
Fig. 6. Comparison of urban development revealed from satellite imagery and presented in the OSM database for the Veshniye Vody str. nearby area, Moscow

На примере территории на северо-востоке Москвы в районе улицы Вешних Вод рассмотрено занижение доли площади зданий по космическими данным относительно данных OSM (рис. 6). Доля площади зданий для этой территории составляет 5,5 % по спутниковым данным и 10,4 % по данным OSM. Причина расхождений связана с маскированием малоэтажной застройки, представленной в данных OSM, кронами деревьев. При дальнейшем развитии предложенной методики решение данной проблемы возможно за счёт подключения к анализу спутниковых снимков за зимний сезон.

ВЫВОДЫ

По результатам выполненного исследования можно сделать вывод о перспективности применения контролируемой классификации для дешифрирования городской застройки и определения занимаемой ею площади. Сравнение доли площади зданий, определённой по спутниковым снимкам, хорошо согласуется с векторными краудсорсинговыми данными OSM для территорий с высокой полнотой таких данных. Предложенный метод позволяет идентифицировать здания, не представленные в краудсорсинговой базе данных. Уже в текущем виде предложенный метод может быть использован для определения доли площади зданий для задач метеорологического моделирования как в качестве дополнения к методам анализа краудсорсинговых картографических данных, так и самостоятельно. Успешная апробация предложенного метода на примере Москвы открывает перспективы его применения и для других городов, в первую очередь тех, которые плохо освещены официальной или краудсорсинговой картографической информацией. Получаемые по спутниковым снимкам данные о городской застройке можно использовать не только для задач моделирования погоды и климата, но и для мониторинга городской среды в целом и городской застройки, в частности, в решении вопросов, связанных с организацией городского пространства. Одним из ключевых преимуществ предложенного метода является возможность его применения к архивным спутниковым снимкам за прошлые годы с целью оценки изменений городской застройки во времени.

В рамках дальнейших исследований предложенный метод может быть применён и для идентификации других ключевых элементов городского ландшафта — дорог, зелёных насаждений и т.д. Выделение таких объектов реализовано в рамках контролируемой классификации уже на текущем этапе работы, однако пока не проведена оценка надёжности их идентификации.

Перспективным направлением дальнейших исследований представляется более глубокая интеграция предложенного метода с другими методами определения параметров городской среды по спутниковым данным, в первую очередь с методами картографирования локальных климатических зон. Это направление соответствует планам реализации международного краудсорсингого проекта WUDAPT. Текущий этап реализации этого проекта направлен на картографирование локальных климатических зон по унифицированной методике, но на следующих его этапах запланирована разработка унифицированных методов определения и количественных параметров городской среды.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 17-77-20070.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Science Foundation, grant No 17-77-20070.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Варенцов М.И., Самсонов Т.Е., Кислов А.В., Константинов П.И.* Воспроизведение острова тепла Московской агломерации в рамках региональной климатической модели COSMO-CLM. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2017. № 6. С. 25–37.

2. *Грищенко М.Ю., Ермилова Ю.В.* Картографирование застройки крупнейших городов российского Заполярья по космическим снимкам разных спектральных диапазонов. Геодезия и картография, 2018. Т. 79. № 3. С. 23–34.

3. *Касимов Н.С., Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е., Хайбрахманов Т.С.* Геоинформационное ландшафтно-геохимическое картографирование городских территорий (на примере ВАО Москвы). Геоинформатика, 2013. № 1. С. 28–32.

4. *Кислов А.В., Константинов П.И.* Детализированное пространственное моделирование температуры Московского мегаполиса. Метеорология и гидрология, 2011. № 5. С. 25–32.

5. Климат Москвы в условиях глобального потепления. М.: Издательство Московского университета, 2017. 288 с.

6. Климат Москвы (особенности климата большого города). Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 323 с.

7. *Кузнецова И.Н., Брусова Н.Е., Нахаев М.И.* Городской остров тепла в Москве: определение, границы, изменчивость. Метеорология и гидрология, 2017. № 5. С. 49–61.

8. *Мягков М.С.* Экологические последствия мезоклиматических аномалий Московского мегаполиса. Экология урбанизированных территорий, 2006. № 4. С. 28–34.

9. *Самсонов Т.Е., Тригуб К.С.* Картографирование локальных климатических зон Москвы по космическим снимкам. Геодезия и картография, 2018. Т. 79. № 6. С. 20−31.

10. *Baklanov A., Grimmond C.S.B., Carlson D., Terblanche D., Tang X., Bouchet V., Lee B., Langendijk G., Kolli R.K., Hovsepyan A.* From urban meteorology, climate and environment research to integrated city services. Urban Climate, 2018. V. 23. P. 330–341.

11. *Bechtel B., Alexander P.J., Böhner J., Ching J., Conrad O.* Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2015. V. 4. P. 199–219.

12. *Brousse O., Martilli A., Foley M., Mills G., Bechtel B.* WUDAPT, an efficient land use producing data tool for mesoscale models? Integration of urban LCZ in WRF over Madrid. Urban Climate, 2016. V. 17. P. 116–134.

13. *Chen L., Ng E.* Quantitative urban climate mapping based on a geographical database: A simulation approach using Hong Kong as a case study. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011. V. 13. № 4. P. 586–594.

14. *Ching J., Aliaga D., Mills G., Masson V., See L., Neophytou M., Middel A., Baklanov A., Ren C., Ng E., Fung J., Wong M., Huang Y., Martilli A., Brousse O., Stewart I., Zhang X., Shehata A., Miao S., Wang X., Wang W., Yamagata Y., Duarte D., Li Y., Feddema J., Bechtel B., Hidalgo J., Roustan Y., Kim Y., Simon H., Kropp T., Bruse M., Lindberg F., Grimmond S., Demuzure M., Chen F., Li C., Gonzales-Cruz J., Bornstein B., He Q., Tzu-Ping, Hanna A., Erell E., Tapper N., Mall R.K., Niyogi D.* Pathway using WUDAPT's Digital Synthetic City tool towards generating urban canopy parameters for multi-scale urban atmospheric modeling. Urban Climate, 2019. V. 28. P. 100459.

15. *Ching J., Mills G., Bechtel B., See L., Feddema J., Wang X., Ren C., Brousse O., Martilli A., Neophytou M., Mouzourides P., Stewart I., Hanna A., Ng E., Foley M., Alexander P., Aliaga D., Niyogi D., Shreevastava A., Bhalachandran P., Masson V., Hidalgo J., Fung J., Andrade M., Baklanov A., Dai W., Milcinski G., Demuzere M., Brunsell N., Pesaresi M., Miao S., Mu Q., Chen F., Theeuwes N.* WUDAPT: An urban weather, climate, and environmental modeling infrastructure for the anthropocene. Bulletin of the American Meteorological Society, 2018. V. 99. No 9. P. 1907–1924.

16. *Gál T., Unger J.* A new software tool for SVF calculations using building and tree-crown databases. Urban Climate, 2014. V. 10. No 3. P. 594–606.
17. *Garuma G.F.* Review of urban surface parameterizations for numerical climate models. Urban Climate, 2018. V. 24. P. 830–851.
18. *Hammerberg K., Brousse O., Martilli A., Mahdavi A.* Implications of employing detailed urban canopy parameters for mesoscale climate modelling: a comparison between WUDAPT and GIS databases over Vienna, Austria. International Journal of Climatology, 2018. V. 38. P. e1241–e1257.
19. *Landsberg H.E.* The urban climate. International Geophysics Series. V. 28. New York, London: Academic Press, 1981. 275 p.
20. *Lindberg F.* Modelling the urban climate using a local governmental geo-database. Meteorological Applications, 2007. V. 273. P. 263–273.
21. *Lokoshchenko M.A.* Urban 'heat island' in Moscow. Urban Climate, 2014. V. 10. P. 550–562.
22. *Lokoshchenko M.A.* Urban heat island and urban dry island in Moscow and their centennial changes. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2017. V. 56. No 10. P. 2729–2745.
23. *Lu D., Hetrick S., Moran E.* Land cover classification in a complex urban-rural landscape with QuickBird imagery. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2010. V. 76. No 10. P. 1159–1168.
24. *Masson V., Heldens W., Bocher E., Bonhomme M., Bucher B., Burmeister C., Munck C. de, Esch T., Hidalgo J., Kanani-Sühring F., Kwok Y.T., Lemonsu A., Lévy J.P., Maronga B., Pavlik D., Petit G., See L., Schoetter R., Tornay N., Votsis A., Zeidler J.* City-descriptive input data for urban climate models: Model requirements, data sources and challenges. Urban Climate, 2020. V. 31. P. 100536.
25. *Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A.* Urban climates. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 509 p.
26. *Orlanski L.* A rational subdivision of scale for atmospheric processes. Bulletin of the American Meteorological Society, 1975. V. 56. P. 527–530.
27. *Peeters A., Etzion Y.* Automated recognition of urban objects for morphological urban analysis. Computers, Environment and Urban Systems, 2012. V. 36. No 6. P. 573–582.
28. *Samsonov T.E., Konstantinov P.I., Varentsov M.I.* Object-oriented approach to urban canyon analysis and its applications in meteorological modeling. Urban Climate, 2015. V. 13. P. 122–139.
29. *Varentsov M., Wouters H., Platonov V., Konstantinov P.* Megacity-induced mesoclimatic effects in the lower atmosphere: A modeling study for multiple summers over Moscow, Russia. Atmosphere, 2018. V. 9. No 2. P. 50.
30. *Varentsov M.I., Grishchenko M.Yu., Wouters H.* Simultaneous assessment of the summer urban heat island in Moscow megacity based on in situ observations, thermal satellite images and mesoscale modeling. Geography, Environment, Sustainability, 2019. V. 12. No 4. P. 74–95.

REFERENCES

1. *Baklanov A., Grimmond C.S.B., Carlson D., Terblanche D., Tang X., Bouchet V., Lee B., Langendijk G., Kolli R.K., Hovsepyan A.* From urban meteorology, climate and environment research to integrated city services. Urban Climate, 2018. V. 23. P. 330–341.
2. *Bechtel B., Alexander P.J., Böhner J., Ching J., Conrad O.* Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2015. V. 4. P. 199–219.
3. *Brousse O., Martilli A., Foley M., Mills G., Bechtel B.* WUDAPT, an efficient land use producing data tool for mesoscale models? Integration of urban LCZ in WRF over Madrid. Urban Climate, 2016. V. 17. P. 116–134.

4. *Chen L., Ng E.* Quantitative urban climate mapping based on a geographical database: A simulation approach using Hong Kong as a case study. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011. V. 13. No 4. P. 586–594.
5. *Ching J., Aliaga D., Mills G., Masson V., See L., Neophytou M., Middel A., Baklanov A., Ren C., Ng E., Fung J., Wong M., Huang Y., Martilli A., Brousse O., Stewart I., Zhang X., Shehata A., Miao S., Wang X., Wang W., Yamagata Y., Duarte D., Li Y., Feddema J., Bechtel B., Hidalgo J., Roustan Y., Kim Y., Simon H., Kropp T., Bruse M., Lindberg F., Grimmond S., Demuzure M., Chen F., Li C., Gonzales-Cruz J., Bornstein B., He Q., Tzu-Ping, Hanna A., Erell E., Tapper N., Mall R.K., Niyogi D.* Pathway using WUDAPT's Digital Synthetic City tool towards generating urban canopy parameters for multi-scale urban atmospheric modeling. Urban Climate, 2019. V. 28. P. 100459.
6. *Ching J., Mills G., Bechtel B., See L., Feddema J., Wang X., Ren C., Brousse O., Martilli A., Neophytou M., Mouzourides P., Stewart I., Hanna A., Ng E., Foley M., Alexander P., Aliaga D., Niyogi D., Shreevastava A., Bhalachandran P., Masson V., Hidalgo J., Fung J., Andrade M., Baklanov A., Dai W., Milcinski G., Demuzere M., Brunsell N., Pesaresi M., Miao S., Mu Q., Chen F., Theeuwes N.* WUDAPT: An urban weather, climate, and environmental modeling infrastructure for the anthropocene. Bulletin of the American Meteorological Society, 2018. V. 99. No 9. P. 1907–1924.
7. Climate of Moscow (Climate features of the big city). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1969. 323 p. (in Russian).
8. Climate of Moscow under global warming. Moscow: Moscow University Press, 2017. 288 p. (in Russian).
9. *Gál T., Unger J.* A new software tool for SVF calculations using building and tree-crown databases. Urban Climate, 2014. V. 10. No 3. P. 594–606.
10. *Garuma G.F.* Review of urban surface parameterizations for numerical climate models. Urban Climate, 2018. V. 24. P. 830–851.
11. *Grishchenko M.Y., Ermilova Y.V.* Mapping the development of the largest cities of the Russian Arctic by satellite images of different spectral ranges. Geodesy and Cartography, 2018. V. 79. No 3. P. 23–34 (in Russian).
12. *Hammerberg K., Brousse O., Martilli A., Mahdavi A.* Implications of employing detailed urban canopy parameters for mesoscale climate modelling: a comparison between WUDAPT and GIS databases over Vienna, Austria. International Journal of Climatology, 2018. V. 38. P. e1241–e1257.
13. *Kasimov N.S., Nikiforova E.M., Kosheleva N.E., Khaibrakhmanov T.S.* Geoinformation landscape-geochemical mapping of urban areas (by the example of EAO of Moscow). Geoinformatika, 2013. No 1. P. 28–32 (in Russian).
14. *Kislov A.V., Konstantinov P.I.* Detailed spatial modeling of temperature in Moscow. Russian Meteorology and Hydrology, 2011. V. 36. No 5. P. 25–32 (in Russian).
15. *Kuznetsova I.N., Brusova N.E., Nakhaev M.I.* Moscow urban heat island: Detection, boundaries, and variability. Russian Meteorology and Hydrology, 2017. V. 42. No 5. P. 305–313 (in Russian).
16. *Landsberg H.E.* The urban climate. International Geophysics Series. V. 28. New York, London: Academic Press, 1981. 275 p.
17. *Lindberg F.* Modelling the urban climate using a local governmental geo-database. Meteorological Applications, 2007. V. 273. P. 263–273.
18. *Lokoshchenko M.A.* Urban 'heat island' in Moscow. Urban Climate, 2014. V. 10. P. 550–562.
19. *Lokoshchenko M.A.* Urban heat island and urban dry island in Moscow and their centennial changes. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2017. V. 56. No 10. P. 2729–2745.

20. *Lu D., Hetrick S., Moran E.* Land cover cassification in a complex urban-rural landscape with QuickBird imagery. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2010. V. 76. No 10. P. 1159–1168.
21. *Masson V., Heldens W., Bocher E., Bonhomme M., Bucher B., Burmeister C., Munck C. de, Esch T., Hidalgo J., Kanani-Sühring F., Kwok Y.T., Lemonsu A., Lévy J.P., Maronga B., Pavlik D., Petit G., See L., Schoetter R., Tornay N., Votsis A., Zeidler J.* City-descriptive input data for urban climate models: Model requirements, data sources and challenges. Urban Climate, 2020. V. 31. P. 100536.
22. *Myagkov M.S.* Ecological consequences of mesoclimatic anomalies of the Moscow megacity. Ecology of Urban Areas, 2006. No 1. P. 49−61 (in Russian).
23. *Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A.* Urban climates. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 509 p.
24. *Orlanski L.* A rational subdivision of scale for atmospheric processes. Bulletin of the American Meteorological Society, 1975. V. 56. P. 527–530.
25. *Peeters A., Etzion Y.* Automated recognition of urban objects for morphological urban analysis. Computers, Environment and Urban Systems, 2012. V. 36. No 6. P. 573–582.
26. *Samsonov T.E., Konstantinov P.I., Varentsov M.I.* Object-oriented approach to urban canyon analysis and its applications in meteorological modeling. Urban Climate, 2015. V. 13. P. 122–139.
27. *Samsonov T.E., Trigub K.S.* Mapping of local climate zones of Moscow city. Geodesy and Cartography, 2018. V. 79. No 6. P. 20−31 (in Russian).
28. *Varentsov M.I., Samsonov T.E., Kislov A.V., Konstantinov P.I.* Simulations of Moscow agglomeration heat island within framework of regional climate model COSMO-CLM. Herald of Moscow University. Series 5. Geography, 2017. No 6. P. 25–37 (in Russian).
29. *Varentsov M., Wouters H., Platonov V., Konstantinov P.* Megacity-induced mesoclimatic effects in the lower atmosphere: A modeling study for multiple summers over Moscow, Russia. Atmosphere, 2018. V. 9. No 2. P. 50.
30. *Varentsov M.I., Grishchenko M.Y., Wouters H.* Simultaneous assessment of the summer urban heat island in Moscow megacity based on in situ observations, thermal satellite images and mesoscale modeling. Geography, Environment, Sustainability, 2019. V. 12. No 4. P. 74−95.

DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-313-321

Aybek M. Arifjanov[1], Shamshodbek B. Akmalov[2], Tursunoy U. Apakhodjaeva[3], Dilmira S. Tojikhodjaeva[4]

COMPARISON OF PIXEL TO PIXEL AND OBJECT BASED IMAGE ANALYSIS WITH USING WORLDVIEW-2 SATELLITE IMAGES OF YANGIOBOD VILLAGE OF SYRDARYA PROVINCE

ABSTRACT

Currently, more than 300 satellites have been launched into space and providing us with information about the Earth and processes which happens in there. Those information is very useful in all branches. These satellites started to modify and modernize year by year. Especially after 2000, satellites of very high resolution were launched into space. These satellites are sending information with very high resolution. To improve the speed and accuracy of the analysis of these images, scientists have developed a number of methods and programs. As a result, users often find face to difficulties with knowing which method or program is most effective. In this article, analyzed many researches and scientific studies and analyzed WorldView-2 (WV2) images of the Syrdarya Province based on field experiments and outlined the advantages and disadvantages of the method and tool. WV2 images are very important and provide much relevant data for all image analysis. VHR of these images can increase the quality and possibilities of all analysis. But usage of these images globally has not developed because of their costs. Square of satellite image capturing is very little for global analysis. to do global analysis we need 100 s of this image. That is why scientists use this data more often for correlation or creating general methods. That is why it has not been used for regional and global analysis. In our research, we used GEOBIA's eCognition software. The accuracy of this program is 95 %. In arid regions like Uzbekistan, we recommend optimal software, analyse steps and data.

KEYWORDS: remote sensing, Syrdarya, sattelite, analyse, eCognition

INTRODUCTION

According to the literatures Remote Sensing (RS) data must be analyzed by a RS analysis program in order to convert it to digital format and obtain the necessary information. RS analysis program analyses use mainly two methods: Pixel to pixel analysis (PPA) and Geographic Object Based Image Analysis (GEOBIA). With the creation of very high resolution (VHR) images, the GEOBIA analysis method of RS analysis program is becoming popular. We will review the advantages of this method with its systematic construction and analysis categories in contrast with PPA in this chapter.

Until 2000, with the launching of VHR commercial satellites, PPA was mainly an analysis method in scientific research. Images of middle and low resolution also help to develop

[1] Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers, Kari Niyazi str., 39, 100000, Tashkent, Uzbekistan; *e-mail:* **obi-life@mail.ru**
[2] Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers, Kari Niyazi str., 39, 100000, Tashkent, Uzbekistan; *e-mail:* **shamshodbekjon@mail.ru**
[3] Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers, Kari Niyazi str., 39, 100000, Tashkent, Uzbekistan; *e-mail:* **luqmonsamiev@mail.ru**
[4] Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers, Kari Niyazi str., 39, 100000, Tashkent, Uzbekistan; *e-mail:* **zulxummorergasheva@mail.ru**

this method. Because in these images each pixel contains an object or collection of objects (e.g. MODIS image spectral resolution is 250 m, i.e. 1 pixel covers 250 m^2). But spatial resolution of VHR images are very high (WorldView-2 (WV-2) multi 2.5 m, pan 0.5 m) and the group of many pixels gives us one object information and analyzing it by method based on pixels wastes more time and has errors. Scientists have come to the idea "why can we not analyse VHR images by objects?" [*Blaschke et al.*, 2014]. Thus, they started to use GEOBIA for VHR images analysis. This new method shows its advantage in the analysis of VHR images and over time it has become an important analysis method and developed a number of software. And it had been started to be used for high resolution and middle resolution image analysis. Many scientists did analytical research to compare these two methods [*Drăguţ et al.*, 2010].

Fig. 1 provides information about the condition of analysis of these methods.

In accordance with the scientists' conclusion, GEOBIA has big advantages for VHR images analysis [*Blaschke*, 2010; *Drăguţ et al.*, 2010].

Because of pixel heterogeneity, mixed pixels, spectral similarity and object pattern variability of images, the traditional PPA method has errors. GEOBIA found the solution for this problem, with GEOBIA it is possible to analyze according to pixels properties *[Peña-Barragán et al.*, 2011].

The first "Visual image" in fig. 1 represents visual information of the object. The visualization was clearly demonstrated in the boundaries of the object. We did segmentation "Chess Board Segmentation" in the second image, "Image in pixel objects". Now the visualization of the object disappeared and it is divided into a thousand of pixels. The boundaries of the object are uncertain and the visualization of image is poor. But now this image has partly visual and full pixel information. When we did "Multi Resolution Segmentation" of this image in the third figure, the visual information of the object restored. The pixel information is not separated now, it is formed into a pixel group which is specific to one particular object. As the result we have some homogeneous pixel groups of the object. Moreover, our segment objects acquired geometric textural and many other information like that (for example: geometric information — roads are lines, buildings are squared form, crop fields are in round form).

It should be noted that in eCognition Program it is possible to analyze both objects with images and pixels from top-view photos.

With GEOBIA it is possible to analyze images not only by their pixel features, there are also a number of properties such as texture or geometric properties which one can use for analysis [*Navulur*, 2006; *Platt*, 2014]. According to Blaschke's conclusion, the GEOBIA method has the following advantages: it is fast, it is accurate, it is possible to analyze objects according to the different properties of these objects, it is possible to analyze images without changing the coordinates and it is possible to export the analysed data to GIS. Because of these advantages it becomes an obligatory utilizable method in RS analysis [*Blaschke et al.*, 2014].

Because, together with pixel features, texture and geometric features, VHR images are very important. In fig. 1 one may note the geometric peculiarities of the construction (straight lines, the smallest object, etc.). These features help to point out the lines of the objects and to classify them.

The other advantage of GEOBIA is the possibility to classify different objects into their own classes, in order to classify it into one class by their similarity at the end of the research [*Leonhard, Ferrè*, 2015]. And it is a cyclic analysing method helping pre-analyse the results.

Xiaohe compared pixel-based analysis and object-based analysis on the basis of extended scientific research and noted that using object-based image analysis is more effective for high-resolution images. He emphasized, "The object-oriented classification is the main method of high spatial resolute remote sensing" [*Xiaohe et al.*, 2014]. So, the number of GEOBIA analysed low and middle resolution images are very low.

Due to the above advantages, GEOBIA was preferred to use in our analysis.

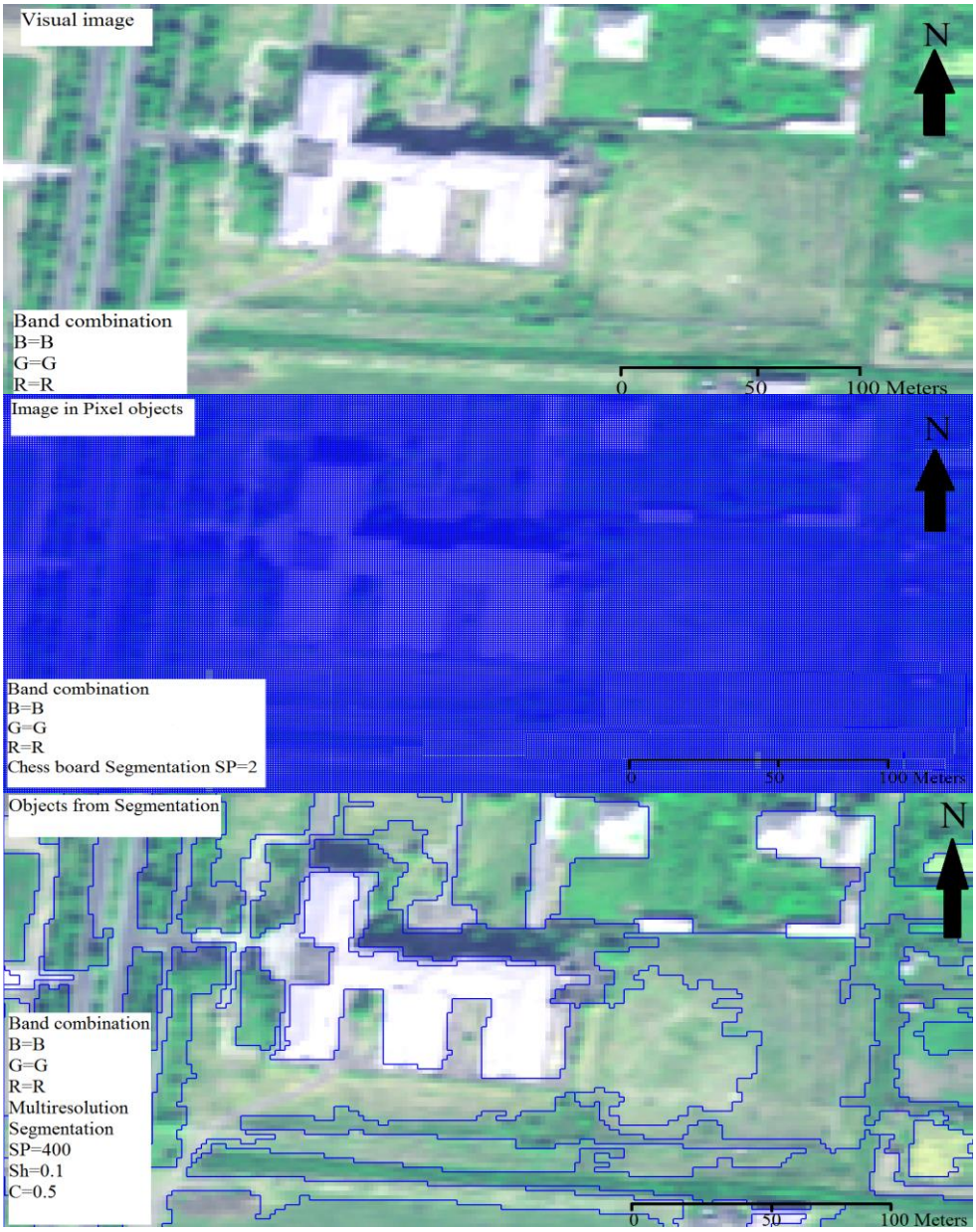


Fig. 1. Difference between pixels and object (WV2 image of Yangiobod college, 2012)

In the analysis object oriented image classification was used. This method of classification was successfully applied to high resolution remote sensing images by scientists [*Zhou et al.*, 2012]. Using spatial and spectral information of the images, and the analysis these images by objects (not by pixels) are the main advantages of this method. An object based hierarchical classification was created by using this method. In this hierarchy an algorithm of classification has been found from water to urban area. This classification was conducted using eCognition 9 software (http://www.ecognition.com). This commercial software was developed by Definiens (www.definiens.com) in Munich, Germany [*Navulur*, 2006]. Advantages of this software in comparison with other software in GEOBIA analysis, have been proven by many scientists. In their scientific research, they compared Erdas Imagine, ENVI and eCognition OBIA analysis programs according to their capabilities and from these programs eCognition software was recommended as a program with minimum errors and high accuracy [*Jiaa et al.*, 2013; *Xiaohe et al.*, 2014]. It is also confirmed in Ozdemir's doctoral work. In his work he

compared eCognition and Erdas Imagine programs, and gave facts about the advantages and disadvantages of this software, as a result of his scientific work he had decided to use eCognition in his analysis [*Özdemir,* 2013]. The advantage of using this program is an opportunity to apply over thousand properties for analysis. These properties are textural, geometric, areal, etc.

According to Gianinetto 50 % of RS GEOBIA analysis in the scientific research has been carried out using the eCognition software. This value represents a big number of scientific work within widely used programs [*Gianinetto et al.,* 2014]. Object based image classification involves three steps: 1) determination of appropriate segmentation parameters; 2) feature selection for the classification based on objects; 3) creation of classification rule sets or the application of a classification algorithm [*Zhou et al.,* 2012]. Those advantages made us use GEOBIA in our analysis.

MATERIALS AND METHODS OF RESEARCHES

All GEOBIA software and eCognition have two steps for analysing: segmentation and classification.

Segmentation

Segmentation is one of the most important stages in GEOBIA [*Blaschke,* 2010]. Segmentation is the creation of homogeneous objects based on pixel properties or other spatial and spectral criteria [*Chen et al.,* 2012]. This process is carried out by one of the following two ways in eCognition: a) top-down method — cutting big objects into smaller objects; b) bottom-up method is a contrary strategy to the previous method which is merging small objects to get a bigger object [*Dao, Liou,* 2015].

Top-down segmentation includes the following algorithm (User guide eCognition, 2014):

a) Chessboard Segmentation is the simplest algorithm based on dividing the image into mesh squares. The size of produced squares will be opted by the user. The disadvantage of this algorithm is that here the attention is focused on the equality of square sizes instead of the homogeneity of the object. The advantage is the ability of pixel segmentation of the object.

As it is seen in fig. 2, the object is divided into equal parts in between the white and black objects, but absolute white and black objects are not differentiated. To create these objects of Segment we used “Chess board Segmentation” algorithm and chose “Object size=2”.

b) Quadtree-Based Segmentation is a function similar to cheeseboard segmentation. But in this segmentation the divided square might be divided again in accordance with different colour. With the change of the scale parameter, the quantity of squares will be managed. The difference of it is in the colour composition. If the large square is green, it will be inserted into big cube. If the image includes numbers of objects of various colours in one point, they will be drawn a segment of the object with several cubes.

In fig. 3 one can see that how the big homogeneous part of the image is divided into big segments, and dense non-homogeneous objects are divided into small and micro segments. This analysis program is mostly used in VHR images, because sometimes in these images the huge homogeneous area and gathered tiny non-homogeneous objects might be seen, e.g., urban area in the middle of wide fields [*Navulur,* 2006].

c) Contrast Split Segmentation is similar to the multi-threshold approach. The contrast split the scene into dark and bright image objects based on a threshold value that maximizes the contrast between them. The algorithm evaluates the optimal threshold separately for each image object in the domain. Initially, it executes a chessboard segmentation of variable scale and then performs the split on each square, in case the pixel level is selected in the domain. Several basic parameters might be selected, the primary ones being the layer of interest and the classes you want to assign to dark and bright objects. Optimal thresholds for splitting and the contrast can be stored in scene variables. Firstly, the image was segmented into squares, and then were divided into separate non-homogeneous zones which are not related to homogeneous objects.

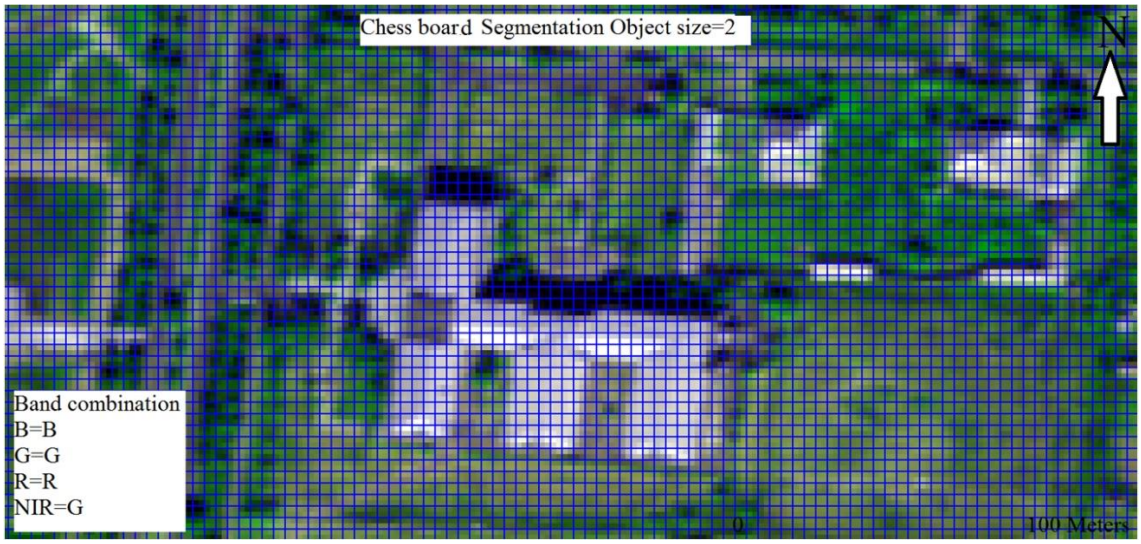


Fig. 2. Result of Chessboard Segmentation (WV2 image of Yangiobod college, 2012)

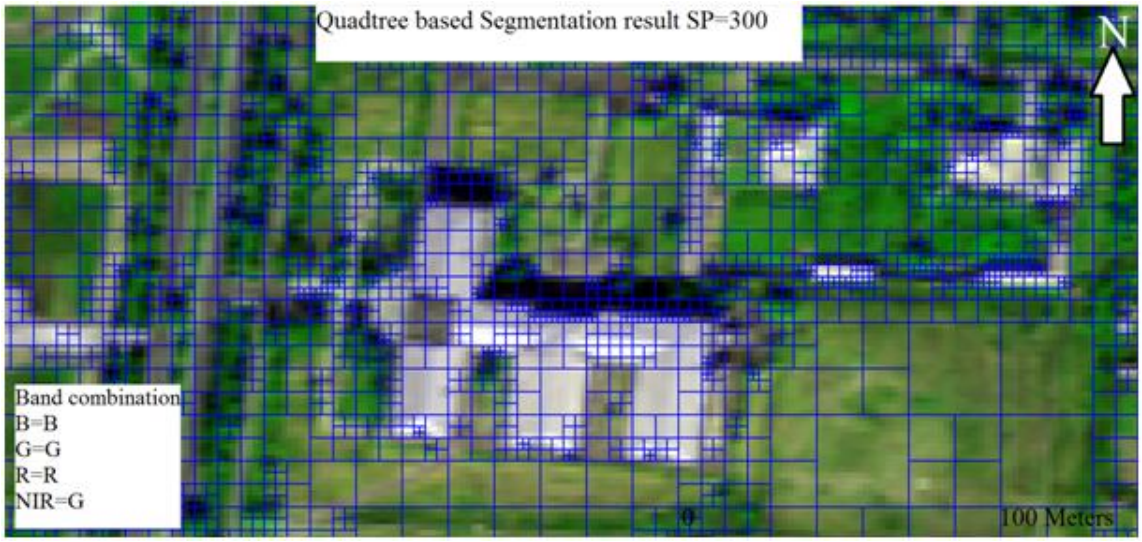


Fig. 3. Result of Quadtree-Based Segmentation (WV-2 image of Yangiobod college, 2012)

Bottom-up Segmentation algorithms are the following [*Dao, Liou,* 2015]:

a) Multi-Threshold Segmentation and Auto Thresholds algorithms split the image object domain and classify the resulting image objects based on a defined pixel value threshold. This threshold can be user-defined or can be auto-adaptive while used in combination with the Automatic Threshold algorithm. The threshold can be determined for an entire scene or for individual image objects; this determines whether it is stored in a scene variable or an object variable, adding the selected set of pixels in to two subsets so that heterogeneity is increased to a maximum. The algorithm uses a combination of histogram-based methods and the homogeneous measurement of multi-resolution segmentation to calculate a threshold adding the selected set of pixels into two subsets.

b) Spectral Difference Segmentation allows merging neighboring image objects if the difference between their layer mean intensities is below the value given by the maximum spectral difference. It is designed to refine existing segmentation results, by merging spectrally

similar image objects produced by previous segmentations and therefore it is bottom-up segmentation.

c) Multiresolution Segmentation consecutively merges pixels or existing image objects. Essentially, the procedure identifies single image objects of one pixel in size and merges them with their neighbors, based on relative homogeneity criteria. This homogeneity criterion is a combination of spectral and shape criteria.

We can modify this calculation by modifying the scale parameter. Higher values for the scale parameter result in larger image objects, smaller values in smaller ones.

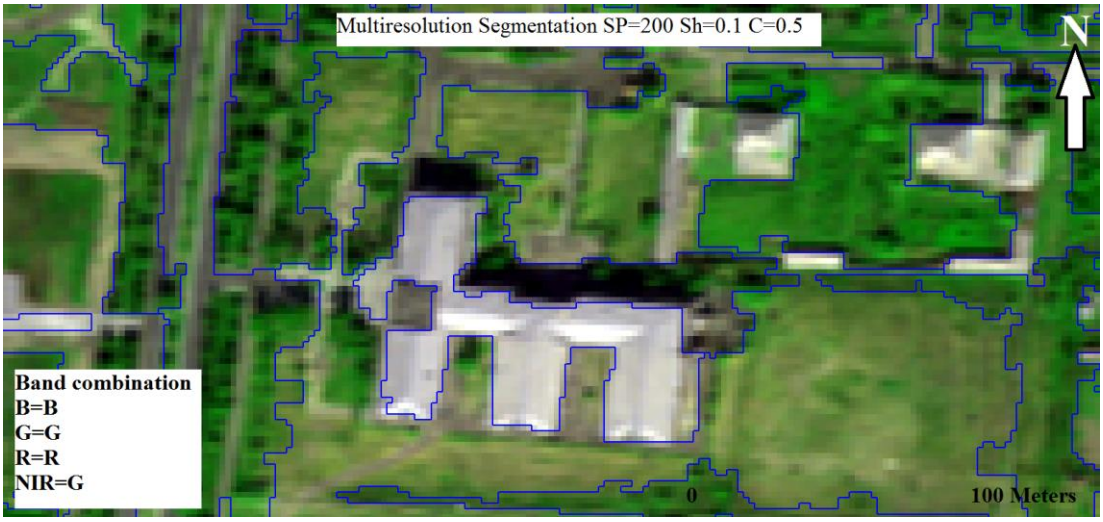


Fig. 4. Results of Multiresolution Segmentation (WV2 image of Yangiobod college, 2012)

As it is seen from fig. 4, absolute black and white objects are segmented into separate objects, by this the homogeneity of the segmentation procedure is provided. In accordance with homogeneity in image, objects might have various shapes.

In segmentation the heterogeneity criterion is controlled by the user. It is provided with changing number's value by four parameters and with visual observation it is possible to get homogeneous images of object segments from any images with different resolutions [*Verònè-Wojtaszek, Ronczyk*, 2012]. Algorithms of this eCognition software create image segments according to the following four criteria [*Navulur*, 2006]:

- scale — provides heterogeneity of the pixel;
- colour — provides homogeneity between shape and segments;
- smoothness — provides smoothness of the border of a segment;
- compactness — provides compactness of segment borders.

Regardless which type of Segmentation algorithms is used, it is obligatory to provide high homogeneity, to make it possible to change criteria of segmentation and controlling process by user. Selection of the appropriate segmentation process provides the accuracy of the results. Many scientists recommended multi resolution segmentation algorithms for scientific analysis and they used the same segmentation algorithms in their work and got high accuracy results [*Blaschke*, 2010; *Verònè-Wojtaszek M., Ronczyk*, 2012; *Zhou et al.*, 2012; *Kokje, Gao*, 2013].

As it is known from the reviews above, the multiresolution segmentation algorithm provides high homogeneity in analysis. Furthermore, the user will control the results, the accuracy and direction of the segmentation categories. And we have chosen this segmentation parameter to enable the user's control and the creation of segments in accordance with homogeneity [in the same works]. The image layers of the research area are in different scales, e.g. layer WV2 PAN is 0.5 m, and MS bands are 2.5 m. Besides, the image includes objects of

various shapes and sizes. Because of these limitations the more automated Top-down segmentation algorithm distorts the result. But they might be useful to segment the image at the beginning into pixels and then gather them into one object. Segmentation points out the details that did not receive attention. We get homogeneous objects in all our analyses by changing the segment parameters.

Classification

In eCognition the classification of the algorithm is divided into two groups: Basic Classification Algorithms and Advanced Classification Algorithms. Objects of Basic Classification Algorithms images are divided into various classes in accordance with their features; Advanced Classification Algorithms are intended for the specific assignment of classification and to identify the connections between objects. And we used Basic Classification Algorithms in our classification. These groups content of algorithms: assign class, classification and hierarchical classification. The simplest algorithm among them is assign class algorithm which gives an opportunity to create numbers of other class algorithms.

According to the direction the classification divides into Supervised and Unsupervised classifications. We have chosen supervised classification for our analyses, because unsupervised classification is realized automatically on the basis of given definite algorithm. Supervised algorithm allows controlling the results of each degree, so the accuracy of the results depends on the user's attention. The advantage of this classification is that all the classes are chosen by the user. The process is carried out under the terms and conditions entered by the user. The accuracy of the analysis depends on the knowledge of users about classified objects and according to the quality of knowledge of the class objects analysis accuracy varies. As we have images, GPS and GIS maps of the classified area, we can achieve quite good results by using supervised classification. In addition, numerous scientific articles have been written about the benefits of this method over the unsupervised method for HR image analysis. With an increase of pixel resolution of the images, unsupervised classification leads to a lot of mistakes. Unsupervised classification takes much time in the analysis process. The accuracy of the results ought to be reanalyzed and checked [*Gyuris*, 2010; *Nath, Deb*, 2010].

For classification, we have used the "Rule-based Data Classification" method. This method is the most used method in VHR images classification with GEOBIA analysis. The advantages of this method are: the process providing the preliminary created algorithmic stages in a systematic way, step by step and controlling analysis accuracy is available after each process. In some other classifications it is impossible to check results until the end of analysis; and if the result accuracy is unsatisfactory, it is necessary to reanalyze all the data from the beginning on. And this takes much time. Another advantage of this method is the ability to perform this method as well automated as semi-automated. It is possible with the creation of algorithmic stages in GIS or other Geo analysis programs; thus we will create a rule set for analysis and make it semi-automated [*Zhou et al.*, 2012]. This classification has more accurate results in contrast with other methods [*Khin et al.*, 2016]. One more advantage of this method is the opportunity to apply all features step by step [*Giannini, Parente*, 2014−2015].

In this classification method, the creation of analysis algorithms is provided step-by-step. And it helps to do this analysis easy. At each analysis step, the number of objects decreases. At the end of the analysis, a difficult, non-classified object will be formed and we can add this object into one unclassified area. At the end of classification, there will be formed one class of objects easing our analysis. But one must keep in mind one point while using this method: the accuracy of the final class depends on the accuracy of the first class. Therefore, at the beginning of the classification, great attention should be given to image segmentation and in the end of this segmentation objects must be clearly separated. Three of the rules will be created by the user.

In accordance with method analysis "Rule set based classification" is the most used method, used in much scientific work with Maximum Likelihood algorithms. With the algorithm

of Assign Class, we have set the system of rules. The Assign Class algorithm is most simple among the algorithms of classification. It uses a condition to determine whether an image object belongs to a class or not.

RESULTS OF RESEARCHES AND CONCLUSIONS

From our research, it is seen that modern object-based image analyze method is a highly efficient method for analyzing high-resolution satellite images. The reason is that high-resolution satellite sensors captures images of millions of pixels per object. The pixel-based method is time-consuming and makes some errors during the getting information of objects with using VHR images. Therefore, combining pixels into objects and analyzing images based on objects gives us many other properties of them and enhances the capabilities of analysis.

In this research, used an eCognition Developer program and highlighted the possibilities of an object-based image analyses method in analysis of Worldview-2 satellite image of Yangiabad village of Syrdarya region. According to the analyze results, the accurate tools are the Rule set based classification tool for classification, and for segmentation Multiresolution Segmentation is the.

In addition, in the analyzes gotten resulting parameters of shape, compactness, and scale for segmentation and classification of high-resolution images.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Erasmus Mundus EACEA, Lille 1 University and TIIAME.

REFERENCES

1. *Blaschke T.* Object based image analysis for remote sensing. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010. V. 65. No 1. P. 2–16.

2. *Blaschke T., Hay G. J., Kelly M., Lang S., Hofmann P., Addink E., Feitosa R.Q., van der Meer F., van der Werff H., van Coillie F., Tiede D.* Geographic object-based image analysis — towards a new paradigm. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014. V. 87. No 1. P. 180–191. DOI: 10.1016/j.isprsjprs. 2013.09.014.

3. *Chen Z., Ning X., Zhang J.* Urban land cover classification based on WorldView-2 image data. 2012 International Symposium on Geomatics for Integrated Water Resources Management (GIWRM), Lanzhou, Gansu, China. IEEE, 2012. DOI: 10.1109/GIWRM.2012.6349578.

4. Dao P.D., Liou Y.A. Object-based flood mapping and affected rice field estimation with Landsat 8 OLI and MODIS data. Remote Sensing, 2015. V 7. No 5. P. 5077–5097.

5. Drăguţ L., Tiede D., Levick Sh.R. ESP: A tool to estimate scale parameter for multiresolution image segmentation of remotely sensed data. International Journal of Geographical Information Science, 2010. V. 24. No 6. P. 859–871.

6. Gianinetto M., Rusmini M., Candiani G., Via D., Frassy F., Maianti P., Marches A., Nodari F.R., Dini L. Hierarchical classification of complex landscape with VHR pan-sharpened satellite data and OBIA techniques. European Journal of Remote Sensing, 2014. V. 47. No 1. P. 229–250.

7. *Giannini M.B., Parente C.* An object based approach for coastline extraction from Quickbird multispectral images. International Journal of Engineering and Technology (IJET), 2014−2015. V. 6. No 6. P. 2698−2704.

8. *Gyuris M.P.* Wp4-satellite remote sensing deliverable D4. Report on the limitations and potentials of satellite Eo data, 2010. DOI: http://www.impactmin.eu/downloads/ impactmin_d41.pdf.

9. *Jiaa Y., Lib H.T., Gub H.Y., Hanb Y.S.* Study on the Technology and Method of Land Cover Classification for Geographic National Conditions Surveying. ISPRS-International Archives of

the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2013. V 1. No 1. P. 61–66.
10. *Khin M.M.L., Shaker A., Joksimovic D., Yan W.Y.* The use of WorldView-2 satellite imagery to model urban drainage system with low impact development (LID) Techniques. Geocarto International, 2016. V. 31. No 1. P. 92−108.
11. *Kokje A.A., Gao J.A.* A simplified approach for classifying urban land cover using data fusion. Proceedings of the SIRC NZ — GIS and Remote Sensing Research Conference, Dunedin, New Zealand, 2013. 7 p. DOI: http://hdl.handle.net/10523/4240.
12. *Leonhard G., Ferrè N.* Master in space applications for early warning and response to emergencies. Final report. 5 p. Web resource: https://pdfslide.net/documents/master-in-space-applications-for-early-warning-and-1-master-in-space-applications.html (accessed 08.06.2015).
13. *Nath R.K., Deb S.K.* Water-body area extraction from high resolution satellite images — an Introduction, Review, and Comparison. International Journal of Image Processing (IJIP), 2010. V. 3. Iss. 6. P. 353–372.
14. *Navulur K.* Multispectral image analysis using the object-oriented paradigm. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2006. 204 p. DOI: https://doi.org/10.1201/9781420043075.
15. *Navulur K., Pacifici F., Baugh P.* Trends in optical commercial remote sensing industry [industrial profiles]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2013. V. 1. Iss 4. P. 57–64. DOI: 10.1109/MGRS.2013.2290098.
16. *Özdemir M.* Uydu görüntülerinden nesne yönelimli yöntemlerle özellik çıkarımı (Feature extraction from satellite images with object oriented methods). Abstract of D diss. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Selcuk University Institute of Science), 2013. 81 p. (in Turkish).
17. *Peña-Barragán J.M., Ngugi M.K., Plant R.E., Six J.* “Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology.” Remote Sensing of Environment, 2011. V. 115. No 6. P. 1301–1316. DOI: 10.1016/j.rse.2011.01.009.
18. *Platt R.V.* Wildfire hazard in the home ignition zone: An object-oriented analysis integrating LiDAR and VHR satellite imagery.” Applied Geography, 2014. V. 51. P. 108–117. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.03.011.
19. *Verőné Wojtaszek M., Ronczyk L.* Object-based classification of urban land cover extraction using high spatial resolution imagery. Proceedings of International Scientific Conference on Sustainable Development & Ecological Footprint, Sopron, Hungary, 2012. 7 p.
20. *Xiaohe Z., Liang Z., Jixian Z., Huiyong S.* An object-oriented classification method of high resolution imagery based on improved AdaTree. 35th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE35). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2014. IOP Publishing. V. 17 (1): 012212. DOI: http://iopscience.iop.org/1755-1315/17/1/012212.
21. *Zhou X., Jancsó T., Chen Ch., Wojtaszek Verőné M.* Urban land cover mapping based on object oriented classification using WorldView2 satellite remote sensing images. International Scientific Conference on Sustainable Development & Ecological Footprint, Sopron, Hungary, 2012. 10 p.

УДК: 911.2 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-322-334**

В.С. Исаев[1], Е.И. Игнатов[2], А.А. Новиков[3], Е.С. Каширина[4], Р.М. Аманжуров[5], Е.И. Горшков[6], В.В. Вербовский[7]

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ АБРАЗИОННО-ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ СЕВАСТОПОЛЯ

АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты многолетних работ по изучению опасных экзогенных процессов на побережье г. Севастополя с помощью лидара. Лазерное сканирование позволяет с высокой точностью оценить природную и антропогенную динамику берегов Севастополя, отличающихся концентрацией различных экзогенных процессов на сравнительно небольших участках и представляющих угрозу для хозяйственной деятельности населения. С использованием лазерного сканирования (лидарной съёмки) выполнена съёмка ключевых участков побережья в районе Немецкой балки и пляжа Учкуевка, где отмечается активное проявление обвально-оползневых и абразионных процессов. Наземное лазерное сканирование выполнено с использованием трёхмерной лазерной сканирующей системой. Лазерное сканирование проведено в июле 2016 г., июле 2017 г., июле и октябре 2018 г. Определено, что средняя скорость разрушения клифа в районе пляжа Учкуевка составила 0,8 м/год. Максимальная скорость разрушения клифа достигла 4,6 м, наблюдавшаяся на локальном десятиметровом участке сползания блока отседания. В районе Немецкой балки в результате террасирования образовался антропогенный «вырез» длиной около 150 м, шириной около 300 м и глубиной от 2,5 до 10 м. Расчёт показал, что объём вывезенного грунта составил 393649,14 м^3, а ссыпавшегося на пляж — 28669,62 м^3. Полученные результаты могут быть использованы для мониторинга опасных экзогенных процессов, моделирования и прогнозирования развития берегов и принятия решений для управления природопользованием в прибрежной зоне.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: лазерное сканирование, ГИС-технологии, побережье, обвально-оползневые процессы, Крым

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail:* **tpomed@rambler.ru**

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Институт природно-технических систем, ул. Ленина, д. 28, 299011, Севастополь, Россия; *e-mail:* **ign38@mail.ru**

[3] Филиал МГУ в г. Севастополе, Отделение географии, ул. Героев Севастополя, д. 7, 299001, Институт природно-технических систем, ул. Ленина, д. 28, 299011, Севастополь, Россия; *e-mail:* **a_novik@bk.ru**

[4] Филиал МГУ в г. Севастополе, Отделение географии, ул. Героев Севастополя, д. 7, 299001, Севастопольский государственный университет, Институт развития города, наб. Корнилова, д. 1, 299011, Севастополь, Россия; *e-mail:* **e_katerina.05@mail.ru**

[5] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, ООО «Современные Геотехнологии», ул. Б. Ордынка, д. 19, стр.1, 115035, Москва, Россия; *e-mail:* **rusaman@gmail.com**

[6] ООО «Современные Геотехнологии», ул. Б. Ордынка, д. 19, стр.1, 115035, Москва, Россия; *e-mail:* **e.i.gorshkov@yandex.ru**

[7] «Артегео», ул. Рябиновая, д. 1, корп. 2, оф. 1, пос. Сосенское, 108803, Москва, Россия; *e-mail:* **info@art-geo.ru**

Vladislav S. Isaev[1], **Evgeniy I. Ignatov**[2], **Anton A. Novikov**[3], **Ekaterina S. Kashirina**[4], **Ruslan M. Amanzhurov**[5], **Evgeniy I. Gorshkov**[6], **Vitaly V. Verbovsky**[7]

USE OF LASER SCANNING TO ESTIMATE DYNAMICS OF ABRASIVE-LANDSLIDE PROCESSES IN COASTAL ZONE OF SEVASTOPOL

ABSTRACT

The article presents the results of a long-term study of hazardous environmental processes on the Sevastopol coast. Laser scanning allows estimating with high accuracy the natural and anthropogenic dynamics of Sevastopol coast that differ in the concentration of various exogenous processes in relatively small areas and pose a threat to the economic activities of the population. Using laser scanning (lidar shooting), key coastal sections were surveyed in the area of Nemetskaya gully and Uchkuevka beach, where landslide and abrasion processes are displaying. Ground laser survey was performed using a three-dimensional laser scanning system. It was carried out in July 2016, July 2017, July and October 2018. The study showed that the average rate of cliff destruction in the area of the Uchkuevka beach was 0.8 m/year. The maximum cliff destruction rate reached 4.6 m, which was observed in the local ten-meter section of the block slide. Because of terracing, an anthropogenic “cutout” about 150 m long, about 300 m wide and 2.5 to 10 m deep was formed in the area of the Nemetskaya gully. The calculation showed that the Vume of removed soil was 393,649.14 m^3, and the Vume of dumped soil on the beach was 28,669.62 m^3. The results can be used to monitor hazardous exogenous processes, model and predict coastal development, and make decisions for environmental management in the coastal zone.

KEYWORDS: laser scanning, GIS technology, coast, landslide processes, Crimea

ВВЕДЕНИЕ

Территория Севастополя характеризуется активным протеканием многих опасных экзогенных процессов. Здесь отмечаются обвально-оползневые, карстово-суффозионные, осыпные, абразионные и др. неблагоприятные геологические процессы. Также Севастополь располагается в зоне 8-балльной сейсмичности.

В г. Севастополе общая протяжённость береговой линии моря (вместе с гидротехническими сооружениями) составляет 172 км, при этом более половины её относится к абразионному типу. В связи с расширением городской застройки в

[1] Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geology, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail:* **tpomed@rambler.ru**
[2] Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Institute of Natural Technical Systems, Lenin str., 28, 299011, Sevastopol, Russia;
e-mail: **ign38@mail.ru**
[3] Branch of Moscow State University in Sevastopol, Department of Geography, Heroes of Sevastopol str., 7, 299001, Institute of Natural Technical Systems, Lenin str., 28, 299011, Sevastopol, Russia; *e-mail*: **a_novik@bk.ru**
[4] Branch of Moscow State University in Sevastopol, Department of Geography, Heroes of Sevastopol str., 7, 299001, Sevastopol State University, City Development Institute, Kornilov quay, 1, 299011, Sevastopol, Russia;
e-mail: **e_katerina.05@mail.ru**
[5] Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geology, Leninskie Gory, 1, 119991, Ltd “Modern Geotechnologies”, B. Ordynka str., 19, bld. 1, 115035, Moscow, Russia; *e-mail:* **rusaman@gmail.com**
[6] LLC “Modern Geotechnologies”, B. Ordynka str., 19, bld. 1, 115035, Moscow, Russia;
e-mail: **e.i.gorshkov@yandex.ru**
[7] “Artegeo”, Ryabinovaya str., 1, bld. 2, off. 1, settl. Sosenskoye, 108803, Moscow, Russia;
e-mail: **info@art-geo.ru**

прибрежной зоне особую актуальность представляют исследования экзогенных процессов в узкой прибрежной полосе. На побережье сконцентрированы районы проявления активных обвально-оползневых и абразионных процессов, что приводит к отступанию берегов. Высокие скорости отступания береговой линии активизируют оползневые процессы в береговых уступах, сложенных рыхлыми малосвязанными алевритами и алевритистыми глинами с песчано-галечниковыми линзами. Подстилается таврская свита плотными сарматскими известняками.

Вопросами оценки скорости отступания берегов и факторов их определяющим посвящены работы [*Leatherman*, 1990; *Сафьянов*, 1996; *Мысливец* и др., 2018; *Wright et al*., 2019]. По оценкам разных авторов [*Клюкин,* 2007; *Игнатов и др.,* 2014; *Удовик и др.,* 2017; Долотов и др., 2017] средняя скорость отступания береговой линии на западном побережье Севастополя составляет около 1–1,4 м /год. Для отдельных участков скорость отступания берега достигает до 5 м/год (пляж Орловка, участки на пляже Учкуевка). При этом указанная скорость является усреднённой и основанной на оценках размеров сокращения берега на протяжении 50–70 лет[1]. Дополнительным фактором, влияющим на резкое увеличение как количества оползней, так и на их масштабы, является хозяйственная деятельность в приоползневой зоне. Недостаток точных данных не позволяет с высокой точностью определить факторы активизации опасных экзогенных процессов в прибрежной зоне.

Цель статьи — определение пространственных параметров и временной динамики проявления опасных процессов в прибрежной зоне Севастополя по данным лазерного сканирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве ключевых выбраны участки в районе Немецкой балки и в южной части городского пляжа Учкуевка, характеризующиеся развитием обвально-оползневых и абразионных процессов и максимальной скоростью отступания берегов (рис. 1). Берег сложен таврской свитой, состоящей из чередования жёлтовато-бурых светлых алевритов и алевритистых глин и характерных более тонких слоёв, окрашенных в красновато-бурый или ярко-красный цвет.

Ключевой участок в районе пляжа Учкуевка характеризуется интенсивными гравитационными (оползни и обвалы) и абразионными процессами (рис. 2).

Одновременно участок в районе Немецкой балки является модельным для определения величины антропогенного изъятия грунта. В зимний период 2017–2018 гг. северный борт Немецкой балки был срезан на половину высоты и террасирован (рис. 3).

Наземное лазерное сканирование выполнено с использованием трёхмерной лазерной сканирующей системы с экстремально высокой скоростью измерений (до 400 000 измер. / сек. и 240 скан лин. / сек.). Лазерное сканирование проведено в июле 2016 г., июле 2017 г., июле и октябре 2018 г. В результате измерений получены точки лазерных отражений, для которых вычислены пространственные координаты (x, y, z), форма и интенсивность отражённого сигнала. Полученные данные использованы для построения пространственных цифровых моделей измеряемых объектов.

Лазерное сканирование в районе пляжа Учкуевка выполнено с 38 точек наблюдения (рис. 4).

Длина побережья на ключевом участке Учкуевка составила около 250 м.

---

[1] *Игнатов Е.И., Новиков А.А., Каширина Е.С., Калиниченко А.В.* Природные опасности и показатели риска в Крымском федеральном округе. Использование и охрана природных ресурсов в России, 2016. № 2. С. 54–58.

Лазерное сканирование в Немецкой балке выполнено с 40 точек наблюдения. Отсканированы береговая линия длиной около 350 м с клифом, тальвег балки, южный задернованный и северный террасированный борта балки.

Рис. 1. Характер побережья на ключевых участках:
а) район Немецкой балки; б) пляж Учкуевка
Fig.1. The nature of the coast in key sections:
a) Nemetskaya gully; b) Uchkuevka beach

Рис. 2. Сохранившийся блок отседания на обвально-оползневом участке
в районе пляжа Учкуевка (фото К. Журавлёвой)
Fig. 2. Block slide in a landslide area
near the Uchkuevka beach (photo by K. Zhuravleva)

Рис. 3. Берег в районе Немецкой балки: а) 2017 г.; б) 2019 г.
Fig. 3. The shore in the Nemetskaya gully: a) 2017; b) 2019

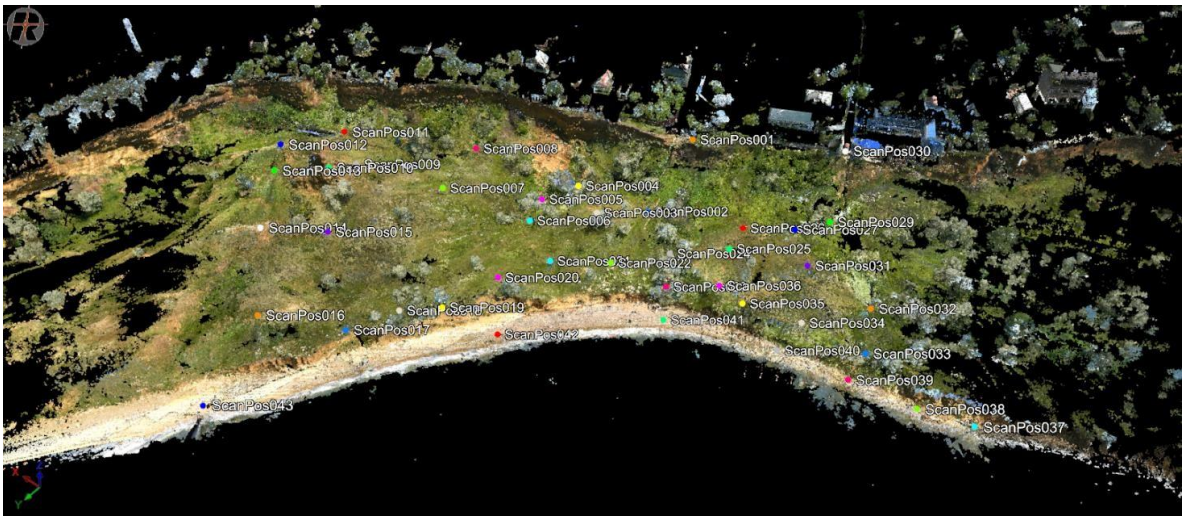


Рис. 4. Точки расположения лазерной съёмки на ЦМР
южной части городского пляжа Учкуевка
Fig. 4. Laser survey locations at the DEM of the southern part of Uchkuevka beach

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе полученных данных построена цифровая модель обвально-оползневых склонов в районе пляжа Учкуевка (рис. 5).

Для оценки динамики изменения рельефа побережья урочища Учкуевка на построенной ЦМР рассмотрено 5 профилей (рис. 6).

Расположение профилей соответствует участкам разной интенсивности разрушения клифа. Голубой линией показан профиль берега 2016 г., жёлтой — 2017 г. (рис. 7).

Рис. 5. 3D модель обвально-оползневых склонов в районе пляжа Учкуевка
Fig. 5. 3D model of landslide and rockslide slopes near the Uchkuevka beach

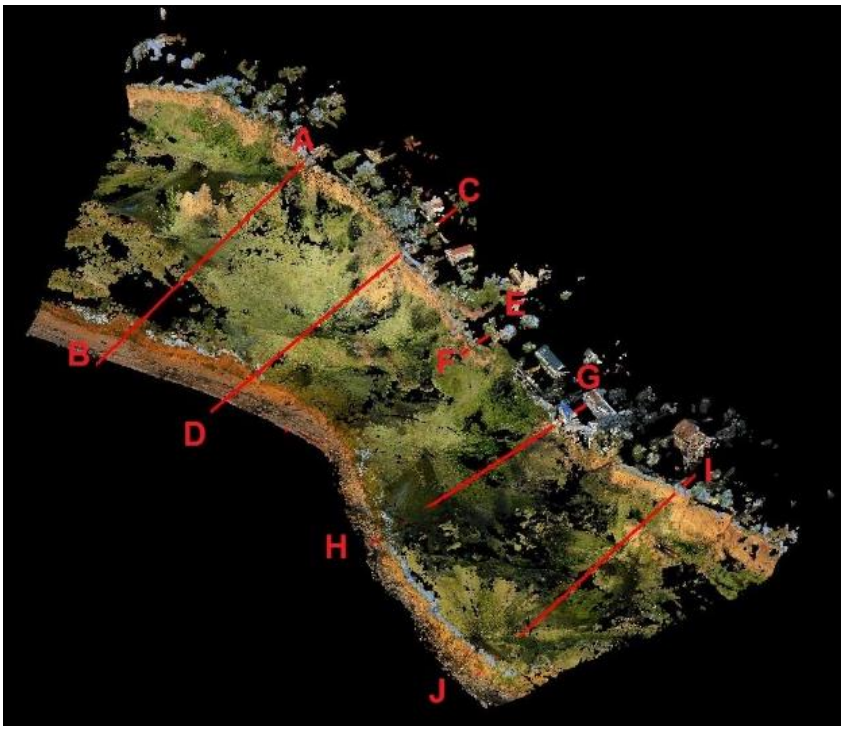


Рис. 6. Расположение профилей на ЦМР,
построенной по данным лазерного сканирования
Fig. 6. The location of the profiles on the DEM, built according to laser scanning

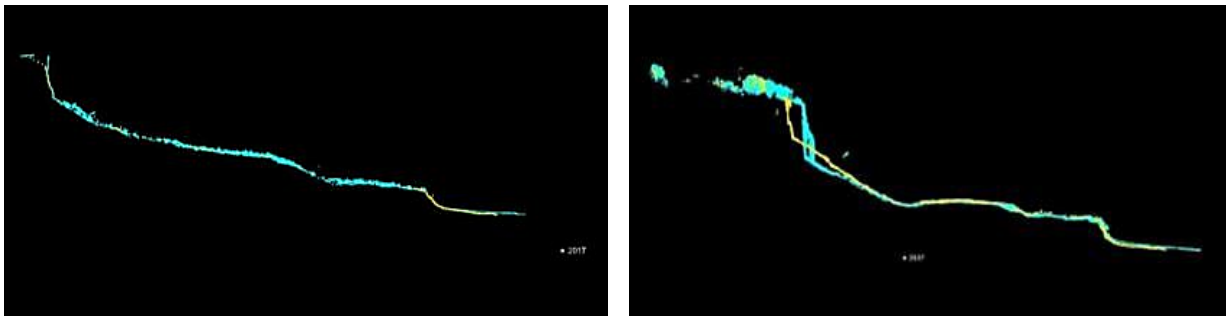


Рис. 7. Разрез по профилю A–B и профилю C–D
(голубой цвет — 2016 г., жёлтый — 2017 г.)
Fig. 7. A section along the A–B profile and the C–D profile
(blue — 2016, yellow — 2017)

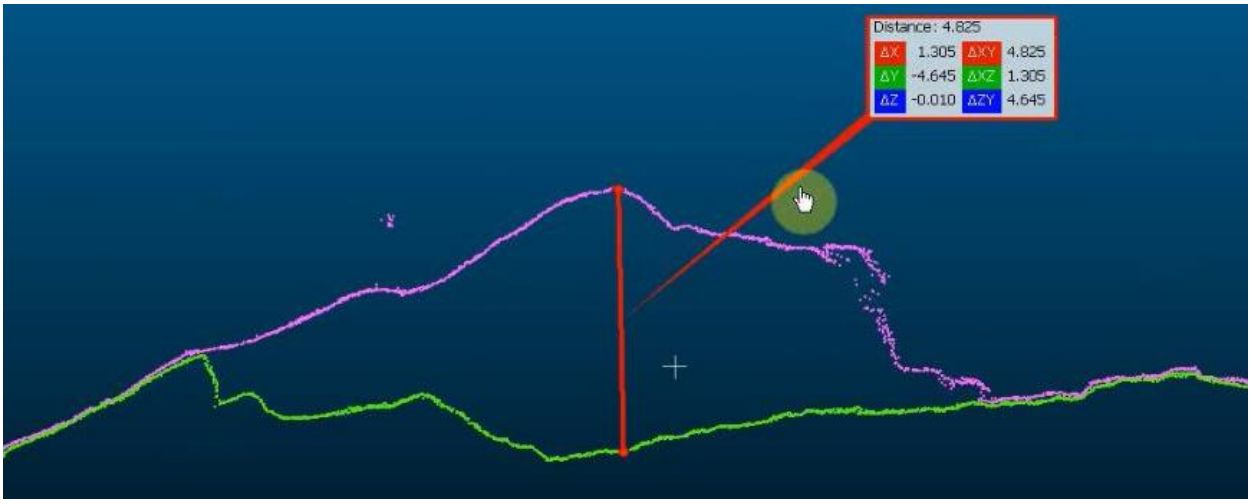


Рис. 8. Размеры блока отседания, вид сверху,
2016 г. (зелёная линия), 2017 г. (сиреневая линия)
Fig. 8. Dimensions of the block slide, top view,
2016 (green line), 2017 (lilac line)

Как видно из графических материалов, за год наблюдений бровка клифа отодвинулась в среднем на 0,8 м. На профиле D–C зафиксирован участок максимальной активности обвально-оползневых процессов на пляже Учкуевка в 2017 г. Размер блока отседания, отколовшегося от бровки уступа в 2017 г., составил 4,6–4,8 м (рис. 8). Горизонтальные параметры разрушения верхней части клифа за 2016–2017 гг. достигли 4 м.

Лазерное сканирование позволило определить морфометрические параметры не только блоков отседания, но и проседания склона (рис. 9).

Как видно из рис. 9, по профилю H–G наблюдается проседание склона, т.е. сокращение объёмов склонового материала. Максимальный размер проседания составил более 2 м за период с июля 2016 г. по июль 2017 г.

Абразия в период осенне-зимних штормов, а также вдольбереговые течения приводят к размыванию накопленных оползневых масс в пределах береговой полосы. Летом этот процесс затухает из-за ослабления ветровой активности, однако на отдельных участках побережья фиксируется смещение линии уреза вод и в тёплое время года. При сканировании лидаром линии пляжа были выделены участки максимального разрушения

берега морской волной, которое достигает 20 см за период лето 2016 — осень 2018 гг. (рис. 10, 11).

За указанный период максимальный размыв берега достигал 5 м. Участки максимального разрушения береговой линии на ЦМР в районе пляжа Учкуевка расположены в его средней и западной частях (рис. 12).

Район Немецкой балки является модельным для оценки как природных процессов отступания берега, так и антропогенного разрушения берегов. По данным, полученным в 2017 и 2018 гг., построены цифровые модели рельефа (рис. 13) и совмещённая модель (рис. 14).

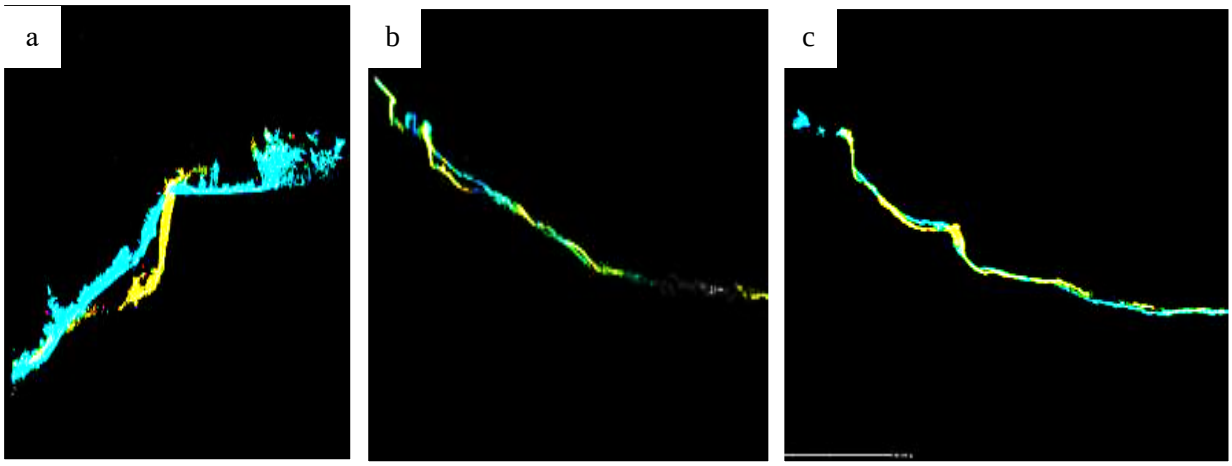


Рис. 9. Разрез по профилям E–F (a), H–G (b), I–G(c) 2016–2017 гг.
Fig. 9. Section by profiles E–F (a), H–G (b), I–G (c) 2016–2017

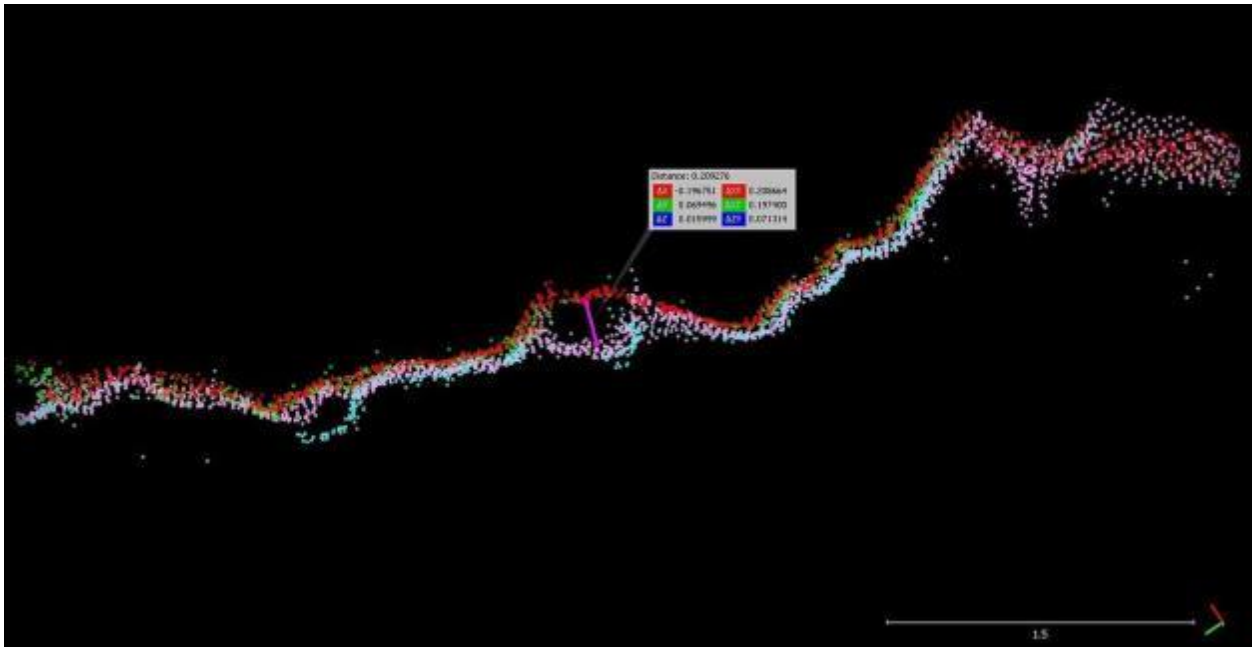


Рис. 10. Участки максимального разрушения берега морской абразией
Fig. 10. Areas of maximum coastal destruction by marine abrasion

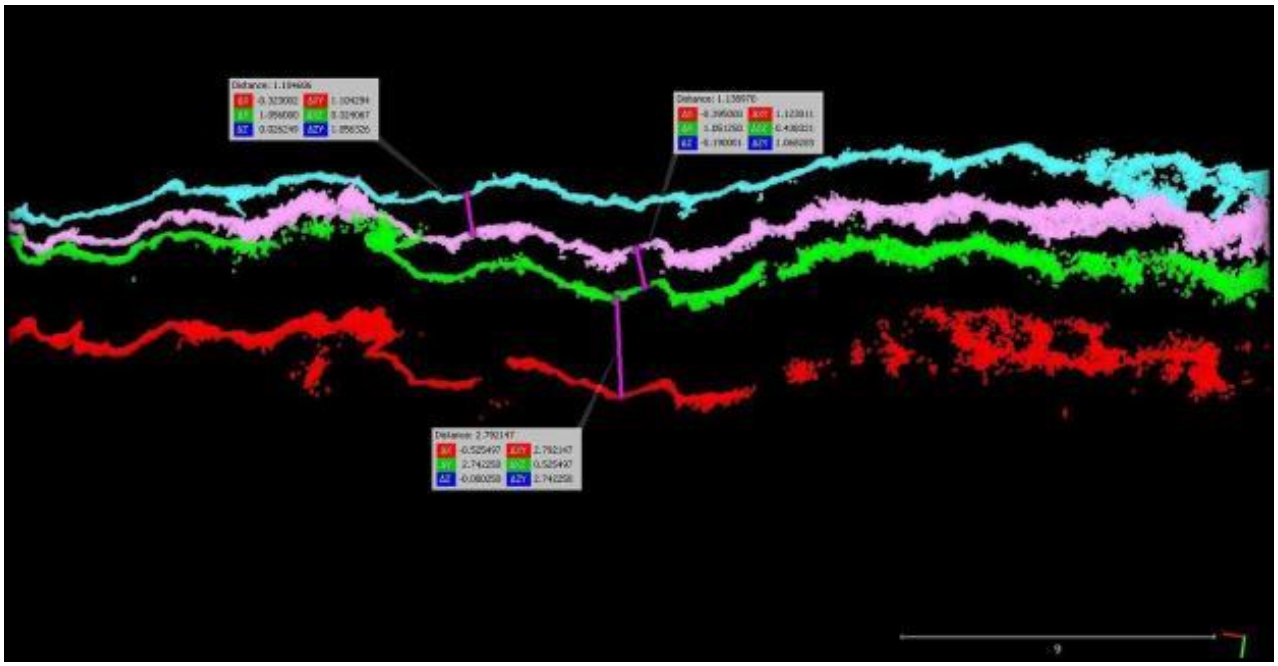


Рис. 11. Схема береговой линии летом 2016 г. (красная линия), летом 2017 г. (зелёная линия), летом (сиреневая линия) и осенью (голубая линия) 2018 г
Fig. 11. The coastline in the summer 2016 (red line), in the summer 2017 (green line), in summer (lilac line) and in autumn (blue line) 2018

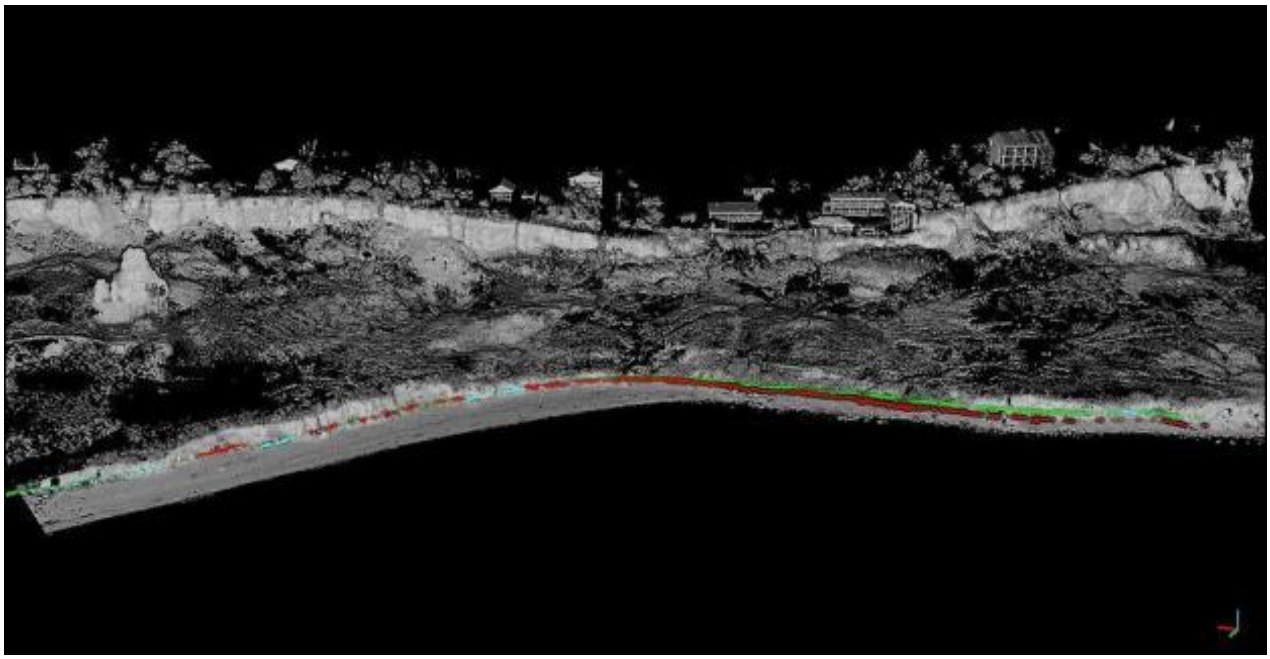


Рис. 12. Абразия берега к югу от пляжа Учкуевка (красный цвет)
Fig. 12. Coast abrasion south of Uchkuevka beach (red color)

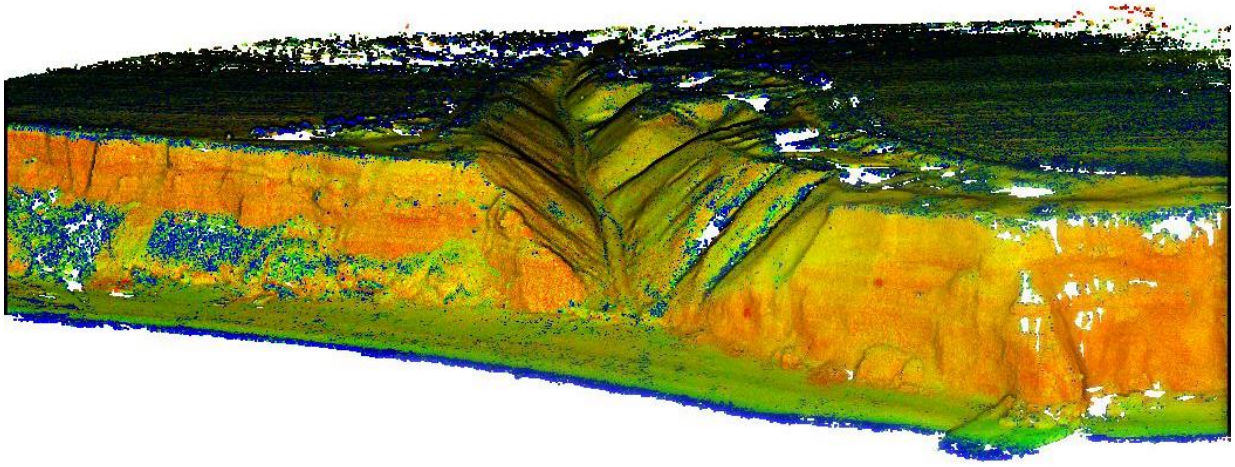


Рис. 13. Цифровая модель обвально-оползневого побережья в районе Немецкой балки, 2017 г
Fig. 13. Digital evaluation model of landslide coast near the Nemetskaya gully, 2017

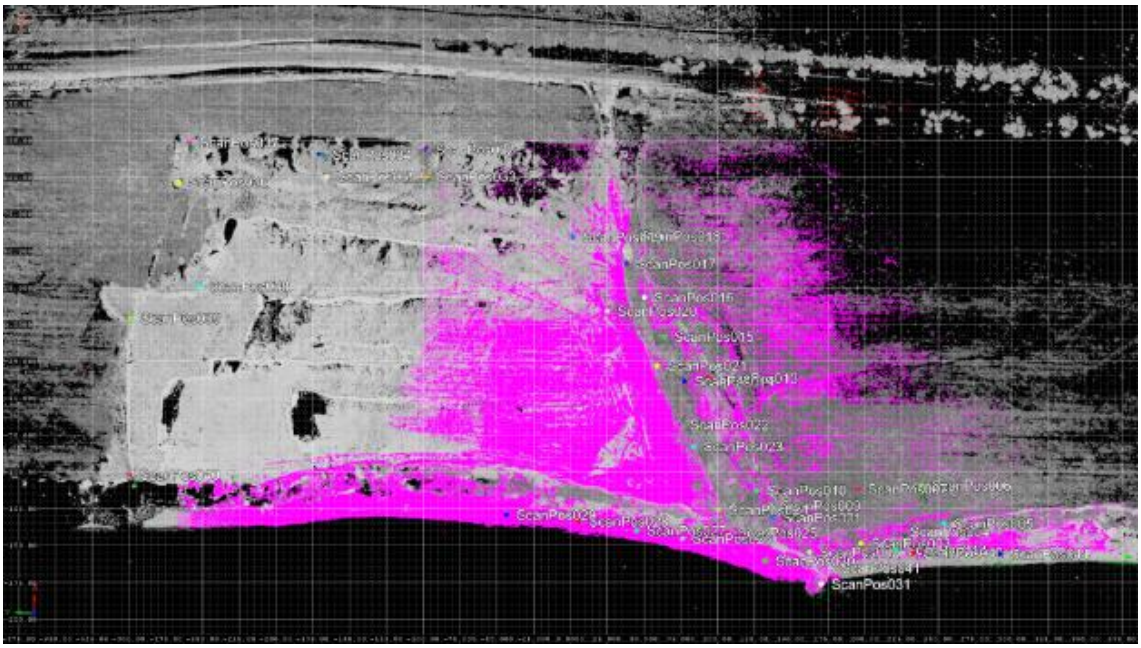


Рис. 14. Совмещённые цифровые модели рельефа Немецкой балки за 2017 г. (серый цвет) и 2018 г. (розовый цвет)
Fig. 14. Combined digital evaluation models of the Nemetskaya gully for 2017 (gray color) and 2018 (pink color)

По данным совмещённой модели и построенного сечения прослежены изменения рельефа, произошедшие в результате экзогенных процессов и антропогенного вмешательства (рис. 15).

Как видно из модели, в результате террасирования участка на северном борту Немецкой балки образовался антропогенный «вырез» длиной около 150 м и шириной около 300 м. Глубина «выреза» составила от 10 м мощности у бровки над пляжем и 2,5 м у края со стороны дороги.

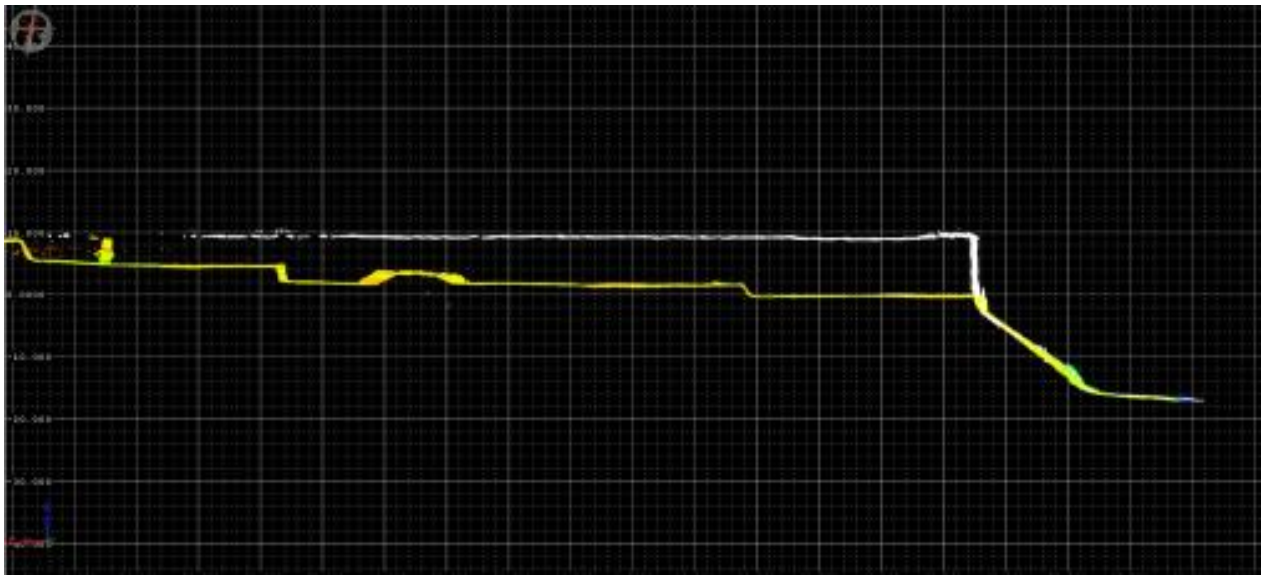


Рис. 15. Сечение совмещённых цифровых моделей района Немецкой балки за 2017 г. (белый цвет) и 2018 г. (жёлтый цвет)
Fig. 15. The cross-section of the combined digital models of the Nemetskaya gully for 2017 (white) and 2018 (yellow)

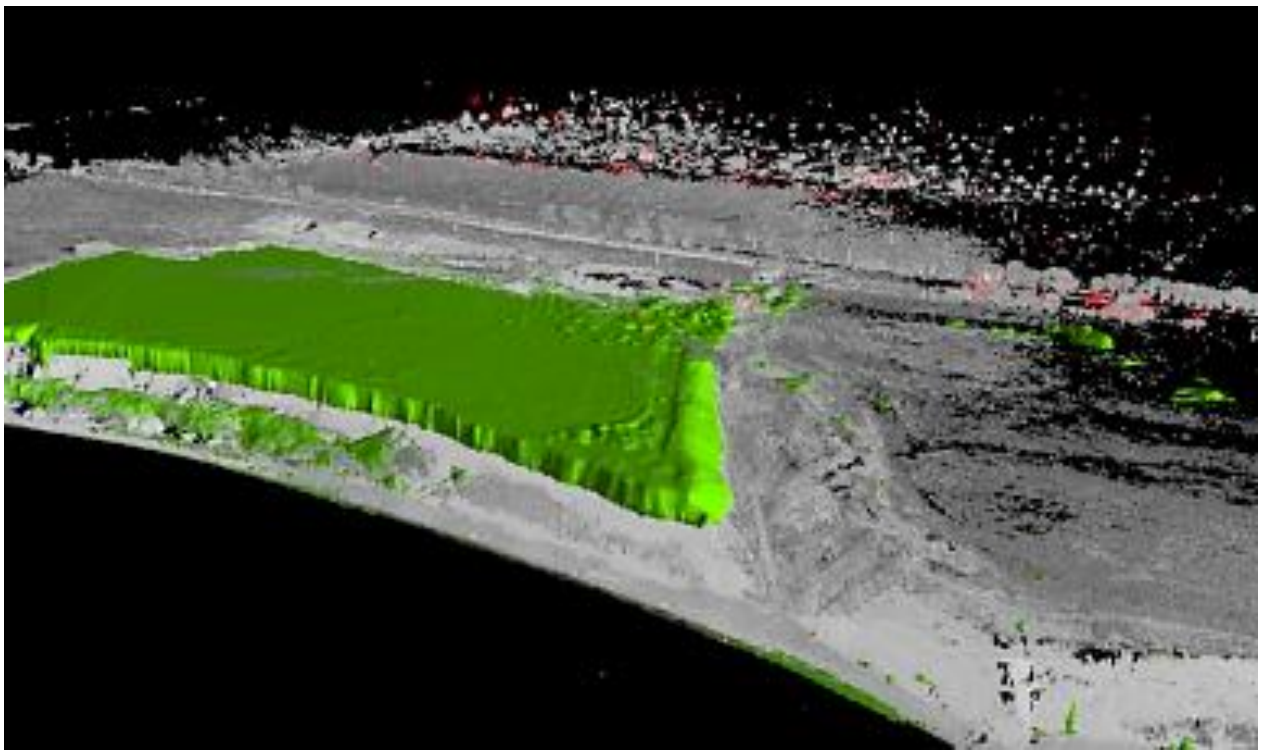


Рис. 16. Объём перемещённого грунта (выделен зелёным цветом), 2017–2018 гг.
Fig. 16. The volume of relocated ground (highlighted in green), 2017–2018

Для определения объёма вывезенного грунта и грунта, который образовался в результате оползней и осыпей, построена объёмная фигура. Для наглядности фигура загружена в облако точек 2018 г. Разница очертаний рельефа между 2017 и 2018 гг. показана зелёным цветом (рис. 16).

Расчёт показал, что объём вывезенного грунта составляет 393649,14 м^3, а образовавшегося из-за осыпания кромки карьера — 28669,62 м^3. При этом часть материала в аккумулятивных телах у подножия клифа накопилась в результате строительных работ и антропогенного перемещения грунта. Необходимо отметить наличие временной тенденции к расширению пляжа напротив устьевого участка балки, что объясняется перераспределением вдольбереговыми течениями дополнительных масс грунта, поступающих на подводную часть побережья в результате абразии этих аккумулятивных тел, оказавшихся в волноприбойной зоне пляжа.

ВЫВОДЫ

1. Лазерное сканирование позволяет с высокой точностью оценить природную и антропогенную динамику берегов Севастополя, отличающихся локализацией различных экзогенных процессов и представляющих угрозу для хозяйственной деятельности населения.

2. Средняя скорость разрушения клифа в районе пляжа Учкуевка составила 0,8 м/год. Максимальная скорость разрушения клифа достигла 4,6 м, наблюдавшаяся на локальном десятиметровом участке сползания блока отседания.

3. В районе Немецкой балки в результате террасирования образовался антропогенный «вырез» длиной около 150 м, шириной около 300 м и глубиной от 2,5 до 10 м. Расчёт показал, что объём вывезенного грунта составил 393 649,14 м^3, а образовавшегося из-за оползней и обвалов — 28 669,62 м^3.

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы для мониторинга опасных экзогенных процессов, моделирования и прогнозирования развития берегов и принятия решений для управления природопользованием в прибрежной зоне.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 18-45-920045 р_а.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, grant No 18-45-920045 р_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Долотов В.В., Горячкин Ю.Н., Долотов А.В.* Статистический анализ изменений береговой линии пляжа посёлка Любимовка. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря, 2017. № 1. С. 40–47.
2. *Игнатов Е.И., Орлова М.С., Санин А.Ю.* Береговые морфосистемы Крыма. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. 266 с.
3. *Клюкин А.А.* Экзогеодинамика Крыма. Симферополь: Таврия, 2007. 320 с.
4. *Мысливец В.И., Бредихин А.В., Сафьянов Г.А., Рычагов Г.И., Игнатов Е.И., Жиндарев Л.А., Лукьянова С.А., Соловьёва Г.Д., Бадюкова Е.Н., Репкина Т.Ю., Шипилова Л.М., Селезнёва Е.В.* Проблемы прогноза развития морских берегов европейской России (ст. 2. Морфодинамика берегов и принципы прогноза их развития). Геоморфология, 2018. № 1. С. 54–65.
5. *Сафьянов Г.А.* Геоморфология морских берегов. М.: Издательство Московского университета, 1996. 400 с.
6. *Удовик В.Ф., Харитонова Л.В., Горячкин Ю.Н.* Мониторинг состояния городских пляжей Севастополя. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря, 2017. № 4. С. 86–94.

7. *Leatherman S.P.* Modelling shore response to sea-level rise on sedimentary coasts. Progress in Physical Geography, 1990. V. 14. No 4. P. 447–464.
8. *Wright L., Syvitski J., Nichols C., Zinnert J.* Coastal morphodynamics and ecosystem dynamics. Tomorrow's coasts: complex and impermanent, 2019. V. 27. P. 69–84. DOI: 10.1007/978-3-319-75453-6_5.

REFERENCES

1. *Dolotov V.V., Goryachkin Yu.N., Dolotov A.V.* Statistical analysis of changes in the coastline of the beach in the Lyubimovka village. Environmental safety of the coastal and shelf zones of the sea, 2017. No 1. P. 40–47 (in Russian).
2. *Ignatov E.I., Orlova M.S., Sanin A.Yu.* Coastal morphosystems of Crimea. Sevastopol: ECOSI-Hydrophysics, 2014. 266 p. (in Russian).
3. *Klyukin A.A.* Exogeodynamics of Crimea. Simferopol: Tavria, 2007. 320 p. (in Russian).
4. *Leatherman S.P.* Modelling shore response to sea-level rise on sedimentary coasts. Progress in Physical Geography, 1990. V. 14. No 4. P. 447–464.
5. *Myslivets V.I., Bredikhin A.V., Safyanov G.A., Rychagov G.I., Ignatov E.I., Zhindarev L.A., Lukyanova S.A., Solovieva G.D., Badiukova E.N., Repkina T.Yu., Shipilova L.M., Selezneva E.V.* Problems of forecasting the development of the coasts of European Russia (Article 2. Morphodynamics of the coasts and principles of forecasting their development). Geomorphologiya, 2018. No 1. P. 54–65 (in Russian).
6. *Safyanov G.A.* Geomorphology of sea coasts. Moscow: Moscow University Press, 1996. 400 p. (in Russian).
7. *Udovik V.F., Kharitonova L.V., Goryachkin Yu.N.* Monitoring the state of city beaches in Sevastopol. Environmental safety of coastal and shelf zones of sea, 2017. No 4. P. 86–94 (in Russian).
8. *Wright L., Syvitski J., Nichols C., Zinnert J.* Coastal morphodynamics and ecosystem dynamics. Tomorrow's coasts: complex and impermanent, 2019. V. 27. P. 69–84. DOI: 10.1007/978-3-319-75453-6_5.

УДК: 556.555.6 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-335-348**

А.А. Лагута[1], А.В. Погорелов[2]

АНАЛИЗ ЗАИЛЕНИЯ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ДЕГРАДИРУЮЩЕМ ПОЙМЕННО-ДОЛИННОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ (НА ПРИМЕРЕ КРАСНОДАРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА)

АННОТАЦИЯ

В статье по данным материалов батиметрических съёмок, топографических карт и спутниковых снимков анализируются процессы отложения наносов в чаше пойменно-долинного Краснодарского водохранилища в связи с циркуляцией водных масс. За период эксплуатации с 1973 г. площадь Краснодарского водохранилища сократилась на 35 % при значительном уменьшении полезного объёма. Особое внимание уделяется анализу циркуляции вод — важнейшему фактору формирования тела заиления, переработки берегов и распределения наносов. Среднегодовой объём заиления Краснодарского водохранилища за 2005–2016 гг. оценивается в 6,9 млн м^3. Наибольшее увеличение толщины тела заиления (4–8 м и более) отмечено в устьевых участках крупных впадающих в водохранилище рек — в пределах устьевого взморья р. Кубани и дельты р. Белой. Вообще формирование дельт играет ключевую роль в трансформации чащи водоёма. Наступающая дельта Кубани за 1977–2018 гг. заняла в акватории водохранилища площадь 41,41 км^2, а дельты выдвижения, сформированные р. Белой, в настоящее время имеют общую площадь 25,22 км^2.

Циркуляция водных масс исследована с помощью акустического доплеровского измерителя течений — профилографа. Механизмы трансформации чаши и особенности отложения наносов рассматриваются в аспекте движения водных масс в связи со стоковой и ветровой составляющими циркуляции, а также гидродинамикой в устье Кубани. Установлено, что в поперечном профиле в водохранилище действуют два разнонаправленных потока. Основным является правый поток, формирующийся под влиянием стока Кубани и сброса воды из водохранилища, с направлением на юго-запад (вдоль северного берега) и средней скоростью 0,04 м/с; левый поток со средней скоростью 0,01 м/с направлен на восток. Скорости потоков уменьшаются с приближением к оси циркуляции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Краснодарское водохранилище, батиметрическая съёмка, внутренние дельты, заиление, течения

[1] ООО «Аэрогеоматика», ул. им. Фрунзе, д. 22/1, 350063, Краснодар, Россия; *e-mail:* **alaguta@icloud.com**
[2] Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, 350040, Краснодар, Россия; *e-mail:* **pogorelov_av@bk.ru**

Andrey A. Laguta[1], **Anatoly V. Pogorelov**[2]

ANALYSIS OF SILTING AND HYDRODYNAMIC PROCESSES IN THE DEGRADING FLOODPLAIN-VALLEY RESERVOIR (ON THE EXAMPLE OF THE KRASNODAR RESERVOIR)

ABSTRACT

Based on the data of bathymetric surveys, topographic maps, and satellite images, the article analyzes sediment deposition processes in the bowl of the floodplain-valley Krasnodar Reservoir in connection with the circulation of water masses. Over the period of operation since 1973, the area of the Krasnodar reservoir decreased by 35 % with a significant decrease in usable volume. Particular attention is paid to the analysis of water circulation — the most important factor in the formation of the siltation body, processing of coasts and distribution of sediments. The average annual siltation of the Krasnodar Reservoir for 2005–2016 estimated at 6.9 mn m^3. The greatest increase in the thickness of the siltation body (4−8 m or more) was recorded in the estuarine areas of the largest rivers flowing into the reservoir — within the estuary of the Kuban river and the Belaya river delta. In general, the formation of deltas plays a key role in the transformation of the reservoir. The upcoming Kuban delta from 1977–2018 occupied an area of 41.41 km^2 in the water area of the reservoir, and the extension deltas formed by the Belaya river currently have a total area of 25.22 km^2.

The circulation of water masses was studied using an acoustic Doppler profilograph. Bowl transformation mechanisms and sediment deposition features are considered in the aspect of the movement of water masses in connection with the river flow and wind components of the circulation, as well as hydrodynamics at the mouth of the Kuban. It has been established that in the transverse profile in the reservoir there are two multidirectional flows. The main one is the right flow, formed under the influence of the Kuban runoff and the discharge of water from the reservoir, with a direction to the south-west (along the northern coast) and an average speed of 0.04 m/s; the left flow at an average speed of 0.01 m/s is directed east. Flow rates decrease with approach to the circulation axis.

KEYWORDS: Krasnodar Reservoir, bathymetric survey, inland river deltas, siltation, water flows

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования выступает пойменно-долинное Краснодарское водохранилище, расположенное в нижнем течении р. Кубани между станицей Воронежской и Краснодаром на территории Краснодарского края и Республики Адыгея. По размерам водохранилище, согласно классификации [*Авакян, Шарапов*, 1977], относится к категории крупных. При вводе в эксплуатацию в 1973 г. оно имело площадь зеркала около 400 $км^2$, длину 46 км, ширину до 8–11 км, среднюю глубину 5,9 м, максимальную глубину до 24,7 м, полезный объём воды 2,2 $км^3$ при полной ёмкости около 3 $км^3$ [*Лурье и др.*, 2005]. В водоём, кроме основной реки Кубани, впадают левые её притоки — Белая, Пшиш, Марта, Апчас, Шундук, Псекупс. Основные функции Краснодарского водохранилища: защита от наводнения земель при пропуске паводка с расходами до 1500 $м^3$/с и орошение рисовых систем в низовьях Кубани.

В процессе эксплуатации вследствие заиления водохранилище претерпело значительную трансформацию с изменением его начальных эксплуатационных характеристик (уменьшились площадь зеркала, полезный объём, средние глубины и пр.).

[1] LLC “Aerogeomatica”, Frunze str., 22/1, 350063, Krasnodar, Russia; *e-mail:* **alaguta@icloud.com**
[2] Kuban State University, Stavropolskaya str., 149, 350040, Krasnodar, Russia; *e-mail:* **pogorelov_av@bk.ru**

На трансформацию чаши существенное влияние оказало активное формирование дельт впадающих в образованный водоём рек (Кубань, Белая и др.) с весьма высокими показателями мутности [*Лурье и др.,* 2005]. Оценкам состояния, анализу этапов и тенденций трансформации Краснодарского вдхр. за период эксплуатации посвящены публикации [*Курбатова*, 2014; *Лагута, Погорелов*, 2018; и др.[1]]. В результате заиления часть водоёма на месте бывшего Тщикского вдхр. оказалась изолированной от основной акватории Краснодарского вдхр. надводной перемычкой; площадь этого изолированного водоёма по состоянию на 2018 г. составила 48,68 км^2. Таким образом, площадь зеркала Краснодарского вдхр. за 1973–2018 гг. в целом сократилась на 140,56 км^2, или на 35 %. Объём водохранилища при нормальном подпорном уровне (НПУ) в основной чаше на площади 229 млн км^2 за 1973–2016 гг. сократился на 83,2 млн м^3 (т.е. на объём заиления), объём при уровне мёртвого объёма — на 41,6 млн м^3. Средняя глубина при НПУ уменьшилась на 0,36 м [*Лагута, Погорелов*, 2018].

Происходящие изменения пойменно-долинного водохранилища (по сути — деградация) при всей его хозяйственной значимости заслуживают детального количественного анализа с раскрытием факторов и механизмов трансформации чаши искусственного водоёма, включая гидродинамические процессы. В данной статье на основе материалов батиметрических съёмок, топографических карт и спутниковых снимков анализируются процессы отложения наносов в чаше водохранилища в связи с циркуляцией водных масс. Особое внимание уделяется анализу циркуляции вод — важнейшему фактору формирования тела заиления, переработки берегов и распределения наносов в водохранилище.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ многолетних преобразований конфигурации водоёма выполнен нами по данным спутниковых снимков Landsat (1974–2018 гг.)[2], топографических карт 1940–1942 гг. и полевых наблюдений 2016–2019 гг. Батиметрическая съёмка выполнена в 2016 г. профилографом «Rio Grande 1200 kHz». Положение промерных галсов представлено на рис. 1; расстояния между галсами — 100 м. Для детального измерения участков дна водохранилища со сложным рельефом (старые русла Кубани и Псекупса, участок вблизи шлюзов водохранилища, северная часть водоёма с наличием ям и пр.) дополнительно прокладывались галсы сгущения. Общая протяжённость промерных маршрутов, пройденных при батиметрической съёмке в 2016 г., составила 3 525 км с количеством точек измерения глубин около 1,451 млн. Обработка материалов съёмок и построение ЦМР выполнены в программе ArcGIS.

Анализ циркуляции водных масс в водохранилище выполнен с помощью акустического доплеровского измерителя течений ADCP — профилографа. Профилограф обеспечивает сбор полевых данных большого объёма в виде мгновенных измерений направления и скорости течения с высоким пространственным разрешением. С 2009 г. профилографы используются в подразделениях Росгидромета; изданы руководства, регламентирующие методику измерений расходов воды этими устройствами[3]. Оценки циркуляции, как правило, базируются на измерениях скоростей и расходов воды на поперечных профилях водоёмов. Сведения о течениях в крупных озёрах и

---

[1] Например, *Погорелов А.В., Липилин Д.А., Курносова А.С.* Спутниковый мониторинг Краснодарского водохранилища. Географический вестник = Geographical bulletin, 2017. № 1 (40). С. 130–137. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-1-130-137

[2] Официальный сайт Геологической службы США. Электронный ресурс: https://glovis.usgs.gov/ (дата обращения 01.10.2018−17.06.2019)

[3] РД 52.08.767-2012. Расход воды на водотоках. Методика измерений акустическими доплеровскими профилографами «Stream Pro» и «Rio Grande». М.: Росгидромет, 2012. 84 с.

водохранилищах и схемы течений для конкретных водоёмов по данным акустических доплеровских измерений приводятся эпизодически. Известны результаты исследований на озёрах Аппер-Кламат, США [*Vermeyen, Wahl,* 1999], Мид, США [*Vermeyen,* 2009], а также на озере Кинерет (Галилейское море), Израиль [*Серебряный и др.,* 2018].

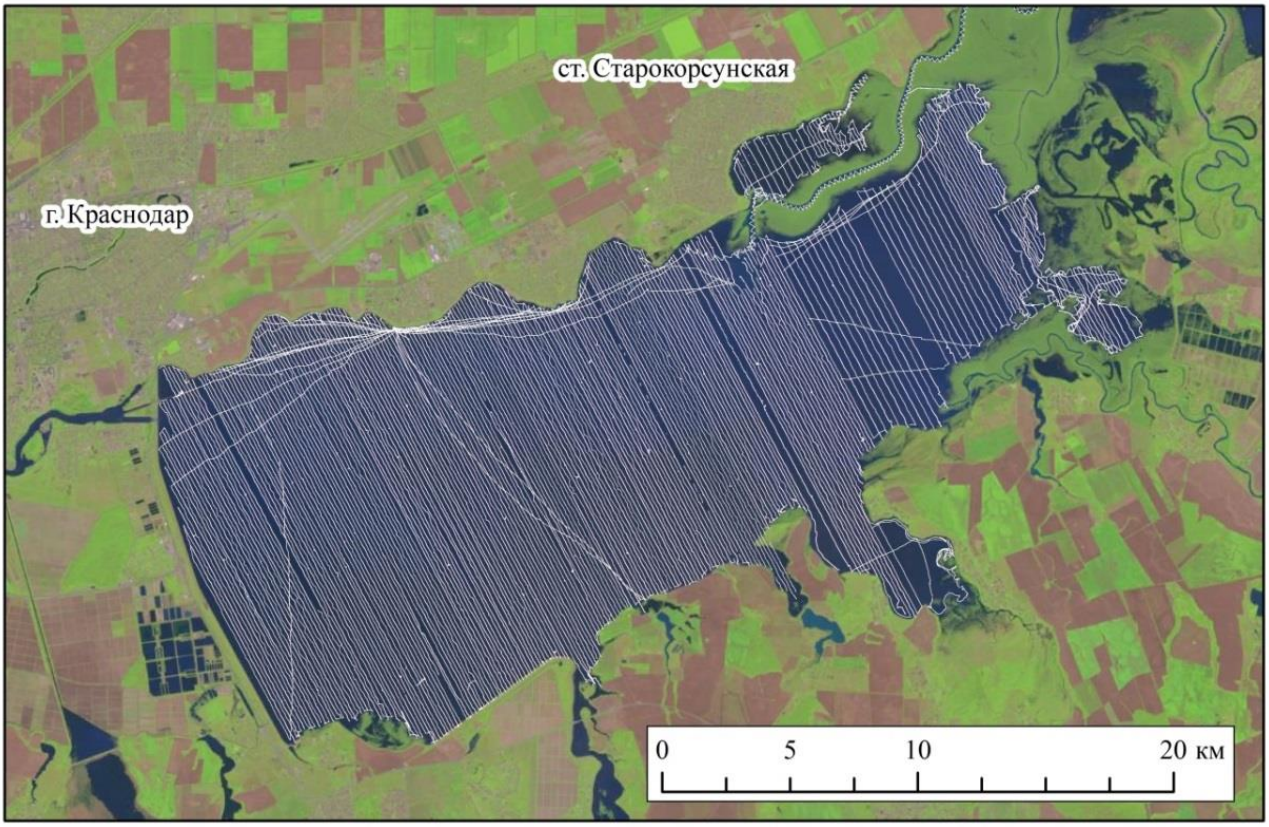


Рис. 1. Схема расположения промерных галсов в Краснодарском водохранилище при выполнении батиметрической съёмки
Fig. 1. Scheme of the location of the survey transects during bathymetric survey of the Krasnodar Reservoir

Методика ADCP-измерений сводится к следующему. Каждое частное измерение вектора скорости по промерной вертикали, соответствующей в плане точке измерения глубины, производится в отдельной ячейке высотой 0,25 м. При движении вдоль галса формируется профиль скорости от поверхности до дна. Скорость измеряется по трём ортогональным осям X, Y и Z (East, North, Up или U, V, W) относительно неподвижного дна водоёма (донный след), направление — по встроенному магнитному компасу. Посредством ADCP дополнительно выполняется регистрация интенсивности акустического эха, получаемого от взвешенных в воде частиц и объектов (минеральное вещество, планктон, пузырьки воздуха и т.п.), и обеспечивается отображение распределения величины обратного рассеяния.

Измерения выполнены в июле-августе — периоде с наименьшими в течение года средними скоростями ветра в районе Краснодарского вдхр. Фоном для съёмки в представлениях мезомасштабной временной изменчивости течений послужили суточные изменения, непосредственно влиявшие на формирование поля скоростей и циркуляцию

водных масс в целом. Среди них изменения как естественного происхождения (скорость и направление ветра, прито́чность), так и техногенного (режим эксплуатации водохранилища) (табл. 1).

Табл. 1. Эксплуатационные и метеорологические условия во время измерений (фрагмент)
Table 1. Operational and meteorological conditions during measurements (fragment)

Даты съёмки	Рабочие уровни воды в водохранилище, м БС	Сведения о промерных галсах		Ветровой режим		Гидравлические характеристики		
		Количество	Номера	Направление ветра[1]	Скорость ветра, м/с	Приток, м^3/с	Сброс, м^3/с	Разность, м^3/с
07.07.2016	33,06	6	80-75	З	2	801	930	129
11.07.2016	33,07	4	73-69	В	3	892	930	38
04.08.2016	32,38	12	221-232	ЮЗ	1	233	618	385

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Дельтоформирование

По нашим расчётам, наиболее активная аккумуляция наносов и одновременно отступание Краснодарского вдхр. происходит в устьевых областях рр. Кубани и Белой (рис. 2). Дельта Кубани за 40 с лишним лет сменила в своём развитии стадию дельты выполнения ингрессионного залива на дельту выдвижения. Площадь, отторгнутая наступающей дельтой Кубани от акватории водоёма за 1977–2018 гг., составляет 41,41 км^2. Дельты выдвижения, сформированные р. Белой, в настоящее время имеют общую площадь 25,22 км^2; из них 19,82 км^2 расположено в изолированной Тщикской чаше, а 5,40 км^2 — в Краснодарской. Дельта выдвижения Пшиша охватывает площадь 9,32 км^2, при этом за 2004–2018 гг. площадь дельты увеличилась вдвое. Образовавшиеся устьевые участки сократили площадь зеркала Краснодарского вдхр. за период его эксплуатации (с учётом отторгнутой Тщикской чаши) на 35 %.

Заиление

Изменения тела заиления за период между батиметрическими съёмками 2004–2005 гг. и 2016 г. отражены на рис. 3. Наибольшее увеличение толщины тела заиления (4–8 м и более) отмечено в пределах устьевого взморья р. Кубани на левобережной пойменной террасе затопленной долины. Значительно увеличилась толщина тела заиления в устье р. Пшиш — до 1,5−2 м. На большей части анализируемой акватории заиление не превышает при среднем значении 0,36 м.

[1] Указано направление ветра, принятое в метеорологии

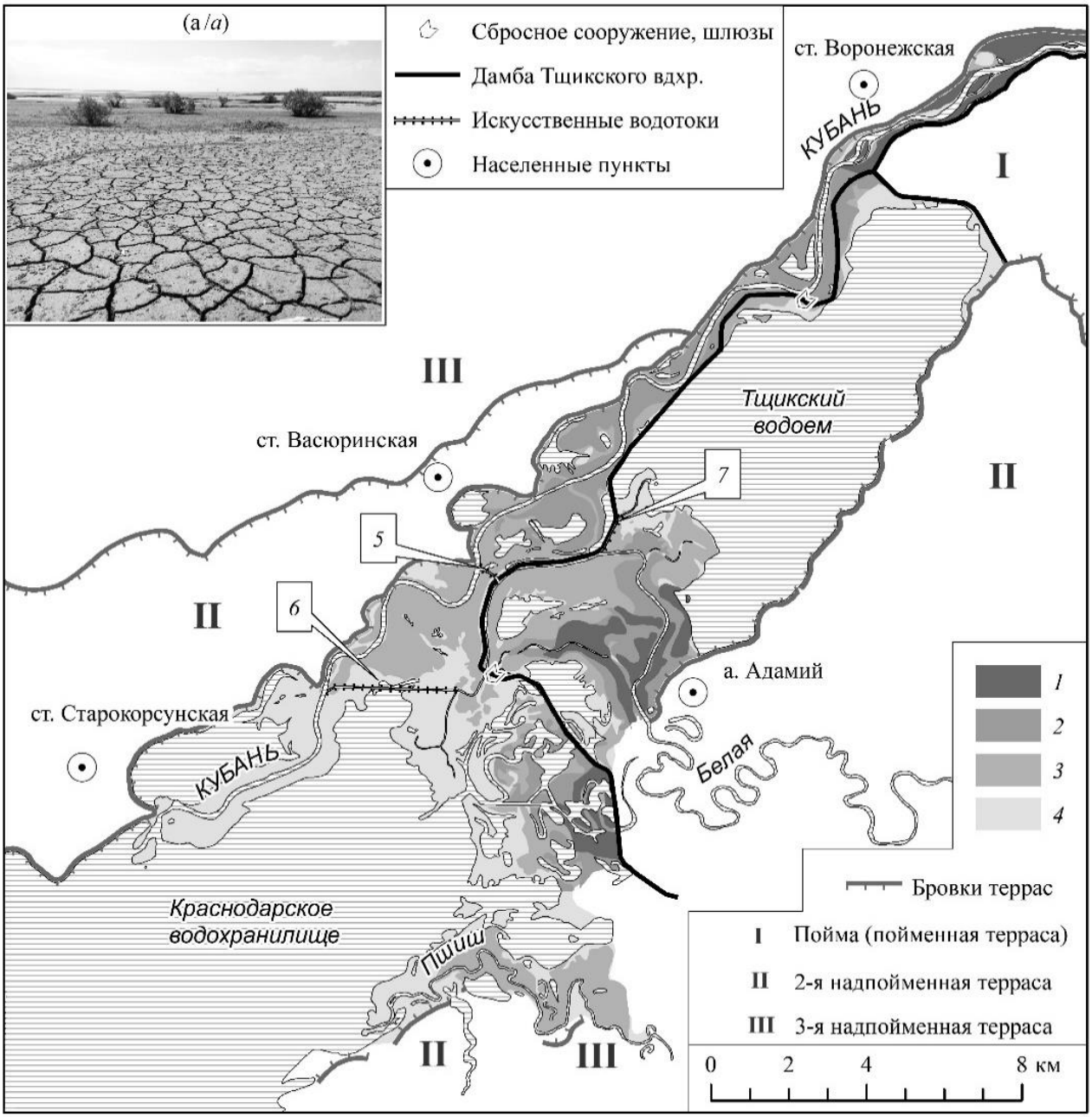


Рис. 2. Динамика развития устьевых областей рек Краснодарского вдхр. в 1977 г. (1), 1992 г. (2), 2004 г. (3) и 2018 г. (4). Искусственные водотоки: 5 — отвод из р. Белой в р. Кубань, построенный в 2004 г., 6 — отвод из р. Белой в р. Кубань, построенный в 2013 г., 7 — канал из р. Белой в Тщикское вдхр., построенный в 1990 г. Урез воды — НПУ (33.65 м БС в 1977 г. и 1992 г., 32.75 м в 2004 г. и 2018 г.). Во врезке (а) — такыровидные поверхности в обнажённых понижениях эфемерных озёр

Fig. 2. Dynamics of the estuarine areas of the Krasnodar Reservoir rivers in 1977 (1), 1992 (2), 2004 (3) and 2018 (4). Artificial watercourses: 5 — the outlet cutoff from the Belaya river to the Kuban river built in 2004, 6 — the cutoff from the Belaya river to the Kuban river built in 2013, 7 — the outlet cutoff from the Belaya river to the Tshchik Reservoir built in 1990. The water edge is the normal headwater level (33.65 m in 1977 and 1992, 32.75 in 2004 and 2018). Sidebar (a) shows takyr-like surfaces in the exposed depressions of ephemeral lakes

Циркуляция водных масс

Сведения о промерных галсах по данным батиметрической съёмки 2016 г. и сопутствующих метеорологических и эксплуатационных условиях даны в табл. 1. При воздействии на поверхность водоёма северо-восточных и восточных ветров в водохранилище формируется циклоническая циркуляция со стоковым течением вблизи правого (северного) берега. На рис. 4а приведён профиль с векторами скоростей, осреднёнными по 30 ансамблям. Съёмка по галсу выполнялась 11.07.2016 при восточном ветре скоростью до 3 м/с. Отчётливо видно, что в поперечном профиле выделяются два разнонаправленных потока. Правый поток, формирующийся под влиянием стока Кубани и сброса из Краснодарского гидроузла, по нашим расчётам имеет суммарный расход воды 1714 м^3/с, среднее направление на юго-запад (азимут 229°) и среднюю скорость 0,04 м/с; левый поток характеризуется расходом 830 м^3/с, направлением на восток (азимут 84°) и скоростью 0,01 м/с. Сброс воды из водохранилища 11.07.2016 составил 930 м^3/с. Расход стокового течения, превышающий в 2 р. общую притóчность в водохранилище, объясняется вовлечением в речную струю водных масс водоёма [*Михайлов*, 1997]. Скорости обоих потоков уменьшаются с приближением к продольной оси водоёма — оси циркуляции. Профиль интенсивности обратного рассеяния, показывающего концентрацию взвешенных частиц в воде, свидетельствует о высоком градиенте между приповерхностным слоем до 1,4 м и более глубокими слоями (рис. 4).

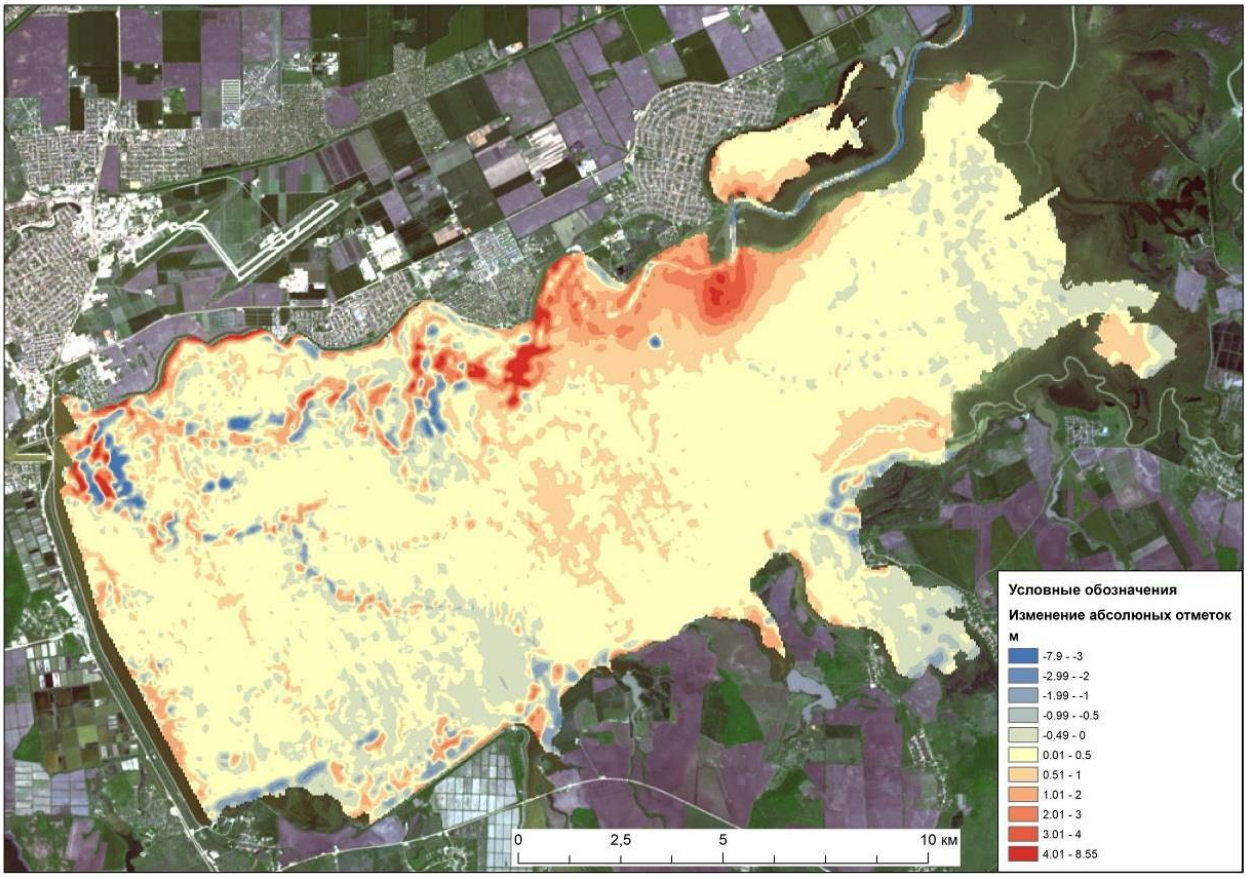
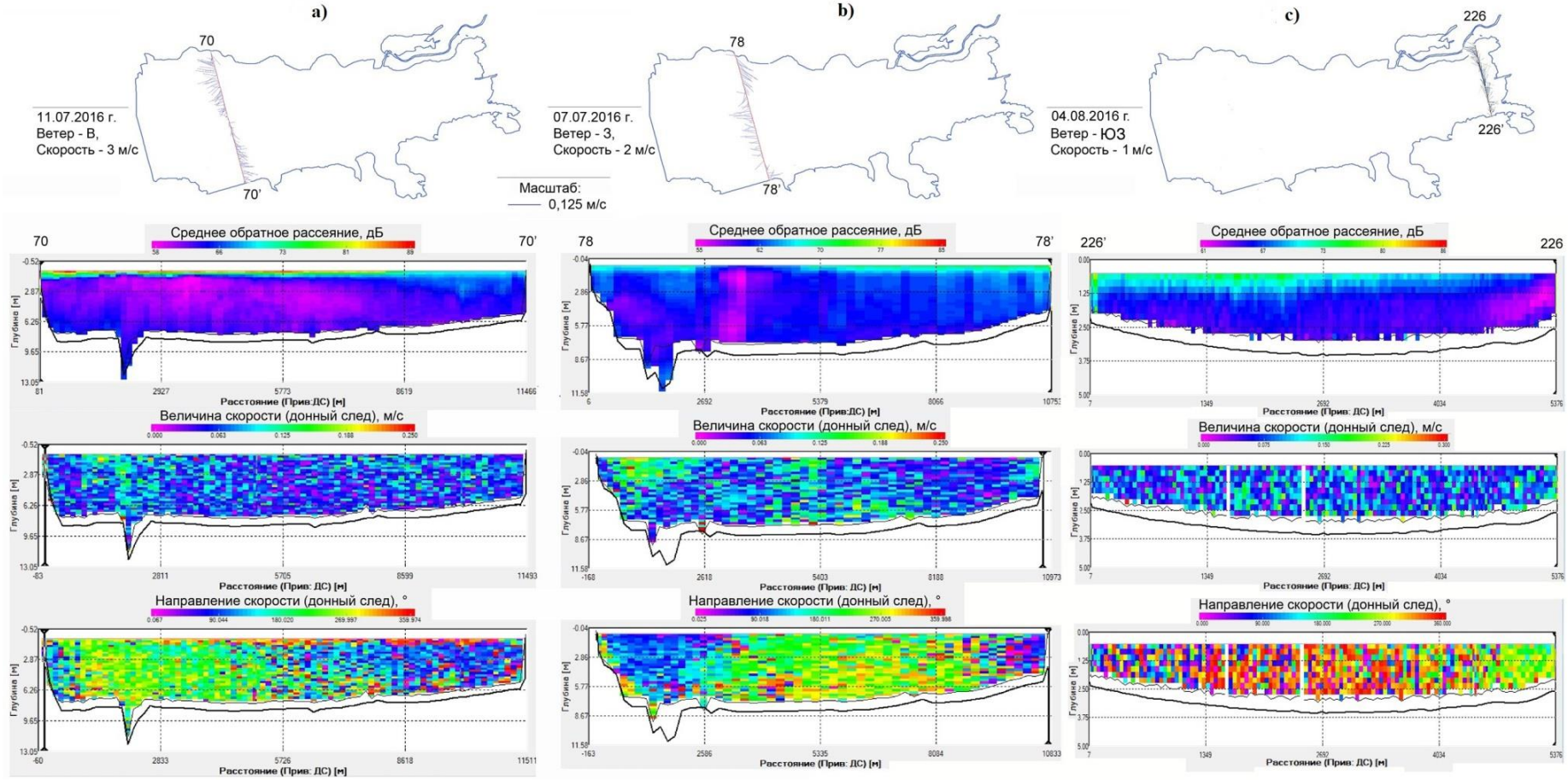


Рис. 3. Приращение тела заиления Краснодарского водохранилища за период 2005–2016 гг.
Fig. 3. The increment of the siltation body of the Krasnodar Reservoir for the period 2005–2016



а *б* *в*

Рис. 4. Поперечные профили интенсивности обратного рассеяния (концентрация взвешенных частиц), скорости и направления течения (векторы скорости) вдоль промерных галсов № 70 (а), 78 (б), 226 (в)
Fig. 4. Cross-sectional profiles of the intensity of backscattering (concentration of suspended particles), velocity and direction of flow (vectors of velocity) along the transects No 70 (a), 78 (b), 226 (c)

При западном ветре, как показали данные измерений 07.07.2016, формируется иная схема течений, а именно наблюдается отклонение стокового течения от правого берега к осевой части водоёма (рис. 4 б). Съёмка по промерному галсу № 78 выполнялась при западном ветре скоростью до 2 м/с. В анализируемом профиле выделяются три участка циркуляции водных масс. Течение в центральной части имеет расход воды 1930 м^3/с, с господствующим движением водной массы на юго-запад (азимут 248°) со средней скоростью 0,03 м/с. Стоковая струя оттеснена от правого берега вглубь водоёма течением в восточном направлении (азимут 106°) с расходом 732 м^3/с и средней скоростью 0,03 м/с. У левого берега формируется течение, противоположное стоковому, с расходом воды 262 м^3/с. Наибольшие измеренные скорости течения при такой схеме циркуляции отмечены в центральной части стокового течения, а также в местах впадения рек.

Сброс из водохранилища 07.07.2016 составил 930 м^3/с, что сопоставимо с суммарным расходом по створу; это отражает наличие определённой схемы течений в конкретных условиях, а именно стоковой струи и образуемых ею и западным ветром циркуляций водных масс. Косвенно на это также указывают пониженные значения интенсивности обратного рассеяния, наблюдаемые по всей толще воды на расстоянии около 3 км от правого берега (рис. 4 б). Причина — вытеснение взвешенных частиц из осевого участка циркуляции под действием центростремительной силы. Высокие вертикальные градиенты интенсивности обратного рассеяния между приповерхностным слоем (до 1,4 м) и более глубокими слоями отмечены во всех случаях.

Распределение осреднённых по вертикали скоростей течения подтверждает локализацию стокового течения с выраженным движением на восток вдоль правого (северного) берега водоёма (рис. 5). Максимальные скорости (более 0,5 м/с) наблюдаются в устьях рр. Кубани и Пшиша. В осевой и приплотинной части акватории скорости не превышают 0,05 м/с, в некоторых случаях понижаясь до 0,01 м/с. На рис. 5 б показано распределение осреднённой по вертикали широтной составляющей скорости течения (U) в условиях ветрового воздействия на динамику водных масс в ходе съёмки. Как видим, при восточном ветре (это направление имеет повышенную частоту в течение всего года) [Справочник…, 1967] в водоёме наблюдается циклоническая циркуляция: вдоль правого берега водные массы перемещаются преимущественно на запад (векторы 180−360°), вдоль левого — на восток (0−180°).

Наконец, анализ гидродинамики дополним построенной схемой распределения скоростей движения водных масс в устьевой области р. Кубани (рис. 7), иллюстрирующей процессы формирования течений с большей детализацией, и, главное, отражающей гидрологические условия формирования дельты и устьевого конуса выноса. Устьевые области Кубани и Белой вследствие высокой доли аккумулирующихся здесь наносов играют ключевую роль в трансформации водохранилища. В поле осреднённых по вертикали скоростей течения на участке устьевого взморья р. Кубани выделяются две составляющих гидродинамического процесса. В первом случае поток рассредоточивается на участке устьевого взморья, во втором — отмечается направленное струйное движение воды в затопленном русле р. Кубани (рис. 7). Судя по нашим измерениям, кинетическая энергия речной струи Кубани затухает на расстоянии 1,5−2,0 км от вершины дельты, что характеризует способность струи перемещать наносы в пределах устьевого бара.

Обобщённые схемы стоково-ветровой циркуляции в Краснодарском водохранилище при преобладающей широтной циркуляции воздуха показаны на рис. 6.

Непрерывное преобразование аккумулятивных форм в устьевых областях является отражением особенностей гидродинамики. Применительно к дельте Кубани это относится как к эволюции самой дельты, так и к сопутствующим формам (бары, валы и пр.) (рис. 8), образующимся при переменном подпоре. В процессе эволюции аккумулятивный конус

выноса р. Кубани в 2005–2016 гг. продвигался в чаше водохранилища в сторону плотины со скоростью примерно 0,62 км/год, менявшейся в разные этапы дельтоформирования. На начальном этапе дельта формировалась в условиях узкого залива эстуарного типа, что обеспечивало высокую скорость её образования. В дальнейшем с ростом длины самого русла, снижением уклона водной поверхности и скоростей течения увеличилась доля наносов, осаждающихся в пределах самой дельты. Как следствие, это привело к переходу в стадию дельты выдвижения (рис. 8).

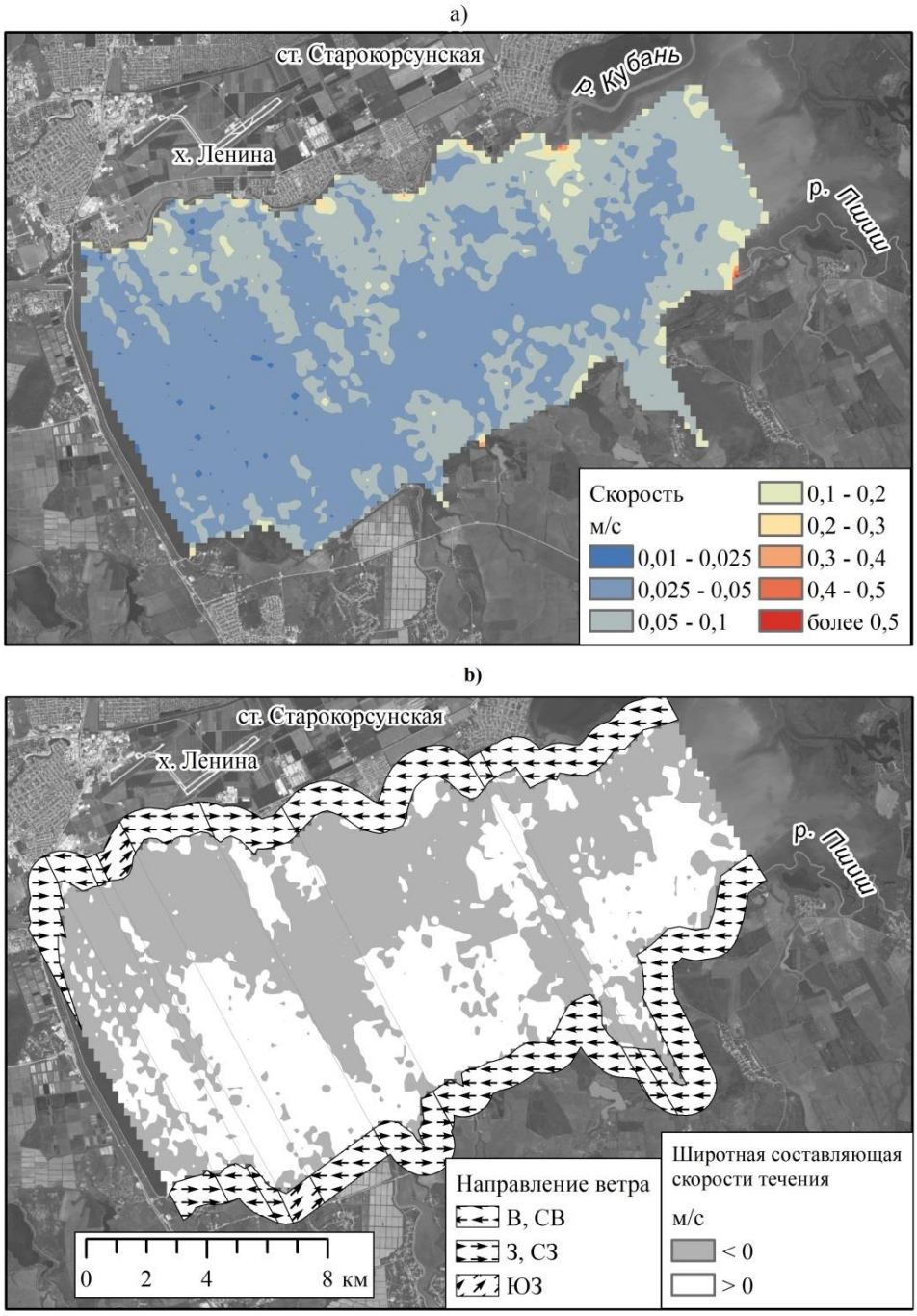


Рис. 5. Распределение осреднённых по вертикали абсолютной величины (a) и широтной составляющей (b) скорости течения
Fig. 5. Distribution of vertical averaged absolute values (a) and latitudinal component (b) of the water flows velocity

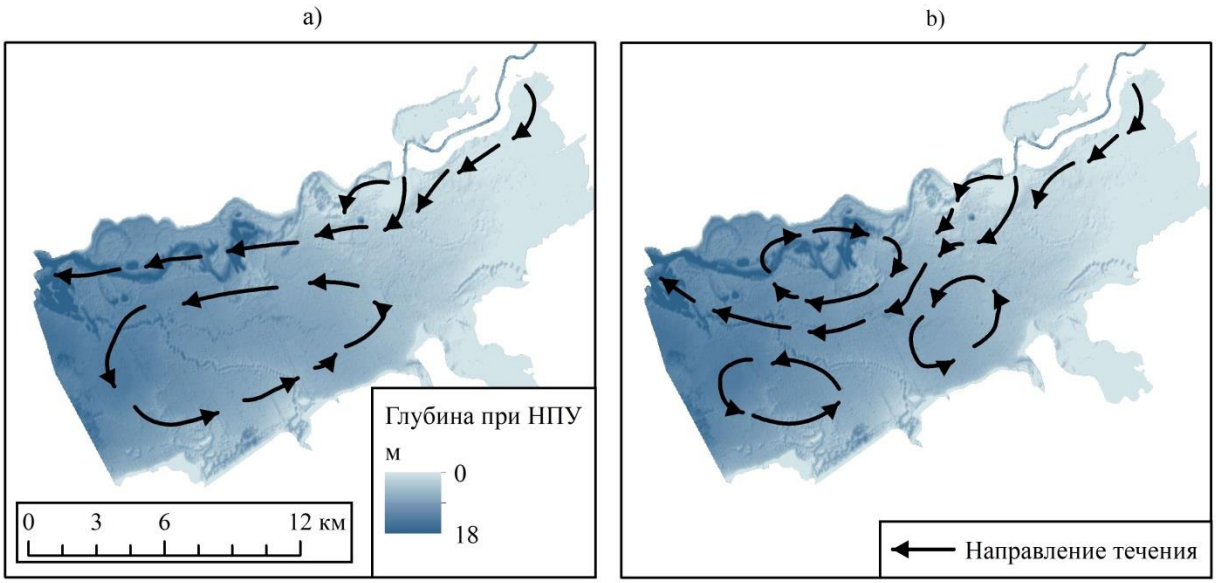


Рис. 6. Циркуляция водных масс Краснодарского водохранилища при восточных (a) и западных (b) ветрах
Fig. 6. Circulation of the water masses of the Krasnodar reservoir with eastern (a) and western (b) winds

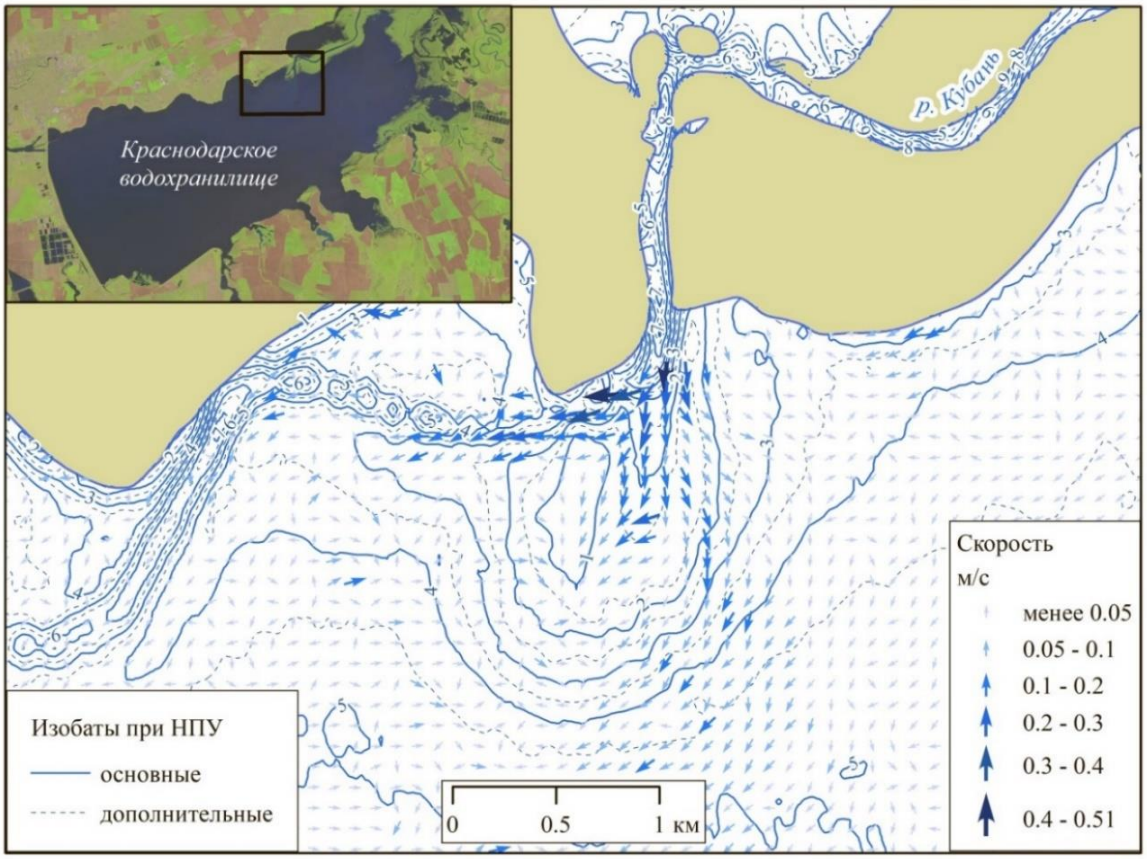


Рис. 7. Векторы осреднённой по вертикали скорости течения. Устьевое взморье р. Кубани. 06.08.2019 – 09.08.2019
Fig. 7. Vectors of vertical averaged flow velocity. Avandelta of the Kuban River. 06.08.2019 – 09.08.2019

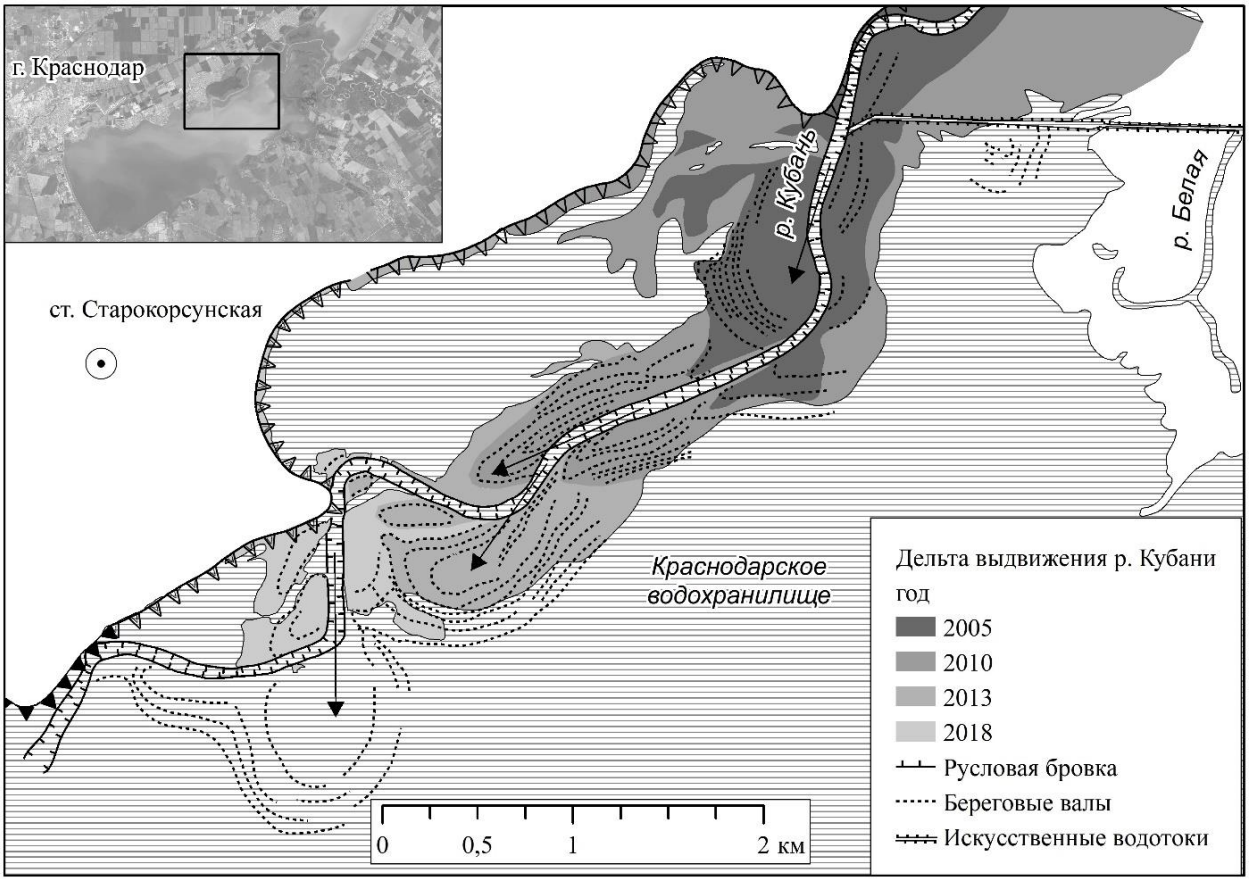


Рис. 8. Развитие дельты выдвижения р. Кубани с 2005 г.
Стрелками указано направление выгибания устьевых баров
для различных конфигураций русла впадающей реки
и положения береговой линии приемного водоёма
Fig. 8. The evolution of the advanced delta of the Kuban River since 2005.
The arrows indicate the direction of curvature of the estuary bars
for various configurations of the channel of the inflowing river
and the position of the coastline of the receiving reservoir

ВЫВОДЫ

Наблюдаемая трансформация пойменно-долинного Краснодарского вдхр. на фоне процессов заиления сопровождается уменьшением площади (в течение 1973–2018 гг. сократилась на 35 %), объёма (при НПУ на площади 229 млн км^2 за 1973–2016 гг. сократился на 83,2 млн м^3) и средней глубины (при НПУ уменьшилась на 0,36 м). Раскрытие механизмов трансформации и особенностей отложения наносов требует анализа циркуляции водных масс в связи со стоковым и ветровым факторами циркуляции.

Анализ циркуляции водных масс, выполненный по данным акустического доплеровского измерителя течений ADCP в июле–августе 2016 г., показал, что в поперечном профиле в водохранилище действуют два разнонаправленных потока: правый, формирующийся под влиянием стока Кубани, имеет расход 1714 м^3/с, среднее направление на юго-запад и среднюю скорость 0,04 м/с; левый поток с расходом 830 м^3/с направлен на восток со средней скоростью 0,01 м/с. Скорости потоков уменьшаются с приближением к оси циркуляции. При устойчивом западном ветре отмечено отклонение стокового течения от правого берега к осевой части водоёма.

На местном уровне в устьевой области р. Кубани зафиксированы два основных гидродинамических процесса: на участке устьевого взморья струйный поток

рассредоточивается, а в затопленном русле р. Кубани отмечено направленное струйное движение воды, затухающее на расстоянии 1,5–2,0 км от вершины дельты.

Эволюция основных и сопутствующих аккумулятивных форм в устьях впадающих в водохранилище рек отражает особенности местной гидродинамики и её временную изменчивость. Дельта Кубани в своём развитии эволюционировала от дельты выполнения ингрессионного залива до дельты выдвижения с изменениями скорости выдвижения аккумулятивного конуса от 1,03 км/год (1977–1992 гг.) до 0,57 км/год (2005–2018 гг.).

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № МФИ-20.1/123.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was carried out with the financial support of the Kuban science Foundation in the framework of the scientific project № МФИ-20.1/123.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авакян А.Б., Шарапов В.А.* Водохранилища гидроэлектростанций СССР. М.: Энергия, 1977. 398 с.
2. *Курбатова И.Е.* Мониторинг трансформации Краснодарского водохранилища с использованием спутниковых данных высокого разрешения. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014. Т. 11. № 3. С. 42–53.
3. *Лагута А.А., Погорелов А.В.* Особенности заиления Краснодарского водохранилища. Опыт оценки по данным батиметрических съёмок. Географический вестник, 2018. № 4 (47). С. 54–66. DOI: 10.17072/2079-7877-2018-4-54-56.
4. *Лагута А.А., Погорелов А.В.* Изменение морфометрических характеристик Краснодарского водохранилища за период эксплуатации (1973–2018 годы). ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2019. Т. 25. Ч. 2. С. 5–15. DOI: https://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-2-25-5-15.
5. *Лурье П.М., Панов В.Д., Ткаченко Ю.Ю.* Река Кубань: гидрография и режим стока. СПб.: Гидрометеоиздат, 2005. 500 с.
6. *Михайлов В.Н.* Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС, 1997. 171 с.
7. *Серебряный А.Н., Кацнельсон Б.Г., Тарасов Л.Л., Ужанский Э., Островский И.* Новые результаты измерений системы течений и внутренних волн в Галилейском море. Доклады XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещённой с XXXI сессией Российского Акустического Общества. М.: ГЕОС, 2018. С. 255–258.
8. Справочник по климату СССР. Вып. 13. Ч. III. Ветер. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 332 с.
9. *Vermeyen T.B.* Acoustic doppler current profiler measurements near the proposed Southern Nevada Water System Intake No 3, Lake Mead, Nevada. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Hydraulic Investigations and Laboratory Services Group. Denver, Colorado, 2009. 45 p.
10. *Vermeyen T.B., Wahl T.* Experiences using acoustic doppler current profilers (ADCP) for physical model calibrations. Proceedings of the 3rd International Symposium on Ecohydraulics, Salt Lake City, Utah, 1999. P. 44–60.
11. WinRiver II. Software user's guide. Teledyne RD Instruments, 2018. 296 p.

REFERENCES

1. *Avakyan A.B., Sharapov V.A.* Reservoirs of hydroelectric power plants of the USSR. Moscow: Energy, 1977. 398 p. (in Russian).

2. Handbook of the climate of the USSR. Iss. 13. Part III. Wind. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967. 332 p. (in Russian).
3. *Kurbatova I.E.* Monitoring the transformation of the Krasnodar Reservoir using high-resolution satellite data. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2014. V. 11. No 3. P. 42–53 (in Russian).
4. *Laguta A.A., Pogorelov A.V.* Peculiarities of Krasnodar water reservoir silting. Evaluation based on the data of bathymetric surveys. Geographical Bulletin, 2018. No 4 (47). P. 54–66. DOI: 10.17072/2079-7877-2018-4-54-66 (in Russian).
5. *Laguta A.A., Pogorelov A.V.* Change of morphometric characteristics of the Krasnodar Water Reservoir for the period of its operation (1973–2018). InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2019. V. 25. Part 2. P. 5–15. DOI: https://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-2-25-5-15 (in Russian, abs English).
6. *Lurie P.M., Panov V.D., Tkachenko Yu.Yu*. Kuban River: hydrography and flow regime. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2005. 500 p. (in Russian).
7. *Mikhailov V.N.* Hydrological processes in river mouths. Moscow: GEOS, 1997. 171 p. (in Russian).
8. *Serebryaniy A.N., Kacnel'son B.G., Tarasov L.L., Uzhanskij E, Ostrovskiy I.* New results of measurements of the system of currents and internal waves in the Sea of Galilee. Reports of the XVI academic seminar named after academician L.M. Brekhovsky's "Acoustics of the Ocean", combined with the XXXI session of the Russian Acoustic Society. Moscow: GEOS, 2018. P. 255−258 (in Russian).
9. *Vermeyen T.B.* Acoustic doppler current profiler measurements near the proposed Southern Nevada Water System Intake No 3, Lake Mead, Nevada. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Hydraulic Investigations and Laboratory Services Group. Denver, Colorado, 2009. 45 p.
10. *Vermeyen T.B., Wahl T.* Experiences using acoustic doppler current profilers (ADCP) for physical model calibrations. Proceedings of the 3rd International Symposium on Ecohydraulics, Salt Lake City, Utah, 1999. P. 44–60.
11. WinRiver II. Software user's guide. Teledyne RD Instruments, 2018. 296 p.

УДК: 528.88, 556.513 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-349-365**

А.У. Чымыров[1], Д.Т. Чонтоев[2], Б.М. Жакеев[3]

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА НА ОСНОВЕ ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПРИ УТОЧНЕНИИ ГРАНИЦ БАССЕЙНОВ РЕК В КОТЛОВИНЕ ОЗЕРА ИССЫК-КУЛЬ

АННОТАЦИЯ

Важность данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в различных научно-практических исследованиях, в том числе гидрологии, сегодня возрастает. Новые глобальные цифровые модели рельефа (ЦМР) на основе данных космической съёмки служат в качестве основных исходных материалов в гидрологических научных исследованиях из-за их открытости или низкой стоимости, возрастающей точности и улучшения пространственного разрешения. Целями данной работы являются исследование возможностей глобальных цифровых моделей рельефа на основе AW3D30, ASTER GDEM V003 и SRTMGML1 с 30 м пространственным разрешением в моделировании бассейнов рек и оз. Иссык-Куль в Кыргызстане и их сравнительный анализ. Топографические карты района исследований были использованы в качестве источников проверочных данных при анализе их пространственной точности. Было также изучено влияние высот опорных точек над уровнем моря на точность и достоверность моделей в условиях высокогорья. При определении площади бассейна озера были применены системы координат UTM, СК-42, Kyrg-06 и равновеликая коническая проекция Альберса. Результаты исследования показали, что ЦМР на основе AW3D30 имеет более высокую точность по сравнению с другими моделями и может быть успешно использована в моделировании бассейнов рек в горных условиях. Площади водосборов рр. Джергалан и Тюп также были смоделированы и рассчитаны на основе AW3D30, ASTER GDEM V003 и SRTMGML1. Полученные данные по границам и площадям бассейнов рек Иссык-Кульской котловины указывает на необходимость дальнейшего их уточнения на основе современных данных ДЗЗ с учётом разностей используемых моделей геоида/квазигеоида и проверочных высот опорных точек, определённых с применением спутникового позиционирования и методов нивелирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЦМР, AW3D30, ASTER GDEM V003, SRTMGL1, бассейн

[1] Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры имени Н. Исанова, ул. Малдыбаева, д. 34 б, 720020, Бишкек, Кыргызская Республика; *e-mail:* **chymyrov@gmail.com**
[2] Национальная академия наук Кыргызской Республики, Институт водных проблем и гидроэнергетики, ул. Фрунзе, д. 533, 720033, Бишкек, Кыргызская Республика; *e-mail:* **iwp@istc.kg**
[3] Национальная академия наук Кыргызской Республики, Институт водных проблем и гидроэнергетики, ул. Фрунзе, д. 533, 720033, Бишкек, Кыргызская Республика; *e-mail:* **iwp@istc.kg**

Akylbek U. Chymyrov[1], **Dogdurbek T. Chontoev**[2], **Bakyt M. Zhakeev**[3]

CREATION OF THE DIGITAL RELIEF MODELS BASED ON OPEN REMOTE SENSING DATA FOR IMPROVEMENT THE BORDERS OF RIVER BASINS IN THE ISSYK-KUL LAKE CAVITY

ABSTRACT

The importance of Remote Sensing (RS) in various scientific and practical studies, including hydrology, is increasing today. New Global Digital Elevation Models (DEM), based on satellite imagery, serve as the main resources in hydrological research due to their openness or low cost, increasing accuracy and improved spatial resolution. The main aims of this work are study the capabilities of Global DEMs based on AW3D30, ASTER GDEM V003 and SRTMGML1 with 30 m spatial resolution in modeling basins of rivers and Issyk-Kul Lake in Kyrgyzstan and their comparative analysis. Topographic maps of the study area were used as sources of verification data when analyzing their spatial accuracy. The influence of the reference point heights above sea level on the accuracy and reliability of the models in high mountainous conditions was also studied. UTM, SK-42, Kyrg-06 and the Albers Equal-Area Conic coordinate systems were used in calculations of the lake basin area. The results of the study showed that the AW3D30 DEM has higher accuracy compared to other models and can be successfully used in modeling river basins in mountainous areas. The catchment areas of the Dzhergalan and Tyup rivers were modeled and calculated based on AW3D30, ASTER GDEM V003 and SRTMGML1 DEMs. The research results on boundaries and areas of the river basins in the lake depression indicate the need for further refinement based on modern remote sensing data, taking into account the differences in the geoid/quasigeoid models used and the reference point heights determined using satellite-based positioning and leveling methods.

KEYWORDS: DEM, AW3D30, ASTER GDEM V003, SRTMGL1, basin

ВВЕДЕНИЕ

Информация о рельефе местности необходима при реализации различных проектов, а также при ортотрансформировании данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Важнейшими источниками такой информации являются цифровые модели местности (ЦММ) и рельефа (ЦМР). ЦММ представляют собой точные данные о высоте земной поверхности, включая здания, растительность и др. высотные объекты, а ЦМР содержат информацию о высоте непосредственно поверхности земли. Глобальные ЦМР и ЦММ строятся в основном по данным стереоскопической оптической и интерферометрической радиолокационной космической съёмки.

Существует большое количество глобальных моделей рельефа на основе бесплатных или коммерческих данных дистанционного зондирования Земли, такие как GMTED2010, ASTER GDEM2, SRTM C-band, SRTM X-band, SPOT DEM, NextMap World 30, TanDEM-X Global DEM, World 3D Topographic Data, WorldDEM и др. В данном исследовании для моделирования и уточнения бассейнов рек были использованы ЦМР на основе спутниковых снимков, размещённые в открытом доступе, к которым относятся

[1] Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov, Maldybaev str., 34 b, 720020, Bishkek, Kyrgyz Republic; *e-mail:* **chymyrov@gmail.com**
[2] National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic, Institute of Water Problems and Hydropower, Frunze str., 533, 720033, Bishkek, Kyrgyz Republic; *e-mail:* **iwp@istc.kg**
[3] National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic, Institute of Water Problems and Hydropower, Frunze str., 533, 720033, Bishkek, Kyrgyz Republic; *e-mail:* **iwp@istc.kg**

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) и ALOS (Advanced Land Observing Satellite).

Имеется ряд исследований по использованию и анализу различных ЦМР на основе данных космический съёмки. Изучение имеющихся сравнительных исследований разных цифровых моделей рельефа показали, что сопоставление данных различных исследований усложняется в связи с разными версиями сравниваемых ЦМР, разными видами проверочных данных, разными типами ландшафтов и землепользования, а также разностью методики оценки пространственной точности моделей. Некоторые исследования показали, что новая версия SRTM v3.0 может иметь сравнительно высокую горизонтальную и вертикальную точность, по сравнению с ЦМР на основе ASTER [*Мальцев и др.,* 2018; *Patel и др*., 2016; *Drisya, Kumar*, 2016]. Исследования по сравнению ЦМР на основе AW3D30 с др. моделями показывают её относительно высокую горизонтальную и вертикальную точность в сопоставлении с моделями на основе данных SRTM и ASTER соответствующего пространственного разрешения [*Jain et al*., 2018; *Козуб,* 2018; *Courty et al*., 2019; *Жусупов и др*., 2019; *Tavares da Costa et al*., 2019].

В горных условиях спутниковые радарные снимки имеют свои недостатки, которые обусловлены неразмеченными пикселями (voids или NoData) и искажениями из-за влияния горных вершин на результаты наклонной съёмки со спутников, постоянной облачности и сильным влиянием наклона и экспозиции поверхности, ущелий, речной сети и дорог. Каждая спутниковая система имеет свои особенности, которые зависят от местоположения определённого района изучения и требуют тщательного исследования для каждого случая [*Семакова*, 2015; *Fujita et al*., 2008; *Kolecka, Kozak*, 2014; *Yue et al.,* 2017].

С учётом многогранного характера управления водными ресурсами мира многие страны и регионы внедряют интегрированный подход в управление водными ресурсами на бассейновом уровне. Это способствует более эффективной реализации принципов интегрированного управления водными ресурсами в бассейнах рек, озёр и водоносных формаций[1] [*Орифов*, 2019; *Савина*, 2014].

Объектом настоящего исследования является Иссык-Кульская котловина в Кыргызстане, которая с севера и юга ограничена хребтами Кунгей и Тескей Ала-Тоо, имеет длину с востока на запад около 240 км, ширину 100 км. Центральную часть котловины занимает оз. Иссык-Куль. Озеро расположено на высоте 1608 м н.у.м., площадь озера — 6247 км^2, глубина — 668 м, длина — 177 км, ширина — 60 км. В бессточное озеро впадает до 80 больших и сравнительно небольших притоков; из них наибольшими являются рр. Джергалан и Тюп, впадающие с востока. Питание рек бассейна озера смешанное, с преобладанием талого стока — снегового и ледникового [*Романовский и др*., 2005; *Маматканов и др*., 2006].

Озеро окружено равниной, узкая береговая полоса покрыта песком, реже галечником, местами сложена сцементированным песчаником, на отдельных участках заболочена. Равнина простирается на 40−50 км восточнее озера по долинам рр. Тюп и Джергалан. На северном берегу её ширина от 1 до 10 км, на западном — 10−15 км. Длина хр. Кунгей Ала-Тоо — 280 км. Гребень хребта расположен на высоте 3800−4000 м н.у.м. Высшая точка — г. Чоктал (4771 м). Центральная часть хребта лежит выше снеговой линии, поэтому здесь встречаются небольшие снежники и ледники. Длина хр. Тескей Ала-Тоо — 350 км; его высокая часть расположена в верховьях рр. Ак-Суу и Кара-Кёль, где сосредоточено много ледников. К югу от Тескей Ала-Тоо преобладают волнистые пространства в окружении хребтов, покрытых вечными снегами и ледниками [*Маматканов и др.,* 2006].

[1] Водный Кодекс Кыргызской Республики (№ 8 от 12 января 2005 г.)

Самый крупный приток озера — р. Жыргалан со своими притоками формирует сток в восточной части северного склона хр. Тескей Ала-Тоо на водосборе площадью 2070 км^2 [*Романовский и др.,* 2005]. Протекая по этому склону, который переходит в длинную пологую предгорно-приозёрную равнину, река впадает в одноимённый залив. Её крупные притоки Тургон, Ак-Суу, Бозучук, Жергез и Ак-Суу (Арашан) по своей водности сопоставимы с другими самостоятельными реками бассейна. Суммарный среднегодовой расход воды речной системы Джергалана составляет 21,4 м^3/сек., принося при этом в озеро 17 % всего годового притока (0,67 км^3/год).

Вторая по величине река Тюп, протекающая севернее Джергалана, также впадает в озеро на востоке котловины. Её верховья начинаются на склоне Тескей Ала-Тоо, но значительные её правые притоки — Шаты, Кёчю, Талды-Суу, Корумду, Табылгыты — формируются на южных склонах Кюнгей Ала-Тоо. Вклад реки в годовой приток в озеро оценивается в 9 % (0,35 км^3/год).

Основной целью данного исследования является уточнение границ и площадей водосбора рр. Тюп, Джергалан и оз. Иссык-Куль с применением современных ЦМР. В настоящее время в научных исследованиях и в решении прикладных задач используется площадь бассейна оз. Иссык-Куль, равная 22080 км^2, р. Джергалан — 2070 км^2 и р. Тюп — 1180 км^2 [*Романовский* и др., 2005]. Имеющиеся границы и площади водосборных бассейнов были определены по результатам обработки аналоговых картографических материалов с использованием традиционных методов фотограмметрии и требуют уточнения. Данные дистанционного зондирования Земли и полученные на их основе современные ЦМР позволяют моделировать бассейны рек с целью их уточнения и расчёта площадей с использованием геоинформационных систем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Важнейшими источниками пространственной информации в гидрологических исследованиях сегодня являются цифровые модели рельефа (ЦМР). Данные разных систем дистанционного зондирования Земли были выбраны в качестве основного источника для сравнительного изучения в районе исследований, ограниченного по широте от 41°24'45,3"с.ш. до 43°00'15,9"с.ш. и по долготе от 74°59'46,7"в.д. до 79°37'01,1"в.д. (рис. 1).

Основной характеристикой цифровых моделей рельефа на основе данных дистанционного зондирования Земли, определяющей точность моделирования морфометрических особенностей местности, является ошибка определения абсолютной высоты. Имеются много сравнительных исследований ошибок определения абсолютных высот разных цифровых моделей рельефа, но сопоставление данных различных исследований усложняется в связи с разными версиями сравниваемых ЦМР, разными видами проверочных данных, разными типами ландшафтов и землепользования, а также разностью методики оценки ошибок высот.

Цифровые модели рельефа (ЦМР) района исследований были смоделированы на основе мозаики сцен из снимков AW3D30 и новых версий ASTER и SRTM. Сопоставлять данные различных исследований довольно сложно из-за использования разных версий тестируемых ЦМР, разных видов проверочных данных, разных типов ландшафтов и растительности тестируемых участков, а также разной методики оценки ошибок высот. В данной работе в качестве проверочных данных были использованы отметки 2640 точек, определённые на 15 топографических картах масштаба 1: 100 000 на район исследований, расположенный в высокогорном регионе Центральной Азии.

Данные SRTM получены в результате Международного исследовательского проекта Национального управления Соединённых Штатов Америки по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (NASA), Национального агентства геопространственной разведки США (NGA), Итальянского космического агентства (ASI)

и Германского центра авиации и космонавтики (DLR). Многоразовый космический корабль Shuttle «Endeavour» с сенсорами SIR-C/X-SAR (Shuttle Imaging Radar — type C / X-band Synthetic Aperture Radar) проводил измерения в трёх каналах микроволн (L, C и X) в феврале 2000 г. Сенсор X-SAR собрал данные высокого разрешения (1 угловая секунда или примерно 30 м на местности), которые позволили создать модель SRTM-X DEM на основе данных канала X. Их получение стало возможным с 2010 г. через FTP службы of DLR. Новая версия SRTM (Version 3.0 — SRTMGL1) в формате GeoTIFF доступна с января 2015 г. через веб-портал Геологической службы США (USGS) для геопространственных данных[1].

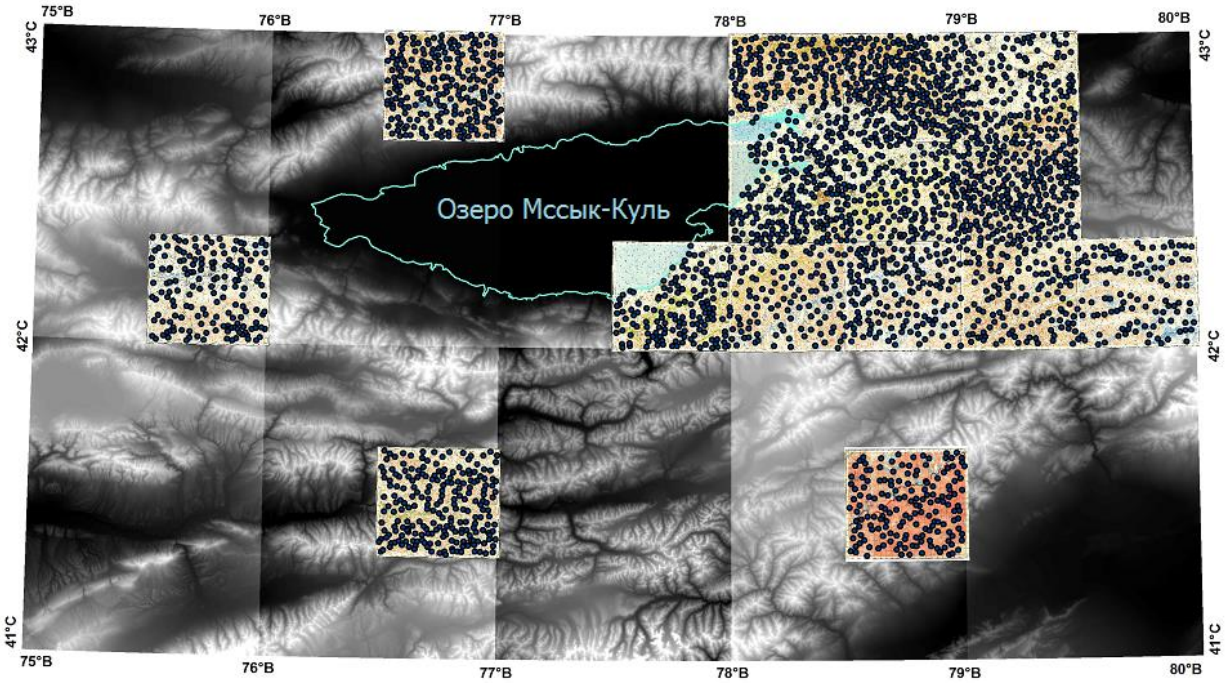


Рис. 1. Снимки ASTER для района исследований с топографическими картами и опорными точками
Fig. 1. ASTER scenes for the study area with topographic maps and reference points

Сенсор ASTER был разработан совместно Министерством экономики, торговли и промышленности Японии (METI) и NASA. Он запущен на борту спутника NASA Terra в декабре 1999 г. Сенсор имеет возможность стереоскопической съёмки вдоль полосы пролёта с помощью двух телескопов, снимающих в надир и назад в ближнем инфракрасном диапазоне с отношением база-высота (base-to-height ratio) — 0,6. Пространственное разрешение в плане — 15 м. Одна сцена ASTER в видимом или ближнем инфракрасном диапазоне имеет размер 4100 на 4200 элементов, что соответствует 60x60 км на поверхности Земли. Первая версия ASTER GDEM была представлена в свободном доступе в 2009 г. Данные высот поверхности Земли между 83°с.ш. и 83°ю.ш. доступны в виде файлов сцен формата GeoTIFF с размерами 1° x 1° и разрешением, равным 1″ (угл. сек., примерно 30 м). Глобальная цифровая модель рельефа 3-ей версии 3 ASTER (GDEM V003) и наборы данных водных объектов (ASTWBD) находятся в открытом доступе с 5 августа 2019 г.[2]

[1] Электронный ресурс: https://search.earthdata.nasa.gov/search (дата обращения 10.12.2019)
[2] Электронный ресурс: http://gdemdl.aster.jspacesystems.or.jp/index_en.html (дата обращения 10.12.2019)

В мае 2015 г. Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA) выпустило открытую глобальную цифровую модель рельефа “ALOS World 3D-30m (AW3D30)” с горизонтальным разрешением по широте и долготе в 1″ (примерно 30 м). AW3D30 разработана Японским центром технологий дистанционного зондирования (RESTEC) и корпорацией NTT DATA на основе данных, полученных с японского спутника исследования Земли ALOS (Advanced Land Observing Satellite) с помощью установленной на нём оптико-электронной системы (PRISM). В свободном доступе находится продукт AW3D30 в формате GeoTIFF с размерами ячейки на местности 30 м (в коммерческой версии размер ячейки составляет 5 м)[1].

Цифровые модели рельефа (ЦМР) района исследований были смоделированы на основе мозаики сцен из материалов ALOS, ASTER и SRTM (табл. 1). Все три ЦМР имеют высоты их поверхностей, вычисленные над гравитационной моделью Земли EGM96.

Табл. 1. Использованные материалы дистанционного зондирования Земли
Table 1. Used Earth remote sensing products

Наименования спутника, сенсора и модели	**Сцены спутникового снимка**	**Разрешение, ″ /м**
Спутник ALOS, сенсор PRISM, модель ALOS World 3D-30m (AW3D30)	N041E075_AVE_DSM.tif – N041E079_AVE_DSM.tif, N042E075_AVE_DSM.tif – N042E079_AVE_DSM.tif	1/30
Спутник Терра (EOS AM-1), сенсор ASTER, модель ASTER GDEM Version 3	ASTGTMV003_N41E075_dem.tif – ASTGTMV003_N41E079_dem.tif, ASTGTMV003_N42E075_dem.tif – ASTGTMV003_N42E079_dem.tif	1/30
Многоразовый космический корабль «Индевор», миссия SRTM, модель SRTMGL1	n41_e075_1arc_v3.tif – n41_e079_1arc_v3.tif, n42_e075_1arc_v3.tif – n42_e079_1arc_v3.tif	1/30

Обработка пространственных данных была выполнена с использованием программных комплексов ArcGIS 10.4 и ENVI 5.1 с созданием баз геоданных. В качестве основной была выбрана зональная система координат WGS_1984_UTM_Zone_44N (EPSG:32644). Также была использована зональная система координат Pulkovo_1942_GK_Zone_14 (СК-42, EPSG:28413) для сравнительного анализа площадей цифровых моделей бассейна оз. Иссык-Куль с историческими данными. Площадь бассейна озера рассчитана также с использованием равновеликой конической проекции Альберса (Asia_North_Albers_Equal_Area_Conic, EPSG:102025) с минимальными искажениями площадей объектов. Результаты работы оформляются в виде тематических карт в государственной зональной системе координат Kyrg-06_TM_Zone_4 (EPSG:7695), что требуется по национальному законодательству [*Abdiev, Chymyrov*, 2013].

Перед гидрологическим моделированием необходимо анализировать каждую ЦМР с использованием инструмента «Локальные понижения» модуля «Гидрология» ArcGIS 10.4 для выявления ячеек с неопределённым направлением стока. Результаты анализа показали, что имеются локальные понижения на всех спутниковых снимках, что потребовало использования инструмента «Заполнение» этого же модуля для устранения этих недостатков растровых поверхностей. Далее направление стока с каждого пикселя изображения было определено с использованием инструмента анализа «Направление стока». Полученный слой имеет определённых кодов направления стока 1-2-4-8-16-32-64-128, что позволяет далее моделировать речную сеть и их бассейнов.

[1] Электронный ресурс: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm (дата обращения 10.12.2019)

Моделирование границ бассейнов рек района исследований выполнено с использованием инструмента «Бассейн» и речной сети с использованием инструмента «Суммарный сток» модуля «Гидрология» и инструмента пространственного анализа «Калькулятор растра» программного комплекса ArcGIS. При моделировании суммарного стока не были учтены грунтовые условия, ледниковое питание и пр. параметры для точного моделирования стока, но, тем не менее, такая модель позволяет оцифровать речную сеть с достаточно высокой точностью для дальнейшего пространственного анализа.

Оценка точности полученных цифровых моделей рельефа на основе данных дистанционного зондирования производилась в основном путём вычисления вертикальной средней квадратической ошибки — RMSE (Root Mean Square Error) и арифметической средней абсолютных величин вертикальных ошибок высот сравниваемых поверхностей в опорных точках [*Congalton, Green,* 2009]:

$$\mathrm{RMSE_v} = \sqrt{\sum_i^n (\mathrm{e_{vi}})^2/\mathrm{n}}, \quad (1)$$

где вертикальная ошибка — $e_{vi} = v_{ri} - v_{mi}$,

$\mathrm{v_{ri}}$ — относительная проверочная высота опорной i-ой точки над средним уровнем моря, определённая по топографической карте,

$\mathrm{v_{mi}}$ — высота опорной i-ой точки над средним уровнем моря на поверхности ЦМР,

n — количество опорных точек.

Альтернативной величиной при определении качества вертикальной точности также может служить арифметическая средняя абсолютных величин вертикальных ошибок

$$|\bar{\mathrm{e}}_\mathrm{v}| = \sum_i^n |\bar{\mathrm{e}}_\mathrm{vi}|/\mathrm{n}\,. \quad (2)$$

Стандартное отклонение вертикальных ошибок определяется по формуле

$$\mathrm{S_v} = \sqrt{\sum_i^n (\mathrm{e_{vi}} - \mathrm{RMSE_v})^2/(\mathrm{n}-1)}. \quad (3)$$

Принимая нормальное распределение вертикальных ошибок, доверительные интервалы заданной надёжности могут выражаться в виде

$$\mathrm{RMSE_v} \pm \mathrm{Z_i}(\mathrm{S_v}). \quad (4)$$

В этом случае формула для 95 % доверительного интервала принимает вид

$$\mathrm{RMSE_v} \pm 1{,}96(\mathrm{S_v}). \quad (5)$$

Если $\mathrm{RMSE_v}$ будет равно нулю, то возможная ошибка с 95 %-ной вероятностью будет равна $\pm 1{,}96(\mathrm{S_v})$. При 90 %-ном доверительном интервале она будет равна $\pm 1{,}645(\mathrm{S_v})$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные цифровые модели бассейнов рек, впадающих в оз. Иссык-Куль, говорят о том, что имеется очень большое количество бассейнов больших и малых рек, а также засыхающих русел, что требует дальнейшего их выделения и уточнения. Определение бассейнов рек котловины оз. Иссык-Куль выполнено с использованием инструментов анализа и операций наложения векторных слоёв бассейнов рек с

имеющимся векторным слоем озера. В результате слияния границ водосборов рек в котловине озера получены векторные слои с оцифрованными границами водосбора оз. Иссык-Куль для каждой цифровой модели рельефа. Надо отметить, что 3 участка границ водосбора требуют более детального анализа причин их значительного отличия (рис. 2).

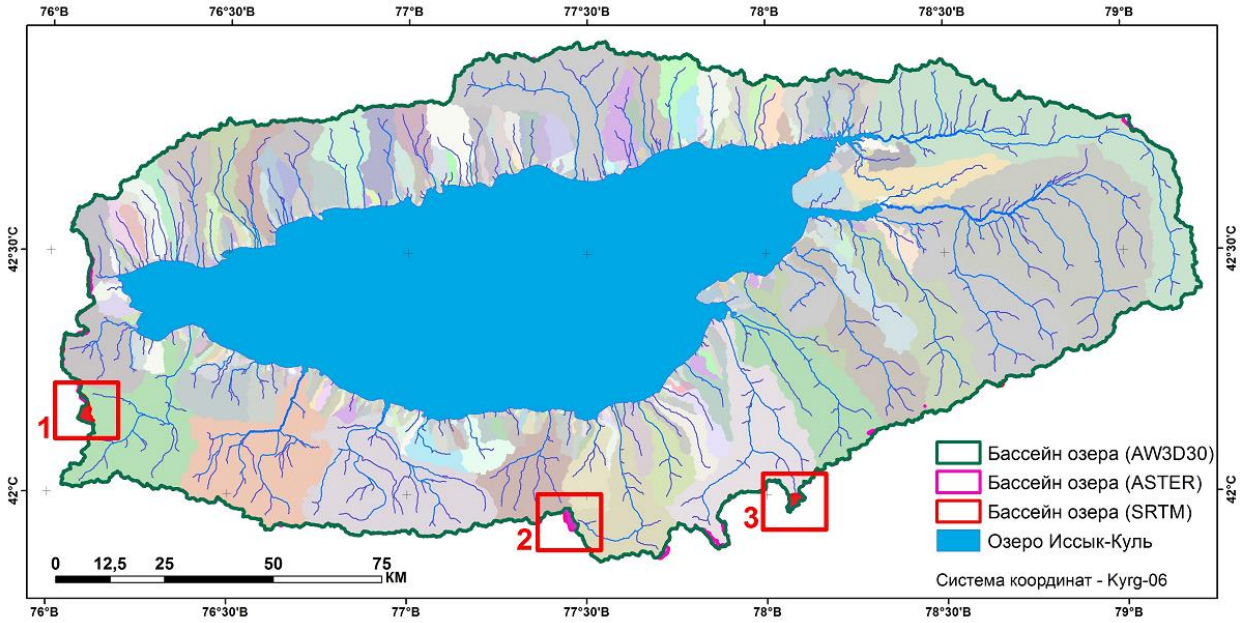


Рис. 2. Бассейны рек и озера Иссык-Куль
Fig. 2. River basins in the Issyk-Kul Lake depression

Табл. 2. Статистические параметры сравниваемых ЦМР
Table 2. Statistical values of the compared DEMs

Наименования ЦМР	**Вертикальная средняя квадратическая ошибка — $RMSE_v$, м**	**Вертикальная арифметическая средняя ошибка — $\bar{e}_v$, м**
AW3D30	51,83	34,14
ASTER GDEM V003	54,47	36,74
SRTMGL1	55,08	37,51

Для оценки качества полученных цифровых моделей рельефа были определены высоты сравниваемых поверхностей в 2640 опорных точках для их сравнения с отметками этих точек на топографических картах. Восходящие линии тренда на графиках показывают, что средняя точность использованных ЦМР ухудшается с возрастанием высоты точек над уровнем моря (рис. 3). Большой разброс высот некоторых опорных точек на разных ЦМР показывает, что крутые склоны, ущелья и сложная экспозиция склонов высокогорной местности почти одинаково влияют на точность данных спутниковых систем. Тем не менее относительная точность ЦМР на основе AW3D30 выше, что также подтверждается более низкой вертикальной средней квадратической ошибкой поверхности (табл. 2).

По статистическим показателям точности полученных цифровых моделей рельефа на основе данных дистанционного зондирования Земли можно отметить, что ЦМР AW3D30 имеет минимальную среднюю квадратическую ошибку, равную 51,83 м и стандартное отклонение вертикальных ошибок, равное 49 м для всех 2640 опорных точек. На рис. 3 можно заметить, что высоты некоторых опорных точек, вычисленных на поверхностях всех 3-х ЦМР, имеют экстремально большие ошибки (100−300 м). Это можно объяснить отрицательным влиянием крутых склонов горных вершин, наличием глубоких ущелий и большими углами наклона и экспозиции горных склонов относительно направления спутниковой съёмки.

Для более детального анализа полученной большой величины средней квадратической ошибки измерений все 2640 опорные точки были сгруппированы по их абсолютным высотам над средним уровнем моря (табл. 3). Из них 360 точек (14 %) находятся на высоте 1608−2000 м, 685 точек (26 %) — на высоте 2001−3000 м, 950 точек (36 %) — на высоте 3001−4000 м, 589 точек (22 %) — на высоте 4001−5000 м и 56 точек (2 %) — выше 5001 м над средним уровнем Балтийского моря (система высот БСВ-1977).

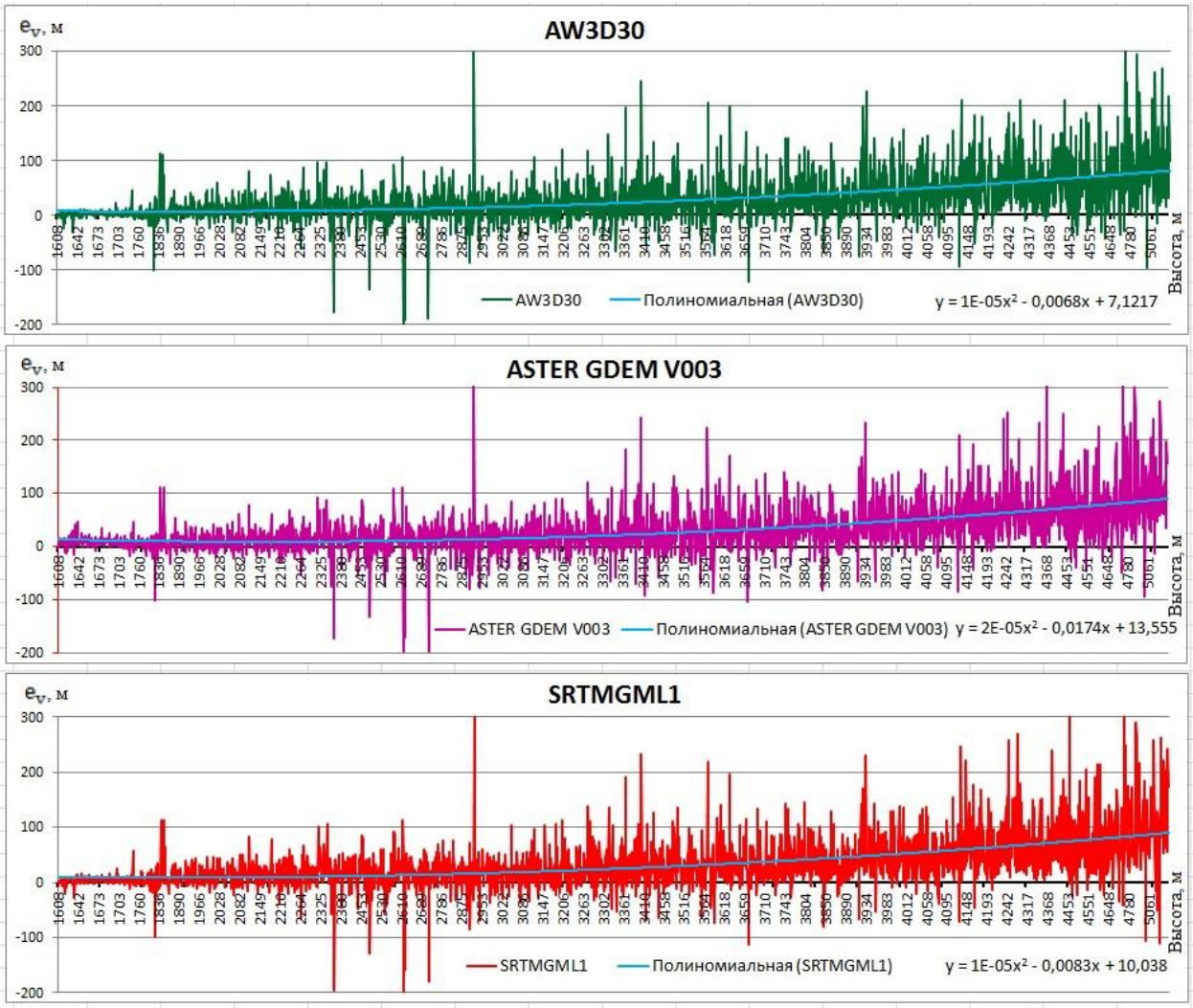


Рис. 3. Графики отклонений величин вертикальных ошибок высот сравниваемых поверхностей в опорных точках
Fig. 3. Graphs of deviations of vertical height errors of the compared surfaces at the reference points

Табл. 3. Изменение величин $RMSE_v$, и $\bar{e}_v$ по высотам опорных точек
Table 3. Variations of $RMSE_v$ and $\bar{e}_v$ values by the reference points' elevation

Наименования цифровой модели рельефа	Вертикальная средняя квадратическая ошибка — $RMSE_v$, м					Вертикальная арифметическая средняя ошибка — $\bar{e}_v$, м				
	1608–2000	2001–3000	3001–4000	4001–5000	5001–6205	1608–2000	2001–3000	3001–4000	4001–5000	5001–6205
AW3D30	10,6	32,7	42,3	77,9	116,7	7,5	21,1	32,6	62,1	99,1
ASTER GDEM V003	12,6	33,0	46,4	83,4	122,2	11,7	22,0	34,3	66,6	107,0
SRTMGL1	11,3	33,4	47,2	84,1	124,7	8,7	23,0	35,5	68,3	112,0

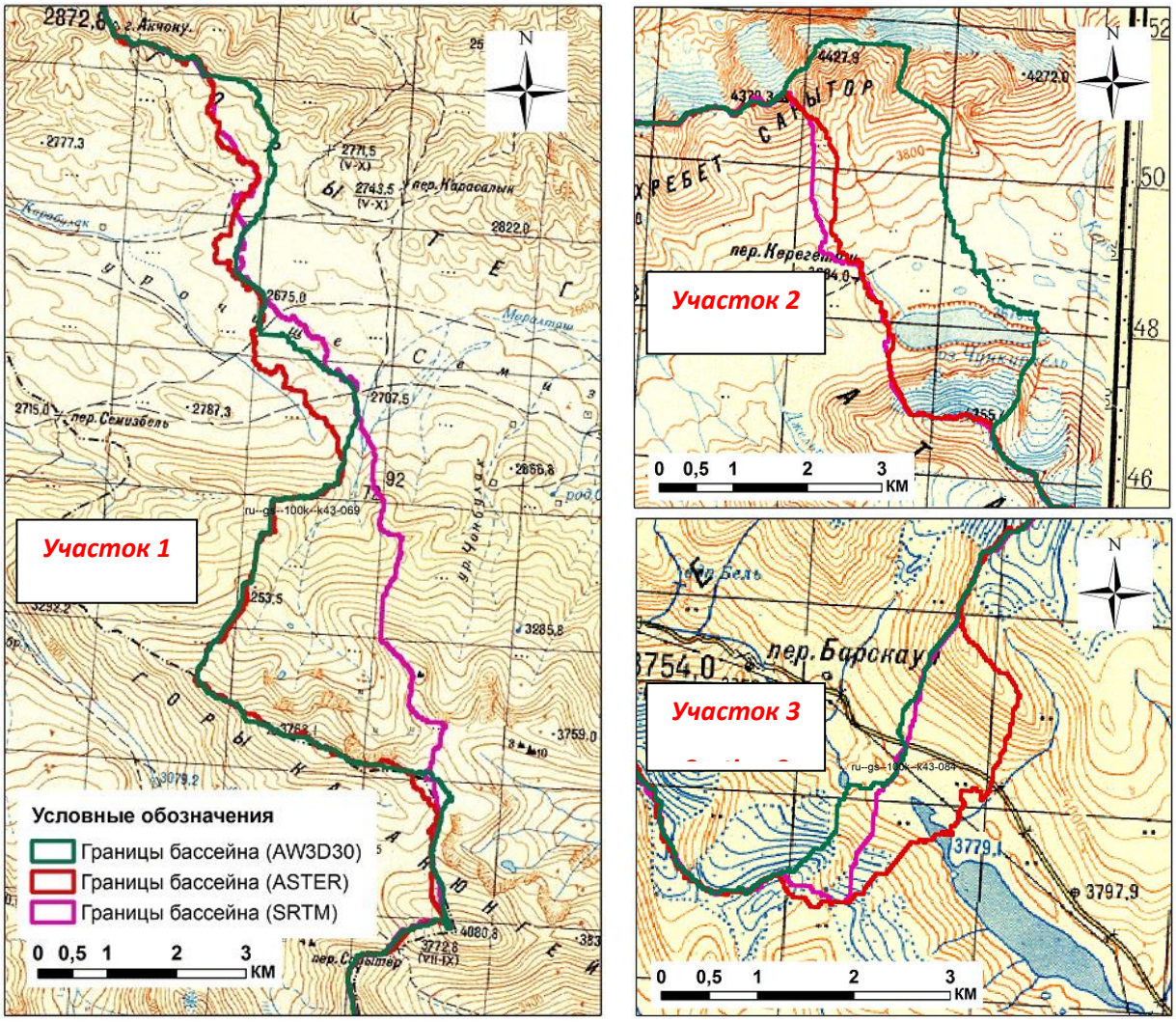


Рис. 4. Участки границы бассейна озера на основе данных ДЗЗ и топографических карт масштаба 1: 100 000
Fig. 4. Sections of the lake basin boundaries based on RS data and topographic maps on a scale of 1: 100 000

ЦМР AW3D30 имеет наименьшие величины $RMSE_v$, и $\bar{e}_v$ на всех высотных интервалах опорных точек. В относительно равнинных условиях на высоте 1608–2000 м над средним уровнем моря все три вида ЦМР имеют показателей вертикальных ошибок в

пределах их заявленных точностей. Относительные высокие средние квадратические ошибки ЦМР возникают также из-за значительной разницы использованных цифровых моделей геоида и квазигеоида на территории Кыргызстана [*Chymyrov, Bekturov*, 2019].

При визуальном сравнении цифровых моделей с рельефом и ситуацией на имеющихся топографических картах можно заметить, что горизонтальная точность границ водосборов рек в условиях сильно пересечённых горных условий может отличаться на километры. Это разница заметна на рис. 4, где разными цветами на топографических картах показаны участки с наиболее отличающимися границами бассейна озера, определённые на основе спутниковых данных. Участок 1 находится на пересечённой горной местности, и граница бассейна на основе снимка SRTM пересекает речку в отличие от других ЦМР. На участке 2 граница бассейна на основе данных AW3D30 пересекает поверхность ледникового озера из-за сложного горного рельефа. А на участке 3 граница бассейна на основе снимка ASTER также проходит на поверхности водоёма.

Из-за его большого размера площадь бассейна оз. Иссык-Куль значительно искажается на картах и требует учёта влияния разных картографических проекций [*Yildirim, Kaya*, 2008; *Виноградов*, 2013]. Для уменьшения искажения площади водосбора и учёта разности исходных проекций пространственных данных она была рассчитана с использованием 4-х основных картографических проекций (табл. 4).

Табл. 4. Площадь бассейна оз. Иссык-Куль на разных картографических проекциях
Table 4. Area of the Issyk-Kul Lake basin in different cartographic projections

Обозначения картографических проекций	**Площадь бассейна озера по разным ЦМР, км^2**		
	AW3D30	**ASTER GDEM V003**	**SRTMGL1**
WGS_1984_UTM_Zone_44N	21951,90	21954,07	21942,55
Pulkovo_1942_GK_Zone_14	21970,22	21972,39	21960,86
Kyrg-06_TM_Zone_4	21925,45	21927,61	21916,12
Asia_North_Albers_Equal_Area_Conic	21923,13	21925,29	21913,79

Все картографические проекции моделируют поверхность Земли на горизонтальную плоскость с искажениями. В данном случае равновеликая коническая проекция Альберса даёт площадь бассейна оз. Иссык-Куль с минимальными искажениями. Это же площадь на основе ЦМР AW3D30 и ASTER GDEM V003 отличается на 2−3 км^2 при всех картографических проекциях. Площадь бассейна на ЦМР SRTMGL1 имеет разницу от 9−10 км^2 во всех проекциях по сравнению с поверхностью AW3D30.

Площадь бассейна озера в Единой государственной трёхградусной зональной системе координат Kyrg-06 немного (2,3 км^2) больше от её площади, рассчитанной в равновеликой проекции, но в то же время она значительно отличается от площади бассейна в проекциях UTM (26,4 кв. км) и СК-42 (44,8 км^2). В дальнейших исследованиях и в решении прикладных задачах рекомендуется применять площадей бассейнов рек и озёр на территории Кыргызстана в системе координат Kyrg-06.

При уточнении границы бассейна озера на основе данных AW3D30 все недостоверные участки границы далее были исправлены на основе очертаний бассейна, определённых по другим ЦМР и по топографическим картам. Площади бассейна озера Иссык-Куль, определённые на всех ЦМР на разных картографических проекциях, значительно отличаются от её величины, используемой в настоящее время в статистических и научно-исследовательских материалах, которая равна 22080 км^2 [*Маматканов и др.*, 2006].

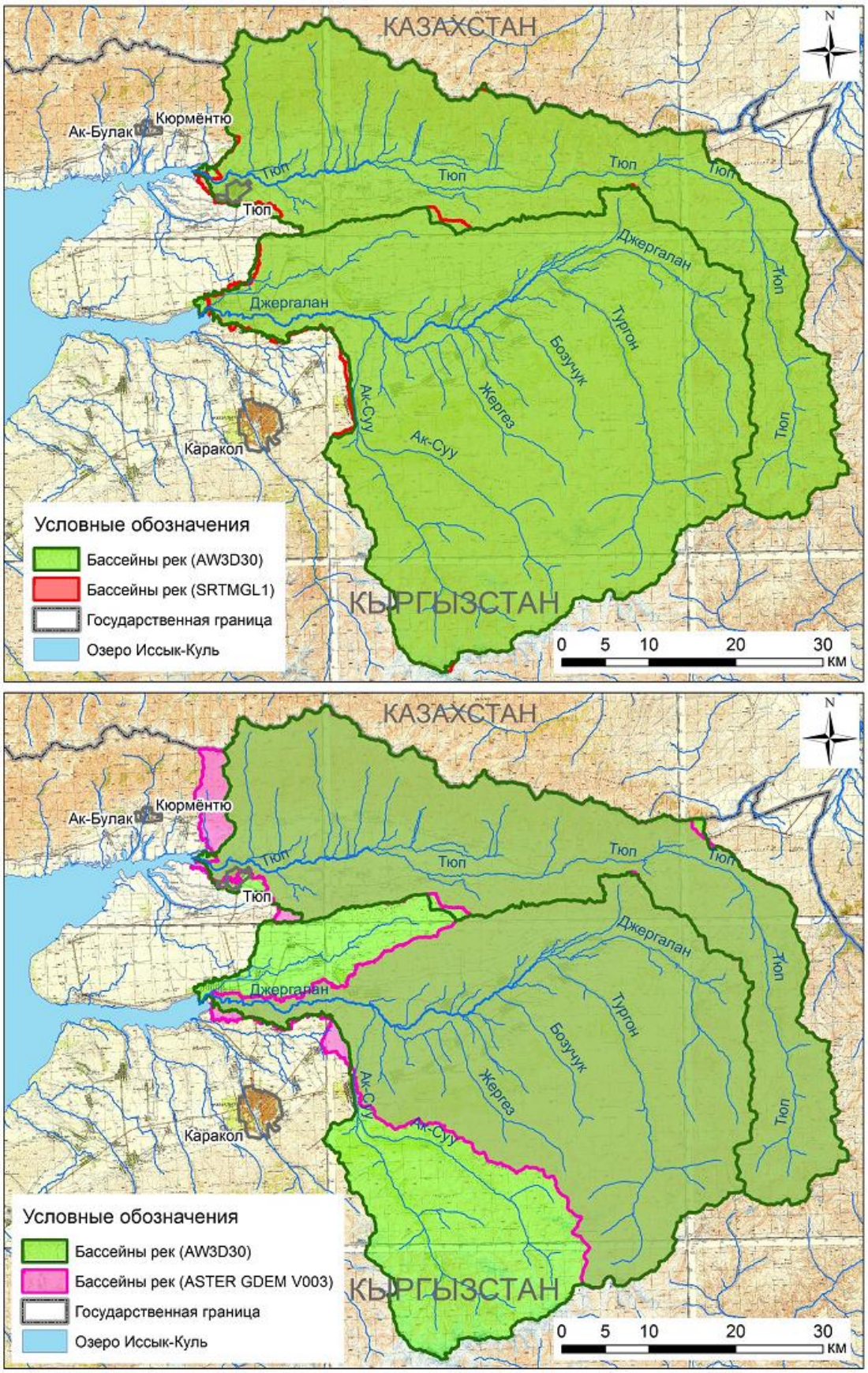


Рис. 5. Границы бассейнов рек Джергалан и Тюп по разным ЦМР
Fig. 5. Boundaries of the Dzhergalan and Tyup river basins on the different DEM

Площадь бассейна озера, определённая по ЦМР AW3D30 в системе координат 1942 г. (Pulkovo_1942_GK_Zone_14), на 180 км^2 (0,5 %) меньше от официально используемой её величины и в некоторых местах старые и новые границы бассейна отличаются до 16 км на горизонтальной плоскости. После визуального анализа и сравнения границ бассейна с рельефом местности по топографическим картам было внесено исправление в границы бассейна на основе ЦМР AW3D30 на участке 2 (рис. 4) по ЦМР SRTMGML1 и, следовательно, площадь бассейна увеличена на 8,1 км^2 в государственной системе координат Kyrg-06 и составляет 21934 км^2.

Результаты проведённых исследований показали, что все три модели имеют относительно одинаковые показатели точности в горизонтальной плоскости. В вертикальной плоскости в равнинных условиях они обеспечивают их заявленные точности. В сильно пересечённых условиях горных регионов они имеют большие ошибки в вертикальном направлении из-за крутых склонов, ущелий и сложной экспозиции горной местности, влияющих на качество наклонной съёмки со спутников.

Границы бассейнов рек Тюп и Джергалан также были смоделированы на основе данных AW3D30, ASTER GDEM V003 и SRTMGML1. На каждой модели были определены точки устьев двух рек и далее были рассчитаны соответствующие границы и площади водосбора каждой реки (рис. 5). Устье реки Тюп находится северо-восточнее с. Тюп и имеет географические координаты 42°44'45,5"с.ш. и 78°18'24,2"в.д. для ЦМР AW3D30. Устье реки Джергалан для этой модели с координатами 42°35'30,356"с.ш. и 78°18'51,965"в.д. находится западнее створа автодорожного моста через реку.

Сравнение величины рассчитанных площадей бассейнов рек показали, что ЦМР на основе данных AW3D30 и SRTMGL1 имеют сравнительно меньшую разницу (табл. 5). Например, площадь бассейна реки Джергалан на ЦМР SRTMGL1 составляет 2147,06 км^2, что на 7,38 км^2 (0,3 %) больше, чем площадь бассейна реки на ЦМР AW3D30. В то же время площадь бассейна реки Джергалан на ЦМР ASTER GDEM V003 (1467,03 км^2) на 672,65 км^2 (31,4 %) меньше, чем площадь бассейна реки, определённая на ЦМР AW3D30.

Табл. 5. Площади бассейнов рек в картографической проекции Kyrg-06
Table 5. Watershed areas of rivers in the cartographic projection Kyrg-06

Наименование рек	**Площади бассейнов рек по разным ЦМР, км^2**		
	AW3D30	**ASTER GDEM V003**	**SRTMGL1**
р. Джергалан	2139,68	1467,03	2147,06
р. Тюп	1206,61	1229,48	1198,04

Визуальная проверка точности векторизованных границ водосбора и линий водотоков каждой реки по трём цифровым моделям, по рельефу местности и речной сети на топографических картах также показали, что ЦМР AW3D30 является лучшей среди сравниваемых моделей. Данные SRTMGL1 точнее дают границ бассейнов и линий водотока рек по сравнению с ЦМР на основе ASTER GDEM V003.

Уточнённая площадь водосбора реки Джергалан по данным AW3D30 составляет 2140 км^2, что на 70 км^2 больше от используемой в настоящее время площади, равной 2070 км^2 (+3,4 %). Площадь водосбора реки Тюп составляет 1207 км^2, что больше на 27 км^2 от его официально принятой площади, равной 1180 км^2 (+1,1 %).

В данной исследовательской работе не были учтены разности поверхностей разных исходных эллипсоидов и моделей геоида, а также влияние растительности на точность цифровых моделей. В дальнейших исследованиях требуется определить высот опорных

точек на основе единой модели геоида для более точного анализа цифровых моделей рельефа на основе данных разных систем дистанционного зондирования Земли.

ВЫВОДЫ

Проведённое исследование показывает, что современные технологии дистанционного зондирования Земли и геоинформационные системы позволяют определять границ бассейнов рек и озёр с точностью до десятков метров. Это даёт огромную возможность научно-практическим исследованиям в области гидрологии, в управлении водными ресурсами и изучении окружающей среды.

В результате сравнительного анализа результатов моделирования на основе разных открытых данных спутниковых систем сегодня можно отметить, что ЦМР на основе AW3D30 является наиболее подходящей для гидрологических исследований и уточнения площадей и границ бассейнов рек и озёр в условиях высокогорья на территории Кыргызстана. После внесённых исправлений и уточнения площадь бассейны озера на основе открытых данных AW3D30 составляет 21 934 км^2, и она может быть использована в дальнейшей научно-практической деятельности взамен используемой сегодня площади бассейна, равной 22 080 км^2. Уточнённые границы и площади водосборов рр. Джергалан и Тюп по данным AW3D30 составляют 2140 км^2 и 1207 км^2 соответственно, что также отличается от используемых данных в настоящее время.

Результаты исследовательской работы позволяют делать вывод о необходимости уточнения границ и бассейнов рек на территории Кыргызстана на основе данных дистанционного зондирования Земли. Требуется комплекс исследований, основанных на применении открытых и коммерческих данных различных систем дистанционного зондирования Земли для официального изменения границ и площадей речных бассейнов. Для дальнейших исследований рекомендуется уточнение площади и границ бассейна оз. Иссык-Куль на основе данных ДЗЗ с учётом разницы используемых гравитационных моделей Земли и влияния растительности. Использование большого количества опорных точек с высотными отметками, определёнными с применением Глобальных навигационных спутниковых систем, в дальнейшем повысит точность и надёжность цифровых моделей рельефа на основе открытых данных ДЗЗ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность NASA и METI за использованные данные SRTMGL1 и ASTER GDEM, а также команду исследовательского проекта ALOS JAXA за данные AW3D30 и оказанную консультационную поддержку.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank NASA and METI for the used SRTMGL1 and ASTER GDEM, as well as JAXA ALOS Project Team for AW3D30 imagery and provided support.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов А.В.* Вычисление площадей территорий на разных эллипсоидах. Геодезия и картография, 2013. № 3. С. 11−15.

2. *Жусупов Н.А., Ха Т.В., Дахал Т.П., Ашыралиев Т.А., Бактыбек У.М.* Оценка точности открытых глобальных цифровых моделей рельефа. Вестник Кыргызско-Российского Славянского Университета, 2019. Т. 19. № 8. С. 135−139.

3. *Козуб Ю.И.* Повышение точности цифровой модели рельефа для целей ландшафтного картографирования на территорию Республики Дагестан. Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки, 2018. Т. 12. № 3. С. 96−102. DOI: 10.31161/1995-0675-2018-12-3-96-102.

4. *Мальцев К.А., Голосов В.Н., Гафуров А.М.* Цифровые модели рельефа и их использование в расчётах темпов смыва почв на пахотных землях. Учёные записки Казанского Университета. Серия естественные науки, 2018. Т. 160. Кн. 3. С. 514−530.
5. *Маматканов Д.М., Бажанова Л.В., Романовский В.В.* Водные ресурсы Кыргызстана на современном этапе. Бишкек: Илим, 2006. 276 с.
6. *Орифов Р.* Возможности интегрированного управления водными ресурсами в Республике Таджикистан. Вестник технологического университета Таджикистана, 2019. № 2 (37). С. 127−132.
7. *Романовский В.В., Кузьмиченок В.А., Маматканов Д.М., Подрезов А.О.* Все об озере Иссык-Куль. Бишкек: Издательство Кыргызско-Российского Славянского Университета, 2005. 406 с.
8. *Савина А.М.* Межгосударственное сотрудничество по управлению трансграничными водными ресурсами. Вестник Оренбургского государственного университета, 2014. № 4 (165). С. 117−121.
9. *Семакова Э.Р.* Предварительные результаты построения цифровой модели рельефа для некоторых районов Центрального и Западного Тянь-Шаня. Интерэкспо Гео-Сибирь. Материалы Международной научной конференции, 2015. № 4 (1). С. 99−103.
10. *Abdiev A., Chymyrov A.* The Kyrgyz national reference system “Kyrg-06” and GNSS control centre “KyrPOS”. Proceedings of the Central Asia GIS Conference GISCA’13 “Connected regions: societies, economies and environments”, May 2−3, 2013, Almaty, Kazakhstan. Almaty, 2013. P. 85−90.
11. *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.
12. *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.
13. *Courty L.G., Soriano-Monzalvo J.C., Pedrozo-Acuña A.* Evaluation of open-access global digital elevation models (AW3D30, SRTM, and ASTER) for flood modelling purposes. Journal of Flood Risk Management, 2019. V. 12. Iss. S1. DOI: 10.1111/jfr3.12550.
14. *Drisya J., Kumar D.S.* Comparison of digitally delineated stream networks from different spaceborne digital elevation models: A case study based on two watersheds in South India. Arabian Journal of Geosciences, 2016. No 9 (710). DOI: 10.1007/s12517-016-2726-x.
15. *Fujita K., Suzuki R., Nuimura T., Sakai A.* Performance of ASTER and SRTM DEMs, and their potential for assessing glacial lakes in the Lunana region, Bhutan Himalaya. Journal of Glaciology, 2008. V. 54. Iss. 185. P. 220−228.
16. *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.
17. *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.
18. *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.
19. *Tavares da Costa R., Mazzoli P., Bagli S.* Limitations posed by free DEMs in watershed studies: the case of River Tanaro in Italy. Frontiers of Earth Science, 2019. V. 7 (141). DOI: 10.3389/feart.2019.00141.
20. *Yildirim F., Kaya A.* Selecting map projections in minimizing area distortions in GIS applications. Sensors, 2008. V. 8 (12). P. 7809−7817.

21. *Yue L., Shen H., Zhang L., Zheng X., Zhang F., Yuan Q.* High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017. V. 123. January. P. 20−34. DOI: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.11.002.

REFERENCES

1. *Abdiev A., Chymyrov A.* The Kyrgyz national reference system “Kyrg-06” and GNSS control centre “KyrPOS”. Proceedings of the Central Asia GIS Conference GISCA’13 “Connected regions: societies, economies and environments”, May 2−3, 2013, Almaty, Kazakhstan. Almaty, 2013. P. 85−90.
2. *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.
3. *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.
4. *Courty L.G., Soriano-Monzalvo J.C., Pedrozo-Acuña A.* Evaluation of open-access global digital elevation models (AW3D30, SRTM, and ASTER) for flood modelling purposes. Journal of Flood Risk Management, 2019. V. 12. Iss. S1. DOI: 10.1111/jfr3.12550.
5. *Drisya J., Kumar D.S.* Comparison of digitally delineated stream networks from different spaceborne digital elevation models: A case study based on two watersheds in South India. Arabian Journal of Geosciences, 2016. No 9 (710). DOI: 10.1007/s12517-016-2726-x.
6. *Fujita K., Suzuki R., Nuimura T., Sakai A.* Performance of ASTER and SRTM DEMs, and their potential for assessing glacial lakes in the Lunana region, Bhutan Himalaya. Journal of Glaciology, 2008. V. 54. Iss. 185. P. 220−228.
7. *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.
8. *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.
9. *Kozub Yu.I.* The Digital elevation model improving for the landscape mapping of the Republic of Dagestan. Bulletin of Dagestan State Pedagogical University. Natural and Exact Sciences, 2018. V. 12. No 3. P. 96−102. DOI: 10.31161/1995-0675-2018-12-3-96-102 (in Russian).
10. *Maltsev K.A., Golosov V.N., Gafurov A.M.* Digital elevation models and their use for assessing soil erosion rates on arable lands. Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki (Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series), 2018. V. 160. No 3. P. 514–530 (in Russian).
11. *Mamatkanov D.M., Bazhanova L.V., Romanovsky V.V.* Water resources of Kyrgyzstan at the current stage. Bishkek: Ilim, 2006. 276 p. (in Russian).
12. *Orifov R.* Possibilities of integrated water resources management in the Republic of Tajikistan. Herald of the Technological University of Tajikistan, 2019. No 2 (37). P. 127−132 (in Russian).
13. *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.
14. *Romanovsky V.V., Kuzmichenok V.A., Mamatkanov D.M., Podrezov A.O.* Everything about Issyk-Kul Lake. Bishkek: Publishing House of the Kyrgyz-Russian Slavic University, 2005. 406 p. (in Russian).
15. *Savina A.M.* International cooperation on the transboundary water resource management. Vestnik (Herald) of the Orenburg State University, 2014. No 4 (165). P. 117−121 (in Russian).

16. *Semakova E.R.* Preliminary results of digital elevation modeling for some regions of the Central and Western Tian-Shan. Interexpo GEO-Siberia. Proceedings of the International Scientific Conference, 2015. V. 5. P. 99−103 (in Russian).
17. *Tavares da Costa R., Mazzoli P., Bagli S.* Limitations posed by free DEMs in watershed studies: the case of River Tanaro in Italy. Frontiers of Earth Science, 2019. V. 7 (141). DOI: 10.3389/feart.2019.00141.
18. *Vinogradov A.V.* Calculation of areas at different ellipsoids. Geodesy and Cartography, 2013. No 3. P. 11−15 (in Russian).
19. *Yildirim F., Kaya A.* Selecting map projections in minimizing area distortions in GIS applications. Sensors, 2008. V. 8 (12). P. 7809−7817.
20. *Yue L., Shen H., Zhang L., Zheng X., Zhang F., Yuan Q.* High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017. V. 123. January. P. 20−34. DOI: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.11.002.
21. *Zhusupov N.A., Ha T.V., Dahal T.P., Ashyraliev T.A., Baktybek U.M.* Quality assessment of free accessible Global DEMs. Vestnik KRSU (Herald of the Kyrgyz-Russian Slavic University), 2019. V. 19. No 8. P. 135−139 (in Russian).

УДК: 911.2:551.34 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-366-375**

Р.Г. Алиев[1], **А.А. Медведков**[1,2]

АНАЛИЗ КЛИМАТОГЕННОЙ ДИНАМИКИ БАТАГАЙСКОГО ТЕРМОДЕНУДАЦИОННОГО «КРАТЕРА» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается вклад климатогенного фактора в развитие Батагайского термоденудационного «кратера» — крупнейшего в мире объекта, имеющего термоденудационное происхождение. Батагайский «кратер» — результат ускоренной активизации процессов экзодинамики в условиях сплошной криолитозоны Янского плоскогорья (северная Якутия), располагающийся в самом холодном районе России. По космоснимкам со спутников серии Landsat (Landsat-7 и Ladsat-8) за период с 1999 по 2017 гг. устанавливалась скорость его роста с учётом экспозиционного фактора за определенные временные интервалы. По отобранным космоснимкам производилось их визуальное дешифрирование для выделения бровки «кратера» применительно к каждому году за весь 18-летний период. Полученные результаты сопоставлялись с климатическими показателями за соответствующие промежутки времени. Из климатических данных анализировались те из них, которые имели положительную динамику и благоприятствовали развитию термоденудационных процессов. Так, для района Батагайского «кратера» за последние 50 лет наблюдается стабильная тенденция роста температурных значений (среднелетних на 1,6 °С и среднегодовых на 2,2 °С) и количества атмосферных осадков (увеличение годовой суммы на 25 мм за счёт летне-осеннего периода). За последние два десятилетия выявлена определённая корреляционная связь между скоростью роста Батагайского «кратера» и динамикой основных климатических показателей. За анализируемый период установлено, что наибольшей скоростью деградации отличается северо-западный борт «кратера». Учитывая статистически выявленную взаимосвязь, а также высокую льдистость пород (40–60 %) и их особую песчано-жильную структуру, можно считать Батагайский «кратер» ярким индикатором потепления климата.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: термокарст, термоэрозия, криолитозона, Батагайский «кратер», индикация климатических изменений

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

[2] Московский государственный областной университет, ул. Веры Волошиной, д. 24, 141014, Мытищи, Московская область, Россия; *e-mail:* **a-medvedkov@bk.ru**

Ruslan G. Aliev[1], **Aleksey A. Medvedkov**[1,2]

ANALYSIS OF THE CLIMATOGENIC DYNAMICS OF THE BATAGAY THERMODENUDATION "CRATER" USING REMOTE SENSING DATA

ABSTRACT

The article discusses the contribution of the climatogenic factor to the development of the Batagai thermo-denudation "crater" — the largest object in the world of thermo-denudation origin. The Batagai "crater" is the result of accelerated activation of exodynamic processes in the continuous permafrost zone of the Yansky Plateau (Northern Yakutia), located in the coldest region of Russia. According to satellite imagery from Landsat series satellites (Landsat-7 and Ladsat-8) for the period from 1999 to 2017. The rate of its growth was established taking into account the exposure factor for certain time intervals. Based on the selected satellite images, they were visually decrypted to highlight the "crater" edge, with reference to each year for the entire 18-year period. The results obtained were compared with climatic indicators for the corresponding time intervals. From climate data, those were analyzed that had positive dynamics and favored the development of thermo-denudation processes. So, for the Batagai "crater" area over the past 50 years, there has been a stable tendency towards an increase in temperature values (average summer by 1,6 °C and average annual by 2,2 °C) and the amount of precipitation (an increase in the annual amount of 25 mm due to summer autumn period). Over the past two decades, a certain correlation has been revealed between the growth rate of the Batagai "crater" and the dynamics of the main climatic indicators. During the analyzed period, it was established that the northwestern side of the "crater" is distinguished by the highest rate of degradation. Given the statistically revealed relationship, as well as the high ice content of the rocks (40–60 %) and their special sand vein structure, this allows us to consider the Batagai "crater" — a vivid indicator of climate warming.

KEYWORDS: thermokarst, thermal erosion, cryolithozone, Batagai "crater", indication of climate change

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время объекты криосферы и мерзлотные ландшафты подвергаются интенсивному воздействию потепления климата. Особый интерес в пределах криолитозоны представляют скульптурные формы рельефа или специфические ландшафтные урочища, которые могут выступать в качестве информативных индикаторов современного изменения климата [*Медведков*, 2018]. Учитывая, что темпы потепления климата в Арктическом регионе характеризуются наибольшими скоростями [*Мохов*, 2014], необходимо выявлять такие индикаторные объекты и наблюдать за их состоянием, раскрывая механизмы их развития в условиях меняющейся среды. Это необходимо для прогнозирования неблагоприятных природных явлений в самых разных областях современной криолитозоны. Важность научных исследований по данной тематике подтверждается положениями действующей Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности. Так, в целях научно-технологического развития предусматривается проведение комплексных научных исследований по изучению опасных природных явлений в Арктической зоне Российской Федерации, разработке и внедрению современных технологий и методов их

[1] Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia;
e-mail: **kazlukarkivan@yandex.ru; a-medvedkov@bk.ru**
[2] Moscow Region State University, Vera Voloshina str., 24, 141014, Mytishchi, Moscow Region, Russia;
e-mail: **a-medvedkov@bk.ru**

прогнозирования в условиях меняющегося климата[1]. Исследование арктических территорий ввиду их труднодоступности не представляется возможным без применения данных ДЗЗ. Считаем, что перспективным подходом к доведению информации о реальности происходящих природно-экологических изменений в связи с потеплением климата, являются визуализированные данные о состоянии ключевых индикаторов. В этой связи особый интерес представляет изучение по разновременным космоснимкам динамики крупнейшего в мире термоденудационного объекта. Батагайская котловина с её известным «кратером» — это подходящий полигон для изучения изменений, происходящих в самом холодном районе России. Исследуемый индикаторный объект располагается на севере Якутии в Верхоянском районе (улусе), в 8 км от районного центра — посёлка Батагай у подножия г. Киргиллях и назван в честь протекающей рядом р. Батагайки — притока р. Яны. Подобные образования имеются в Северной Америке, на территории Канады, но они значительно меньше рассматриваемого нами объекта. Формированию столь площадного объекта способствовали высокая льдистость пород (40–60 %) и их особая песчано-жильная структура. В бассейне р. Яны в связи с суровыми климатическими условиями (среднегодовая температура воздуха -15,9 °С) получила развитие сплошная низкотемпературная толща мёрзлых пород мощностью от 200 до 500 м, с температурой от -6,0 до -10,0 °С [*Некрасов, Девяткин*, 1974; *Мурзин, Русаков*, 1996]. Известно, что такие мощные сингенетические повторно-жильные льды обычно встречаются в едомных толщах на побережьях арктических морей и озёр, тогда как в континентальных районах гор и предгорий они представлены значительно слабее, что делает их менее изученными в сравнении с береговыми комплексами [*Васильчук и др*., 2019]. Такие образования представляют особый интерес для палеоклиматических реконструкций [*Васильчук и др.,* 2019; *Ashastina et al.*, 2017; *Murton et al.*, 2017]. Ландшафты Батагайской котловины представлены редкостойной лиственнично-ерниковой тайгой и характеризуются пониженными биопродукционными показателями, что типично для лесных экосистем сплошной криолитозоны. Так, средняя высота лиственницы даурской — 12–14 м, а диаметр — 10–14 см [*Саввинов и др*., 2018]. Такие природные комплексы отличаются наибольшей уязвимостью к любым внешним воздействиям (в т.ч. климатогенным). Отметим, что за последние 50 лет в Верхоянском улусе наблюдаются быстрые климатические изменения: рост среднегодовой температуры воздуха на 2,2 °С, увеличение среднелетней температуры на 1,6 °С, среднезимней — на 0,9 °С, рост годовой суммы осадков на 25 мм (за счёт летнего периода). Данные выводы были нами сделаны по результатам обработки и анализа первичных гидрометеоданных. Происходящие климатические изменения благоприятствуют усилению термоденудационных процессов, которые с начала 90-х гг. особенно активизировались. Так, у подножия г. Киргиллях группа существующих просадок в 1991–1992 гг. объединилась, обвалив боковые стенки промоины, принявшей форму единой вытянутой капли [*Куницкий и др*., 2013]. Помимо фактора климатических изменений, который выступает в роли своеобразного триггера, его развитию также способствовало влияние антропогенного (влияние близлежащего карьера, рис. 1) и неотектонического факторов (активное воздымание). Данные факторы вносят свой вклад в эволюцию мерзлотных ландшафтов и формирование геоэкологической обстановки Верхоянья [*Мурзин*, 2019].

Батагайский объект в морфологическом отношении включает следующие его составляющие: термоденудационная промоина, термоэрозионный котёл и термоэрозионный овраг. В рамках данной статьи искомый объект со всеми его морфологическими составляющими мы будем называть Батагайским «кратером». Сейчас его размеры составляют более 1,5 км в длину и более 800 м в ширину, причем его границы

[1] Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года. Электронный ресурс: http:// government.ru/info/18360/ (дата обращения 06.04.2020)

продолжают ежегодно увеличивать на 10–15 м, а в ширину на 20–25 м. Темпы термоденудации склоновой поверхности сопоставимы со скоростью отступания арктических берегов, что объясняется схожими генетическими особенностями льдистых пород [*Куницкий и др*., 2013]. Средняя глубина «кратера» составляет 60 м, а в районе термоэрозионного котла она достигает 100 м, колеблясь в зависимости от льдистости грунта и связанной с этим активностью термокарста. Батагайский «кратер» занимает площадку неактивной криопланационной террасы на стыке пологого склона и размытой поверхности подгорной равнины. Поверхность расположена на горной седловине, имеет незначительный (3°) уклон в сторону р. Батагайки. Идущий сверху ручей проходит вдоль котловины, активно дренирует её и выносит обломочный материал в реку. На ниже представленной карте (рис. 1), созданной на основе цифровой модели рельефа GMTED2010, заметно выделяются три гипсометрических уровня: долинно-днищевый комплекс, нижняя поверхность выравнивания, представленная пологими склонами и подгорной равниной, в верхнюю часть которой врезается овраг, и верхняя поверхность выравнивания, представленная отдельными останцами.

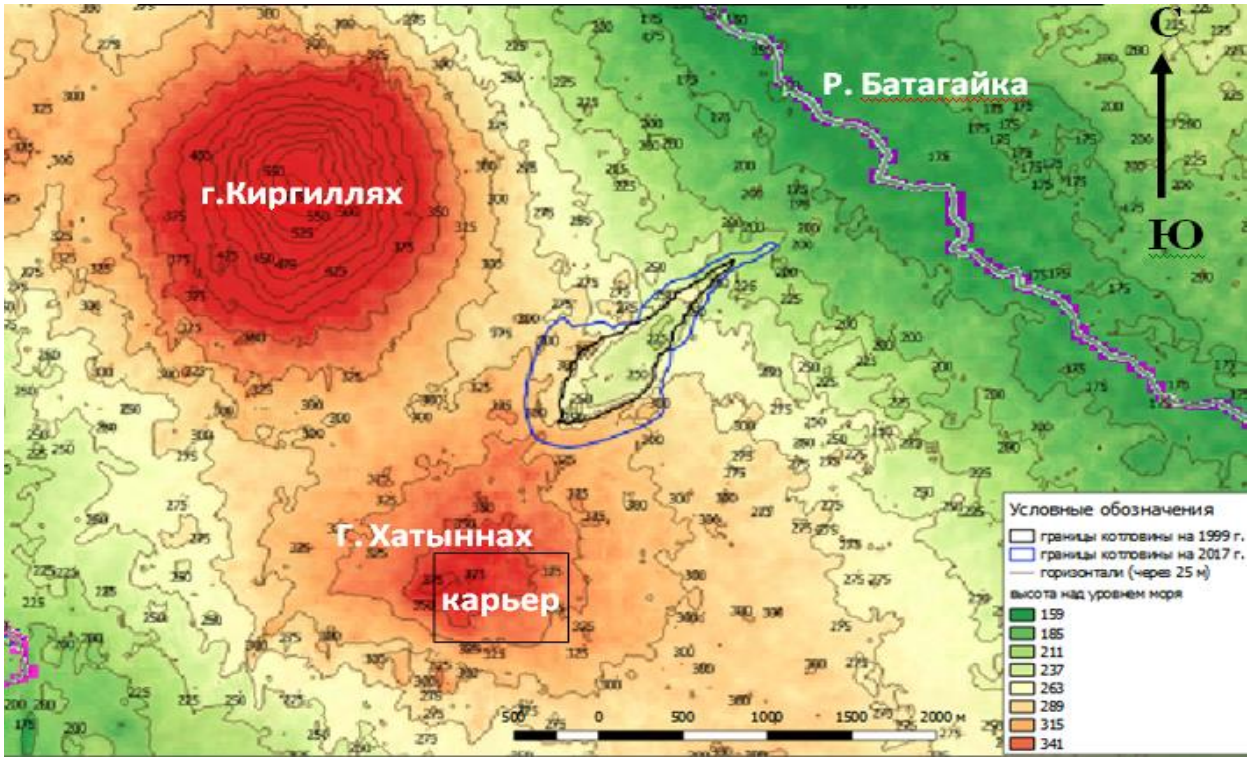


Рис. 1. Гипсометрическая карта окрестностей Батагайского «кратера»
Fig. 1. Hypsometric map of the surroundings of the Batagai "crater"

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения весомости вклада климатогенного фактора в формирование Батагайского термоденудационного «кратера» нами устанавливалась скорость его роста за определённые временные интервалы, которые сопоставлялись с климатическими показателями за соответствующие промежутки времени. Оценка динамики производилась на базе использования данных дистанционного зондирования. Наиболее актуальными для нас являлись снимки со спутников серии Landsat (Landsat-7 и Landsat-8), обладающие относительно высоким пространственным разрешением и обширной базой за продолжительный период времени. Таким образом, за период с 1999 по 2017 гг. отобраны космические снимки, покрывающие площадь изучаемой территории без помех и облаков.

Космоснимки подбирались в даты, максимально приближенные к завершению тёплого сезона (конец августа — начало сентября).

После отбора необходимых для исследования космоснимков проводилось их визуальное дешифрированию для выделения бровки «кратера», применительно к каждому из годов за период исследования. Отметим, что в процессе дешифрирования космоснимков с целью более точного определения границ «кратера» использовалось сразу несколько комбинаций. В первую очередь акцент делался на чёрно-белом панхроматическом канале, имеющем разрешение 15 м, но в нём не всегда чётко прослеживались все очертания, и для уточнения ситуации также использовались комбинация в естественных цветах (для Landsat-7 — это каналы 3,2,1, для Landsat-8 — каналы 4,3,2) и комбинация с ближним инфракрасным каналом (для Landsat-7 — это каналы 7,4,3, для Landsat-8 — каналы 7,5,4), имеющие разрешения 30 м. Последняя комбинация хорошо отражает изменения и нарушения почвенно-растительного покрова. Были получены 19 площадей на каждый год, после чего их сохранили в формате KML (рис. 2). Полученные файлы были открыты в программе Google Earth Pro. Далее для определения скорости роста «кратера» в его различных направлениях были проведены две прямые. Первая проходит вдоль промоины, дренирующей котловину, и направлена от переднего борта «кратера» до линии, визуально отделяющей его основную часть. Вторая прямая соединяет самые широкие участки бортов. По первой прямой измерялась длина основной части «кратера», вторая прямая, пересекаясь с первой, образует два отрезка, по одному измерялась ширина его северо-западного борта, а по другому — ширина его северо-восточного борта. Далее с помощью инструментов Google Earth Pro были вычислены длины необходимых отрезков, а также были посчитаны площади участков основной части котла за каждый год. Результаты измерений линейных и площадных параметров Батагайского «кратера» с 1999 по 2017 гг. проанализированы в данной работе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные параметры показывают примерные изменения размеров, происходившие из года в год, поскольку имеются определённые погрешности, связанные со следующими факторами:

- относительно низкое разрешение снимков (до 15 м) для наблюдения за динамикой роста объекта размером приблизительно 1 х 1 км;
- не на каждый год имелись снимки на конец лета без помех и облаков;
- минимальные неточности в дешифрировании отобранных космоснимков; так, не всегда удавалось чётко разглядеть и выделить границы «кратера», особенно это касается его юго-восточного борта.

Представляется, что относительно точные показатели по средней скорости роста «кратера» можно получить путём деления общей площади изменений за весь анализируемый период на его продолжительность (18 лет). Таким образом, средняя скорость отступания передней стенки «кратера» составила ~ 11,8 м/год ((987–774 м)/18), северо-западного борта — ~ 12,9 м/год ((437,5–205 м)/18), юго-восточного борта — ~ 11,0 м/год ((446,8–247,5 м)/18).

Дальнейший анализ должен показать совокупную взаимосвязь скорости площадных изменений «кратера» и основных тенденций климатической динамики. Представляется, что более корректно производить сравнение ежегодного прироста «кратера» отдельно по каждому из экспозиционных направлений, анализируя параллельно тенденции изменения температуры и осадков. Выбранный подход опирается на вывод мерзлотоведов о значимой роли экспозиции склонов в теплообмене дневной поверхности с окружающей средой, о чём применительно к горным и предгорным условиям Северо-Восточной Сибири имеются количественные оценки [Геокриология..., 1989].

Рис. 2. Анализ динамики основной части Батагайского «кратера» с 1999 по 2017 гг.
Fig. 2. Analysis of the dynamics of the main part of the Batagai "crater" from 1999 to 2017

Из климатических данных в первую очередь нас интересовали показатели, имеющие за анализируемый период в изучаемом районе положительную динамику и благоприятствующие развитию термоденудационных процессов (т.е. увеличение средней температуры воздуха и количества осадков). С 2000 по 2017 гг. использовались доступные данные по метеостанции в пос. Батагай. Для выявления долгосрочной динамики использовался архив метеоданных по г. Верхоянску, доступный на сайте ВНИИГМИ-МЦД. Для достоверности использования первичных метеоданных по г. Верхоянску, находящемуся в 55 км вверх по течению р. Яны, был посчитан коэффициент корреляции Пирсона. Применительно к двум рассматриваемым метеостанциям (пос. Батагай и г. Верхоянска) для анализируемых показателей (рис. 3 и 4) установлены высокие значения коэффициента корреляции (0,94–0,99). Полученные значения свидетельствуют о высокой репрезентативности используемых первичных данных по метеостанции г. Верхоянска. Далее поочередно просчитывалась линейная корреляция (коэффициент корреляции Пирсона) между такими показателями, как процент изменения площади, длины, ширины применительно к разным в экспозиционном отношении частям «кратера» и такими климатическими характеристиками, как среднелетняя температура года измерений, средняя температура воздуха с сентября прошлого года по август года измерений, сумма осадков с октября предшествующего по май года измерений, сумма осадков за лето, весну, весенне-летний период и осень.

Процент изменения длины «кратера» показал определённую его взаимосвязь с температурными показателями (рис. 3). Нам представляется, что для улучшения восприятия полученных взаимосвязей их нагляднее представить в процентах. Так, корреляционная связь со среднелетней температурой (за период с 2000 по 2017 г.) составила 54,5 % (0,545), а корреляция со средней температурой за период с сентября по

август с 1999 по 2017 гг. составила 56 % (0,56). Корреляционная связь с количеством осадков за все периоды проявилась не столь явно.

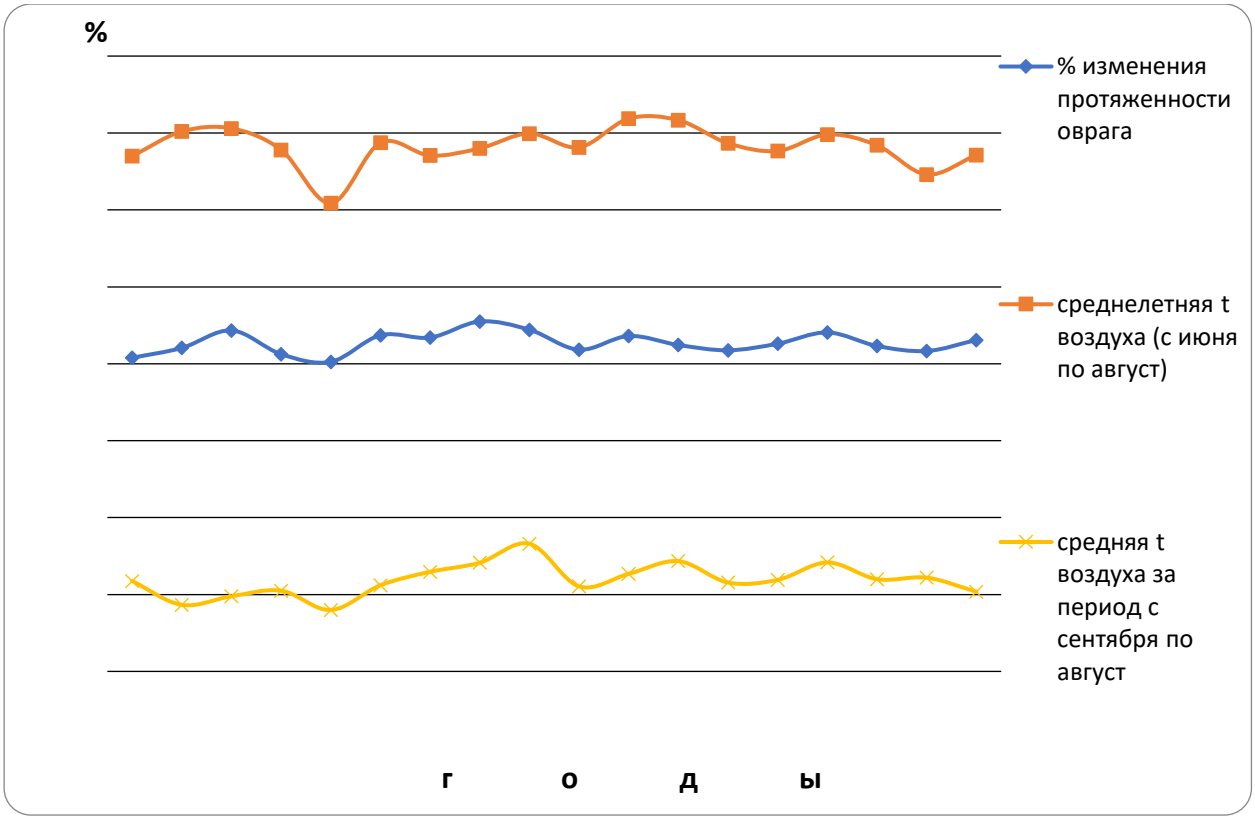


Рис. 3. Корреляционная связь между ростом длины котловины и динамикой температурных показателей
Fig. 3. The correlation between the growth of the length of the "crater" and the dynamics temperature indicators

Процент изменения ширины северо-западной стороны, наоборот, показал невысокую зависимость от температуры воздуха; при этом отмечается наличие взаимосвязи с суммой осадков за различные периоды (рис. 4). Корреляционная связь с суммой летних осадков слабо проявилась, корреляция с суммой осадков за период с октября по май составила 43 % (0,43), а коэффициент корреляции с суммой осадков за весенний период составил 0,57 (57 %).

Отмечена относительно высокая корреляционная связь между скоростью роста передней стенки термоденудационного котла и изменением температурных показателей (0,54–0,56 или 54–56 %), что в целом подтверждает чувствительность реакции термокарстовых процессов к повышению средней температуры воздуха.

Относительно высокая корреляционная связь между скоростью роста северо-западного борта «кратера» и суммой осадков за осенне-весенний период объясняется наличием в этой части рассматриваемого объекта сети промоин и борозд, которые в период активного снеготаяния наполняются проточной водой и активно дренируют прилежащие мёрзлые породы. Корреляционная связь с суммой летних осадков присутствует, но проявляется не столь ярко. Применительно к этому заметим, что в данном районе за последние 50 лет в первую очередь увеличилось количество осадков летнего периода, незначительно увеличилась сумма осенних осадков, а сумма весенних осадков не изменилась.

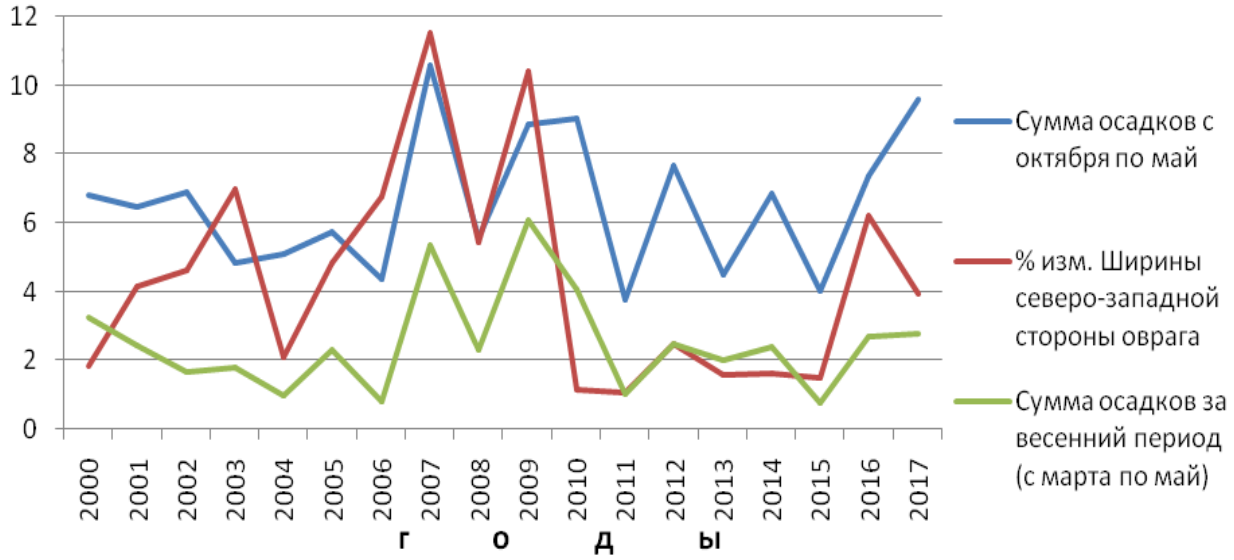


Рис. 4. Корреляционная связь между динамикой ширины северо-западной части «кратера» и колебанием осадков
Fig. 4. Correlation between the dynamics of the width of the northwestern part of the "crater" and the fluctuation of precipitation

Выявлено практически полное отсутствие линейной зависимости между ростом юго-восточной части «кратера» и динамикой климатических показателей. Это может быть связано с его меньшей льдистостью в юго-восточной части, что проявляется в замедлении роста «кратера» в данном направлении.

ВЫВОДЫ

За последние 50 лет в районе исследования наблюдаются быстрые климатические изменения с устойчивым трендом (повышение среднегодовой температуры воздуха, увеличение продолжительности периода с положительными температурами воздуха, рост количества осадков), способствующие развитию термоденудационных процессов. В то же время отмечается тренд на уменьшение его глубины в связи с активизацией самозакапывания «провала» обвальным материалом с его бортов и дальнейшим зарастанием новообразованных участков пионерной растительностью.

За последние два десятилетия выявлена относительно высокая корреляция между скоростью роста Батагайского «кратера» и динамикой основных климатических показателей. Это позволяет считать Батагайский «кратер» ярким индикатором потепления климата. Другие природные факторы, способствующие развитию исследуемого явления в сплошной криолитозоне: высокая температура и льдистость ММП, особая структура растительного покрова и низкий биопродукционный потенциал.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 18-05-00335.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, grant No 18-05-00335.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильчук Ю.К., Васильчук Дж.Ю., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Тришин А.Ю.* Высокоразрешающие изотопно-кислородная и дейтериевая диаграммы в повторно-

жильных льдах Батагайской едомы, север Центральной Якутии. Доклады Академии наук, 2019. Т. 487. № 6. С. 674–678. DOI: 10.31857/S0869-56524876674-678.
2. Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток. М.: Недра, 1989. 515 с.
3. *Куницкий В.В., Сыромятников И.И., Ширрмейстер Л., Скачков Ю.Б., Гроссез Г., Веттерих С., Григорьев М.Н.* Льдистые породы и термоденудация в районе поселка Батагай (Янское плоскогорье, Восточная Сибирь). Криосфера Земли, 2013. Т. XVII. № 1. С. 56–68.
4. *Медведков А.А.* Климатогенная динамика ландшафтов сибирской тайги в бассейне Среднего Енисея. География и природные ресурсы, 2018. № 4. С. 122–129.
5. *Мохов И.И.* Современные изменения климата Арктики. Научно-технические проблемы освоения Арктики. М.: Наука, 2014. С. 82–86.
6. *Мурзин Ю.А.* Термокарст Восточного Верхоянья. Вестник СВФУ (Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова). Серия «Науки о Земле», 2019. № 1 (13). С. 48–54. DOI: 10.25587/SVFU.2019.13.27556.
7. *Мурзин Ю.А., Русаков В.Г.* Температуры горных пород в бассейне р. Яны. Криолитозона и подземные воды Сибири. Ч. 1. Морфология криолитозоны. Якутск: Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова (ИМЗ) СО РАН, 1996. С. 45–56.
8. *Некрасов И.А., Девяткин В.Н.* Морфология криолитозоны бассейна р. Яны и сопредельных районов. Новосибирск: Наука, 1974. 72 с.
9. *Саввинов Г.Н., Данилов П.П., Петров А.А., Макаров В.С., Боескоров В.С., Григорьев С.Е.* Экологические проблемы Верхоянского района. Вестник СВФУ. Серия «Науки о Земле», 2018. № 6 (68). С. 18–33. DOI: 10.25587/SVFU.2018.68.21798.
10. *Ashastina K., Schirrmeister L., Fuchs M., Kienast F.* Palaeoclimate characteristics in interior Siberia of MIS 6-2: first insights from the Batagay permafrost mega-thaw slump in the Yana Highlands. Climate of the Past, 2017. V. 13. P. 795–818. DOI: 10.5194/cp-13-795-2017.
11. *Murton Ju.B., Edwards M.E., Lozhkin A.V., Anderson P.M., Savvinov G.N., Bakulina N., Bondarenko O.V., Cherepanova M.V., Danilov P.P., Boeskorov V., Goslar T., Grigoriev S., Gubin S.V., Korzun Ju.A., Lupachev A.V., Tikhonov A., Tsygankova V.I., Vasilieva G.V., Zanina O.G.* Preliminary paleoenvironmental analysis of permafrost deposits at Batagaika megaslump, Yana Uplands, Northeast Siberia. Quaternary Research, 2017. V. 87. P. 314–330.

REFERENCES

1. *Ashastina K., Schirrmeister L., Fuchs M., Kienast F.* Palaeoclimate characteristics in interior Siberia of MIS 6-2: first insights from the Batagay permafrost mega-thaw slump in the Yana Highlands. Climate of the Past, 2017. V. 13. P. 795–818. DOI: 10.5194/cp-13-795-2017.
2. Geocryology of the USSR. Eastern Siberia and the Far East. Moscow: Nedra, 1989. 515 p. (in Russian).
3. *Kunitsky V.V., Syromyatnikov I.I., Schirrmeister L., Skachkov Yu. B, Grosse G., Wetterich S., Grigoriev M.N.* Ice-rich permafrost and thermal denudation in the batagay area (Yana Upland, East Siberia). Earth's Cryosphere, 2013. V. XVII. No 1. P. 56–68 (in Russian).
4. *Medvedkov A.A.* Climatogenic dynamics of Siberian taiga landscapes in the Middle Yenisei river basin. Geography and Natural Resources, 2018. No 4. P. 122–129 (in Russian).
5. *Mokhov I.I.* Modern climate change in the Arctic. Scientific and technical problems of Arctic exploration. Moscow: Nauka, 2014. P. 82–86.
6. *Murton Ju. B., Edwards M.E., Lozhkin A.V., Anderson P.M., Savvinov G.N., Bakulina N., Bondarenko O.V., Cherepanova M.V., Danilov P.P., Boeskorov V., Goslar T., Grigoriev S., Gubin S.V., Korzun Ju.A., Lupachev A.V., Tikhonov A., Tsygankova V.I., Vasilieva G.V., Zanina O.G.* Preliminary paleoenvironmental analysis of permafrost deposits at Batagaika megaslump, Yana Uplands, Northeast Siberia. Quaternary Research, 2017. V. 87. P. 314–330.

7. *Murzin Yu.A.* Thermokarst in the Eastern Verkhoyansk mountains. Vestnik of North-Eastern Federal University. Series “Earth Sciences”, 2019. No 1 (13). P. 48–54. DOI: 10.25587/SVFU.2019.13.27556 (in Russian).
8. *Murzin Yu.A., Rusakov V.G.* Rock temperatures in the basin of Yana River. Cryolithozone and groundwater of Siberia. Part 1. Morphology of cryolithozone. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute (MPI) SB RAS, 1996. P. 45–56 (in Russian).
9. *Nekrasov I.A., Devyatkin V.N.* Morphology of permafrost zone of the basin of Yana River and adjacent areas. Novosibirsk: Nauka, 1974. 72 p. (in Russian).
10. *Savvinov G.N., Danilov P.P., Petrov A.A., Makarov V.S., Boeskorov V.S., Grigoriev S.E.* Environmental problems of the Verkhoyansky Region. Vestnik of North-Eastern Federal University. Series “Earth Sciences”, 2018. No 6 (68). P. 18–33. DOI: 10.25587/SVFU.2018.68.21798 (in Russian).
11. *Vasil’chuk Y.K., Vasil’chuk J.Y., Budantseva N.A., Vasil’chuk A.K., Trishin A.Yu.* High resolution stable oxygen deuterium diagrams of ice wedges of Batagay yedoma, North of Central Yakutia. Doklady Akademii nauk (Reports of the Academy of Sciences), 2019. V. 487. No 6. P. 674–678. DOI: 10.31857/S0869-56524876674-678 (in Russian).

DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-376-383

Ildar D. Mukhamedjanov[1], Anna M. Konstantinova[1], Ivan A. Uvarov[1]

CAPABILITIES OF THE "IKI-MONITORING" CENTER FOR COLLECTIVE USE IN ORGANIZING THE SATELLITE MONITORING OF THE CENTRAL ASIAN REGION

ABSTRACT

The computing power of modern technical equipment allow to solve different scientific and applied problems. The paper considers the practice of organizing special satellite monitoring service with the help of the "IKI-Monitoring" Center for Collective Use. A number of scientific and applied problems often require rapid access to satellite data, that sometimes is impossible because of the need to store all data locally. In this case the Center for Collective Use allows to analyze the long-term archives available online, process them and save the results right on the server or download it to the PC. The technology is now being practiced to organize a number of specialized services and adapt them to the needs of different regions. At the current stage the project is targeted to solve the problem of regular monitoring of water objects in Central Asia. The service is a part of "VEGA-Constellation" information systems set and was called

EcoSatMS (Ecosystem Satellite monitoring Service). The paper is focused on the capabilities of "IKI-Monitoring" and its application in framework of the new technology for remote monitoring the parts of river courses, i.e. the integration of virtual hydroposts. The methods used for the current research can be expanded and developed further to understand the influence of the water resources dynamics on agriculture and ecosystem in general.

KEYWORDS: Earth Remote Sensing, distributed data processing, water resources, Central Asia, virtual hydroposts

INTRODUCTION

Over the past few decades, there has been an almost exponential increase in the volume of data obtained by the satellite remote sensing systems [*Proshin et al.*, 2019]. As of the beginning of October of 2019, more than 320 remote sensing spacecrafts (https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database) operated in earth orbit (except for nano-satellites), the data of several dozen of which are publicly available. Significant increase in demand for remote sensing data from modern satellites requires access to long-term archives of satellite data for certain regions. At the same time, it is very important for many scientific and applied projects to process multi-year satellite datasets, however it is not always possible because of the limits of local computational powers. Traditionally, data acquisition and processing do require to surf more than one source to find suitable satellite images. In case we need to process large data series this procedure can take extra time and memory storage.

There has been a great breakthrough in the field of cloud computing, cluster technologies, high load distributed systems etc. The new technologies and approaches were used in 2012 to launch the "IKI-Monitoring" Center for Collective Use (CCU) of systems for archiving, processing and analysis of satellite observations data in IKI RAS [*Proshin et al.*, 2019]. To date, more than 90 different scientific organizations from different countries have taken advantage of this opportunity. A variety of resources provided by the "IKI-Monitoring" CCU were used in the

[1] Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI), Profsoyuznaya str., 84/32, 117997, Moscow, Russia; *e-mail:* **ildarmsu@gmail.com**

implementation of dozens of scientific projects including the ones supported by RSF, RFBR and the Ministry of science and education of the Russian Federation [in the same work].

The paper considers the application of the “IKI-Monitoring” CCU to the development of the new information system for remote monitoring and special online tools for satellite data processing. The results and research in the field of water resources of Central Asia have become a good starting point to clarify the needs of the region and develop a certain set of online functionalities to perform in-line-processing of the data. The article also provides examples of some information systems developed previously.

MATERIALS AND METHODS OF RESEARCHES

The depth of long-term archives of “IKI-Monitoring” CCU are currently estimated for more than 30 years. The CCU provides an overview of the accumulated archives of satellite data and thematic products derived from their processing. Currently, the archives of the "IKI-Monitoring" CCU contain data obtained by more than 35 different observation instruments installed on both Russian and foreign satellites for Earth remote sensing [*Proshin et al.*, 2019]. The total amount of data available to users online is currently about 3,2 petabytes. More than 3 terabytes of new data are being stored into the archives daily. The peculiarity of the CCU is that the data covers about 27 % of the land surface area of the Earth. Currently, the area of interest for permanent acquisition and processing of satellite data includes almost the entire territory of Northern Eurasia, including the Arctic territories, the border seas of Russia, as well as a number of regions in Africa, Asia, North and South America [in the same work]. Up-to-date information about available data can be found on the website of the CCU (http://ckp.geosmis.ru/default.aspx?page=6).

All available online data is actually divided by types and ways of acquisition, i.e. physically stored data in the archives is processed to generate “virtual” products. The main data sources of the Centre are performed on fig. 1.

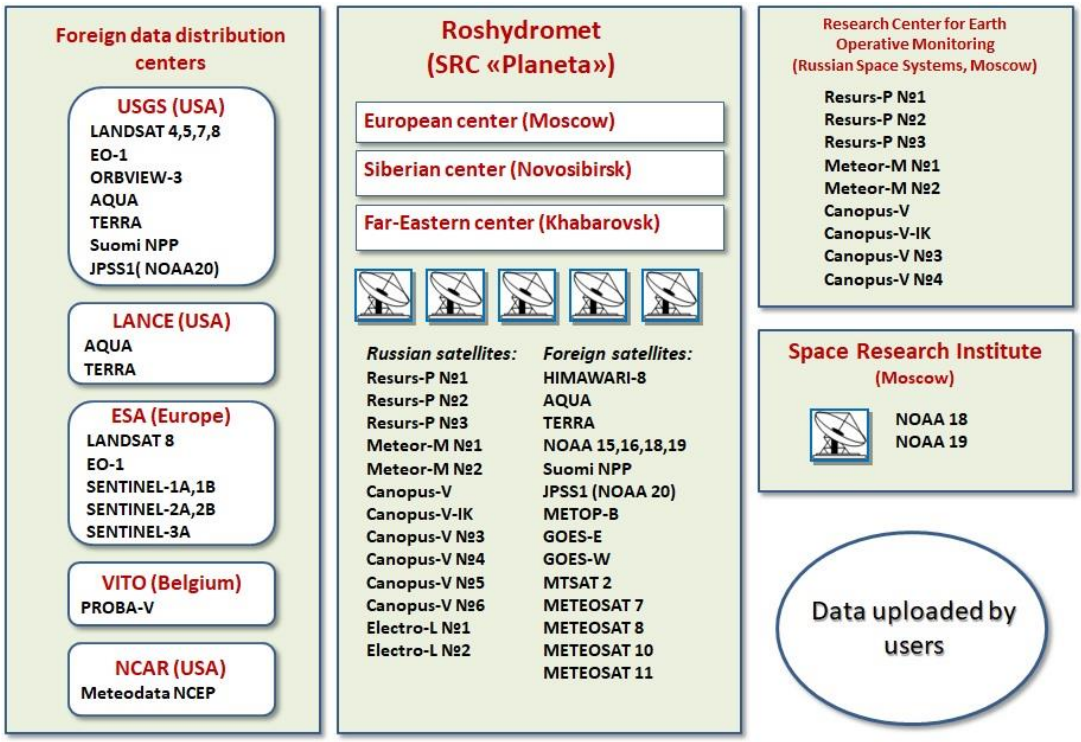


Fig. 1. The main data sources of the “IKI-Monitoring” CCU

In framework of the "IKI-Monitoring" CCU, the data access has been implemented in three ways:

- the “VEGA-Science” (http://sci-vega.ru) satellite information service providing the remote users with interactive access to the data archives of the “IKI-Monitoring” CCU, as well as with facilities for data processing and analysis;
- software interfaces for data access from auxiliary information systems;
- software gateway that provides access to data physically stored in external satellite data archives [*Proshin et al.*, 2019].

“VEGA -Science” is a unique scientific platform and is free to use for research and educational (non-commercial) purposes. The interface of the service allows to surf over data archives and filtering data by a number of parameters — satellite, scanning device, data source, cloud cover percentage, spatial resolution etc. Vega-Science is a base platform from the set of information systems “VEGA-Constellation” (http://sozvezdie-vega.ru/eng/). The fig. 2 shows the web-interface of the service and demonstrates the available data for MSI device (Sentinel-2A, -2B) for period from 2019-05-01 to 2019-05-05 on the map. The footprints on the Figure demonstrate the area of interest, that includes Northern Eurasia, South India, certain zones of Africa and South America.

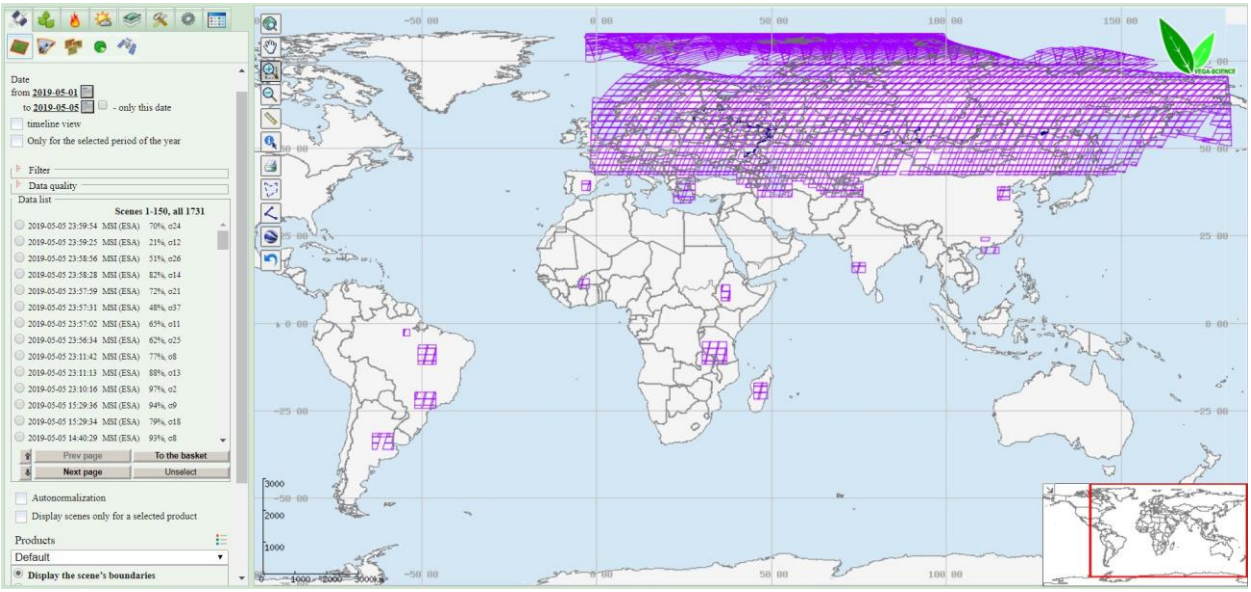


Fig. 2. Sentinel-2/MSI data coverage within 5 days.
The area of interest for projects of «IKI-Monitoring» includes
Northern Eurasia, South India, certain zones of Africa and South America (http://sci-vega.ru)

The two main technologies used to provide satellite data and the processing tools to the users through web-interfaces are GEOSMIS [*Tolpin et al.*, 2011] and UNISAT. The latter is a unique technology for building unified systems for maintaining extra-large distributed archives of heterogeneous satellite data. The key advantages of this technology are the support of the mechanism of “virtual information products”, i.e. products that are dynamically generated if requested by user and based on the satellite data available in the archives, as well as support tools for online analysis and data processing. GEOSMIS provides constructing interfaces for working with spatial information in remote monitoring systems. This technology is designed to create interfaces for working with distributed multidimensional archives of satellite data and the

results of its processing. The technology is used also to create tools for analysis and data management.

Web-interface of a certain system contains a wide range of filters and interactive tools, adapted for the target problem and region. Below is just a short list of common tools for all services of “VEGA-Constellation”:

- tools for calculating spectral indices and image algebra, allowing to carry out arithmetic, logical operations and various mathematical transformations on the data, as well as to calculate spectral indices with arbitrary selected channels;
- supervised and non-supervised classification of satellite data, allowing split the area of the image into a number of classes according to certain parameters;
- color adjusting of images and color composition of several images, including multi temporal composition;
- use of palettes;
- data correction — this tool enables image filtering, topographic correction, limiting area of interest applied to selected channels of any selected satellite images from the archive;
- structural image analysis — this tool implements LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) technology. This technology is designed to automate the analysis in geological studies of the data of various types, including images, diagrams, digital elevation models (DEM) [*Proshin et al.*, 2019].

The interface allows to save the result of data processing on the server or to download directly to PC. Among the products, that are available to be carried out with use of common processing tools (for all services):

- time series of data: values at specified points, indices on objects (fields), meteorological variables, etc.;
- spectral profiles at selected points or selected objects;
- meteorological data, including vertical profiles;
- spatial profiles along arbitrary routes.

As an example of special processing tools adapted for certain projects it is possible to pick out the following:

- modeling the behavior of ash plumes from volcanoes;
- modeling of fire dynamics;
- monitoring and analysis of the state of agricultural fields and monitoring the dynamics of agricultural crops;
- detection of forest logging based on the use of a time series of spectral channels of satellite images;
- sensitive to changes in vegetation cover [*Proshin et al.*, 2019].

Technologies for remote sensing of Central Asia

Research in the field of water resources of Central Asia often requires rapid and stable access to satellite data of the region. The methods and a schema of monitoring the water surface area of certain objects like water reservoirs have been implemented and organized as a separate system of Ecosystem Satellite Monitoring Service — EcoSatMS (http://suvo.geosmis.ru). EcoSatMS is a scientific project which is targeted to the development of the techniques of automation analysis and satellite monitoring of Central Asian water objects and the use of monitoring results for data analysis. The peculiarity of the service is that it realizes a brand-new processing tool for objects survey.

Today Central Asian countries face urgent problems of water resources, including water scarcity and inefficient use. For many decades, agriculture has been one the most significant field of economics. To support this filed at an appropriate level there should be a reasonable use

of fresh water. As the most of Central Asian rivers are transboundary, it is necessary to get actual and independent information about its state on time.

The web-interface of EcoSatMS is similar to VEGA-Science (http://sci-vega.ru). However, the new service still differs from the base one, because it is adapted for the region and focused on the fast computation of the target information.

A new technology of “virtual hydroposts” was introduced to monitoring the sections of transboundary rivers and water bodies. Under the assumption “virtual hydropost” will make it possible to forecast river water content for a given period almost without using data from land-based hydrological stations. This technology is based on the functionality developed in the IKI RAS services — a unified subsystem for working with observations of natural and natural-anthropogenic objects called ObjectsSurveysSMIS. The subsystem consists of a database of objects, an access library to it, a processing system and tools to work with objects, control the processing of satellite data and analyze the dynamics of changes in objects in the web-interface (http://suvo.geosmis.ru/maps/?lang=eng).

In particular, a “virtual hydropost” is an arbitrary polygon (fig. 3) on the riverbed submitted by the user and saved to the database with the time range for selection of satellite images in distributed data archives. The main characteristic being determined for the “virtual hydropost” is the water surface area, which is determined by calculating the modified normalized difference water index or MNDWI [*Golyatina, Kurganovich*, 2019] for each image. Pixels in which the index value is greater than 0 form a water surface and are accepted as significant. This tool uses data from OLI, TIRS (Landsat-8), MSI (Sentinel-2A, -2B), TM (Landsat-4, -5) and ETM + (Landsat-7) systems. The resulting series of observations can be manually marked by the user as correct or incorrect and subsequently exported in tabular format (XLS). Indeed, “virtual hydroposts” can be added to database for small lakes, water reservoirs and parts of the river beds. The latter performs an idea, that MNDWI in this case shows actually the width of the river section.

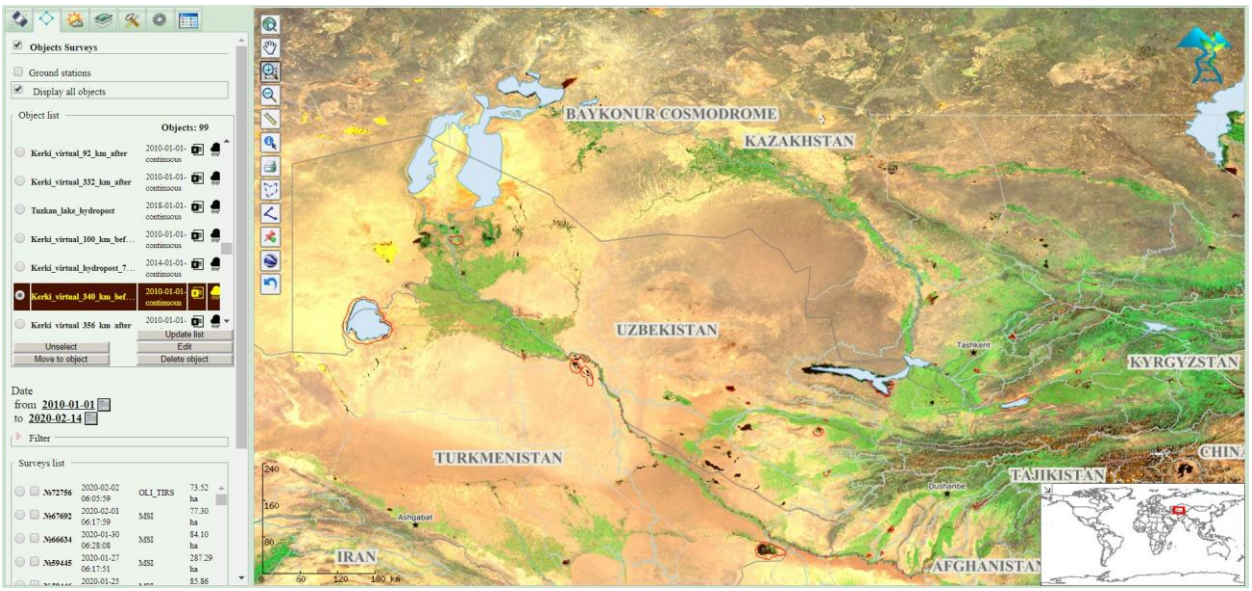


Fig. 3. The objects survey tool in EcoSatMS (http://suvo.geosmis.ru).
“Virtual hydroposts” are shown as red polygons

The user can also use resulting series in the analytics module with automatic charting, which provides the ability to analyze the seasonal, annual and long-term dynamics of the water surface area.

Due to the availability of continuously updated long-term archives of satellite data of various resolutions based on the resources of the “IKI-Monitoring” Center for Collective Use, it is possible to provide access to up-to-date information and statistics derived from the processing of the obtained satellite images. Depending on the time range and the size of the “virtual hydropost”, the calculation of the water surface area for one object takes from several minutes to several hours.

RESULTS OF RESEARCHES AND THEIR DISCUSSION

In framework of EcoSatMS, MNDWI was implemented as a virtual product. The fig. 4 demonstrates the result of processing the satellite image within a polygon set on the river bed. According to the figure, the water pixels are registered by the threshold when MNDWI is 0.

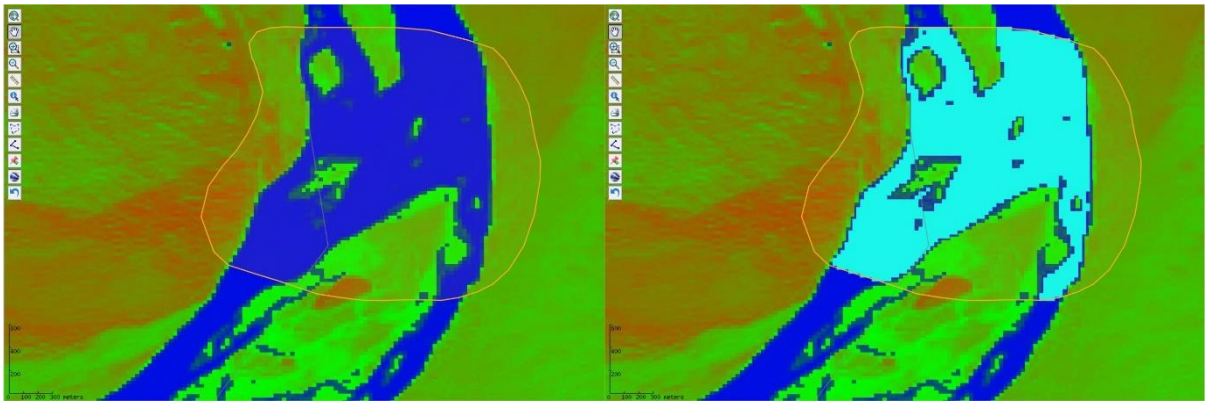


Fig. 4. Water pixels extraction result in EcoSatMS.
MNDWI virtual product is on the background

The first stages of the research with use of the new satellite service are focused on looking for the correlation between the dynamics of the water surface area on Amu Darya, Syr Darya, Kara Darya river beds and daily runoff at the nearest to polygon physical gauging stations. This research could be a good base to find significant figures for a target model of water use and water balance for the certain basins. An automated analysis tool has been developed to accelerate the time-series analysis procedure, as well as a module for 3D performance of the “virtual hydropost” using ASTER GDEM V2 are being tested now. As these tools are implemented in test mode, they are being improved to increase the accuracy and performance. Some “virtual hydroposts” have already been processed for different periods and the time-series for satellite and ground-based data. The approach shows to be quite useful to detect the correlation between two different types of data and even find a linear relationship for certain cases. EcoSatMS allows to plot the results and scale them in interactive mode, when the analysis takes a few seconds and can be started right from the map interface.

CONCLUSIONS

Every system developed with the use of GEOSMIS and UNISAT has a unique application area and is to be used by the specialists in specific fields. Today a number of hydrologists in Central Asia are making various investigations in the field of water resources. Actual and on-time information about the state of water objects is a base to make forecasts, enrich datasets and develop models. That is why it is very important to make the satellite service easy to use, fast, stable and capable of providing reliable functionality for making surveys.

The further development of EcoSatMS includes implementation of online calibration procedures of MNDWI curves using ground ones. This can help to understand the dynamics at “virtual hydroposts” and build a forecast model using the relationship of distance-days. It means

that the further “virtual hydropost” is located, the highest time lag it has (fig. 5). In addition, the algorithms of computing the water surface area are improved to reduce time required to separate reliable surveys from the outliers.

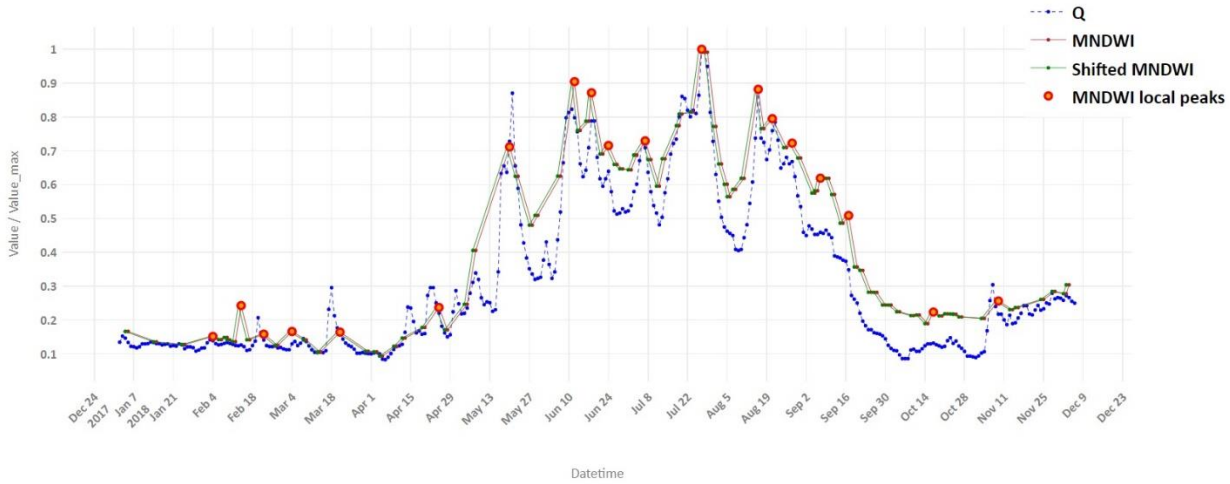


Fig. 5. The sample of common diagram for normalized figures as time-series. Shifted MNDWI demonstrates the lag for MNDWI curve to get the best correlation value with the ground figures.

In the future EcoSatMS will also integrate the algorithms for assessment of the state of agricultural fields adapted for Central Asian region.

ACKNOWLEDGEMENTS

The functionality of the EcoSatMS is based on the resources of the “IKI-Monitoring” Center for Collective Use, developed and maintained under the theme of “Monitoring” (state registration No 01.20.0.2.00164).

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, No 19-37-90114.

REFERENCES

1. *Acharya T.D., Subedi A., Lee D.H.* Evaluation of water indices for surface water extraction in a Landsat 8 scene of Nepal. Sensors, 2018. V. 18. No 8. P. 2580–2595.

2. *Fazylov A.R., Kharlamova N.P.* The impact of reservoirs on the dynamics of the water regime of the rivers of the submontane zone of Tajikistan. Science and New Technologies, 2014. No 6. P. 34–41 (in Russian).

3. *Golyatina M.A., Kurganovich K.A.* Assessment of changes in the water surface area of Ivano-Arakhleya Lakes of Transbaikalia according with the use of sensing data. Transbaikal State University Journal, 2017. V. 23. No 6. P. 4–11 (in Russian).

4. *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).

5. *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. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170 (in Russian).

6. *McFeeters S.K.* The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 1996. V. 17. P. 1425–1432.
7. 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. P. 111. DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a (in Russian).
8. *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. CEUR Workshop Proceedings. Aachen, 2019. V. 2534. P. 39–44.
9. *Rakhimov S., Kamolidinov A.* From Aral to Rogun: modern water situation in the Amu Darya basin. Central Asia and the Caucasus, 2014. V. 17. No 1. P. 177–195 (in Russian).
10. *Rokni K., Ahmad A., Selamat A., Hazini Sh.* Water feature extraction and change detection using multitemporal Landsat imagery. International Journal of Remote Sensing, 2014. V. 6. P. 4173–4189.
11. *Tolpin V.A., Balashov I.V., Efremov V. Yu., Loupian E.A., Proshin A.A., Uvarov I.A., Flitman E.V.* The GEOSMIS System: Developing interfaces to operate data in modern remote monitoring systems. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2011. V. 8. No 3. P. 93–108 (in Russian).
12. *Xenarios S., Gafurov A., Schmidt-Vogt D., Sehring J., Manandhar S., Hergarten C., Shigaeva J., Foggin M.* Climate change and adaptation of mountain societies in Central Asia: uncertainties, knowledge gaps, and data constraints. Regional Environmental Change, 2018. V. 9. P. 1339−1352. DOI: https://doi.org/10.1007/s10113-018-1384-9.
13. *Xu H.* Modification of normalized difference water index (MNDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, 2006. V. 27. P. 3025–3033.

УДК: 528.77 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-384-395**

Е.Г. Мишвелов[1], А.Н. Кривошеев[2], И.А. Бакуменко[3]

ЭВОЛЮЦИЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОТКАЗНЕНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ

АННОТАЦИЯ

Данное исследование было проведено с целью мониторинга и оценки геоэкологического состояния Отказненского вдхр. Ставропольского края в период с1978 по 2018 гг. и основано главным образом на анализе данных спутникового дистанционного зондирования Земли с применением ГИС-технологий, фондовых материалов и сведений открытых источников информации.

Антропогенная деятельность второй половины XX в. сопровождалась для Северного Кавказа значительным зарегулированием и изменением стока рек, созданием мощной искусственной гидрографической сети, изменением трофности и гидрохимического режима водных объектов [*Мишвелов, Самотоев,* 2011; *Абшаев и др.,* 2003; *Дегтяренко,* 1988]. К началу 1970-х г. гидрографическая сеть пополнилась водохозяйственным комплексом, состоящим из магистральных каналов, например, Бол. Ставропольского и Терско-Кумского. Общая протяжённость всех каналов составила 4000 км (для сравнения — длина р. Кумы ~ 800 км, р. Калаус ~ 400 км). Объём годовой переброски воды по каналам достигал 2500 млн м^3, причём до 90 % — это вода р. Кубань.

Данные спутникового дистанционного зондирования позволили установить особенности геоэкологического состояния, в т.ч. многолетней и сезонной динамики площади и др. морфометрических характеристик равнинного водохранилища за весь период эксплуатации.

Анализ публикаций по тематике дистанционного мониторинга и оценки динамики состояний водных объектов и в целом гидрографических сетей показал высокую эффективность и перспективность использования методов ДЗЗ. Они обеспечивают многомасштабность и многовременность изучения. Экосистемы водных объектов отлично проявляются на космических снимках, они ничем не скрыты, одноярусны, хорошо дешифрируются как по текстуре, так и по спектральным характеристикам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: landsat, мониторинг, водохранилище, ГИС-технологии

[1] ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», ул. Пушкина, д. 1, 355017, Ставрополь, Россия; *e-mail:* **mishvelov@mail.ru**

[2] ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», ул. Пушкина, д. 1, 355017, Ставрополь, Россия; *e-mail:* **temking@bk.ru**

[3] ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», ул. Пушкина, д. 1, 355017, Ставрополь, Россия; *e-mail:* **vanya.bakumenko@yanex.ru**

Eugene G. Mishvelov[1], **Artyom N. Krivosheev**[2], **Ivan A. Bakumenko**[3]

EVOLUTION OF THE GEOECOLOGICAL STATE OF THE OTKAZNENSKY RESERVOIR IN THE STAVROPOL TERRITORY

ABSTRACT

This study was conducted to monitor and assess the environmental status of the Otkaznensky Reservoir of the Stavropol Territory from 1978 to 2018 and is mainly based on the analysis of satellite remote sensing data using GIS technology, archives materials and information from open sources of information.

Anthropogenic activity of the second half of the twentieth century for the North Caucasus, it was accompanied by significant regulation and changes in river flow, the creation of a powerful artificial hydrographic network, changes in trophic state and hydrochemical regime of water bodies. By the beginning of the 1970^{s}, the hydrographic network was replenished with a water management complex consisting of main canals, for example, the Greater Stavropol and Tersko-Kumsky. The total length of all channels was 4000 km (for comparison, the length of the Kuma River is ~ 800 km, the Kalaus River is ~ 400 km). The volume of annual water transfer through canals reached 2500 mn m^3, and up to 90 % is the water of the Kuban River.

Data from satellite remote sensing made it possible to establish the features of the environmental status, including long-term and seasonal dynamics of the area and other morphometric characteristics of the plain reservoir for the entire period of operation.

Analysis of publications on the topic of remote monitoring and assessment of the dynamics of the state of water bodies and hydrographic networks in general has shown the high efficiency and prospects of using remote sensing methods. They provide multiscale and multi-time study. Ecosystems of water bodies are perfectly manifested in satellite images, they are not hidden in any way, they are single-tier, they are well decrypted both in texture and in spectral characteristics.

KEYWORDS: Landsat, monitoring, reservoir, GIS technology

ВВЕДЕНИЕ

В условиях глобального потепления в начале XXI в., которое сопровождалось отступлением ледников в горных территориях Юга Европейской части России в среднем на 4,6 м/г. и сокращением площади оледенения на 2,4 %, происходило снижение годового расхода воды в основных реках Северного Кавказа и соответственно Ставропольского края до 35 %. Отмеченные изменения климатического и гидрологического режимов сопровождались значительной неравномерностью стока, в т.ч. для меженных и паводковых периодов, обусловливая в ряде случаев ЧС гидрологического характера. Например, только в 2002 г. наводнение на рр. Кубань и Кума привело к ущербу в 16 млрд руб., гибели людей[4]. Ситуация усложнилась физическим износом и технологическим старением гидротехнических объектов. В этой связи актуализировалась необходимость мониторинга и оценки изменений гидрографических сетей Северного Кавказа с целью стратегического прогнозирования возможностей их эксплуатации или реконструкции.

Выбранное в исследовании Отказненское водохранилище (рис. 1) представляет собой репрезентативный модельный полигон, в рамках которого может быть проведена

[1] North-Caucasian Federal University, Pushkin str., 1, 355017, Stavropol, Russia; *e-mail:* **mishvelov@mail.ru**
[2] North-Caucasian Federal University, Pushkin str., 1, 355017, Stavropol, Russia; *e-mail:* **temking@bk.ru**
[3] North-Caucasian Federal University, Pushkin str., 1, 355017, Stavropol, Russia;
e-mail: **vanya.bakumenko@yanex.ru**

[4] Десять самых масштабных наводнений в России в 1993–2013 г. Электронный ресурс: https://ria.ru/20130926/966016499.html (дата обращения 20.09.2019)

оценка современного состояния и трендов трансформации искусственных водных экосистем и их компонентов как ведущих предикторов эволюции агроландшафтов Предкавказья.

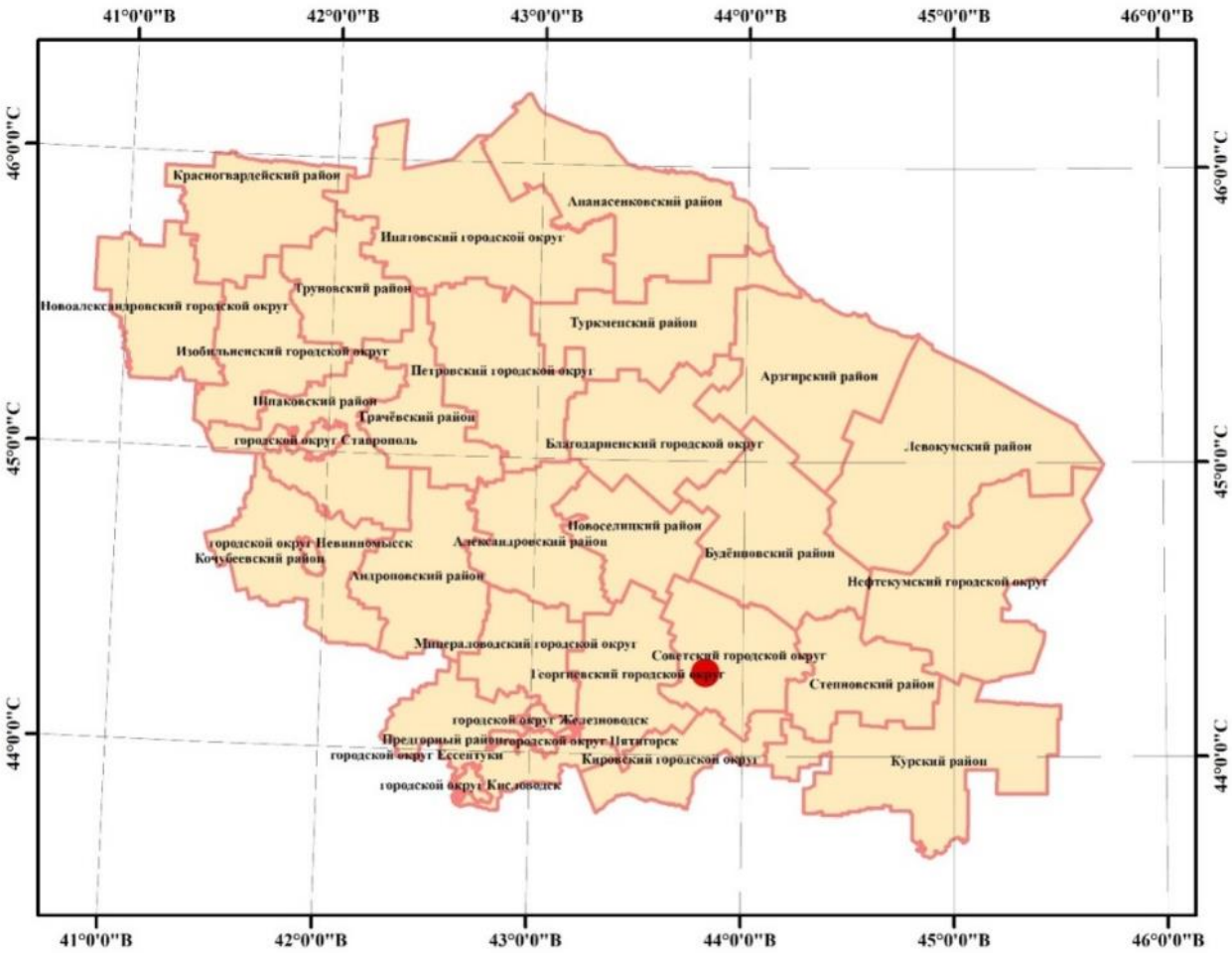


Рис. 1. Местоположение Отказненского водохранилища
Fig. 1. Location of the Otkaznensky Reservoir

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Отказненское вдхр. находится в Советском городском округе Ставропольского края на р. Куме в районе с. Отказное и Солдато-Александровское. Оно построено в 1965 г. гл. обр. для сезонного регулирования стока реки и обеспечения водоснабжения и орошения 27,7 тыс. га сельскохозяйственных угодий; в последние годы использовалось только для регулирования паводков. Проектный срок эксплуатации водохранилища составил 35 лет[1].

Территория размещения водохранилища сложена осадочными породами палеоген-антропогена, в основном лессовидными суглинками [*Прыткова,* 2007; *Ильичёв,* 2011; *Важнов,* 1966]. Рельеф преимущественно равнинный пологий; правый борт Кумы крутой со склонами до 30 м.

Почвы — аллювиальные и южные чернозёмы. Произрастают полынно–злаковые степи. В долине Кумы расположены пойменные леса (тополь, дуб).

[1] Доклад «О разработке национальной программы «Вода России — 21 век». Электронный ресурс: http:special.donland.ru/Default.aspx?PageId= 76263, 2014 (дата обращения 20.09.2019)

Климат сухой, континентальный. Средняя температура июля составляет до 24,7 °С, января — до -4,5 °С. Коэффициент увлажнения: 0,3. Среднегодовая скорость ветра — 1,7 м/с [*Дегтяренко,* 1988].

Площадь водосбора р. Кумы к створу плотины Отказненского вдхр. составляет 7980 км^2, длина — 270 км, средний уклон — 7,2 %, средневзвешенный уклон — 3,1 ‰[1]. В районе выделяется весеннее половодье (февраль–апрель) и дождевые паводки (май–июнь). Межень летне-осенняя. Среднегодовой расход воды — 17,4 м^3/с, взвешенных наносов — 23,3 кг/с, мутность воды — 1300 г/м^3.

Полный объём водохранилища на момент ввода его в эксплуатацию составлял 131 млн м^3, площадь водного зеркала — 19,2 км^2, длина водохранилища — 4,7 км, средняя ширина — 3 км, максимальная — 4,8 км, средняя глубина — 5 м, максимальная — 13,5 м. НПУ по состоянию на 1965 г. составлял 174,65 м.

В системе оценки геоэкологического состояния водного объекта традиционно существенное место отводится морфометрическим показателям [*Лурье, Косиков,* 2003; *Кондратенко,* 2003]. Морфометрические параметры (площадь, периметр, длина) объектов на территории водохранилища позволяют оценить направление развития природных и антропогенных процессов, их динамику, а также особенности состояния природных и антропогенных геосистем [*Abdul-Rahman, Pilouk,* 2008; Innovations…, 2009; *Лурье и др.,* 2004]. Эти данные позволяют составлять прогнозы развития систем, а также эффективнее управлять ими.

В данной работе для определения морфометрических, температурных и др. показателей водных объектов использовались снимки с сайта Геологической службы США, а также топографические карты различного масштабного ряда [*Johnson,* 2006; Satellite Remote Sensing…, 2003; *Richards,* 2009]. Анализировались снимки Landsat с 1978 по 2018 гг., характеризующие состояние территории на конец паводков и межевой период. Обработка снимков осуществлялась в программном комплексе ArcGIS 10.1. Для выявления изменений береговых границ водохранилища использовались комбинации каналов (4–3–2, 3–2–1). В данных комбинациях используются каналы видимого диапазона, поэтому объекты земной поверхности выглядят похожими на то, как они воспринимаются человеческим глазом. Здоровая растительность выглядит зелёной, убранные поля светлыми, нездоровая растительность коричневой и жёлтой, дороги серыми, береговые линии белёсыми. Эта комбинация каналов даёт возможность анализировать состояние водных объектов и процессы седиментации, оценивать глубины, а также используется для изучения антропогенных объектов. Также были проанализированы и оцифрованы следующие карты:

- военно-топографическая пятивёрстная карта Кавказского края 1926 г.;
- карта бассейна р. Терека 1928 г.;
- карта РККА 1942 г.;
- топографическая карта СССР L–38 (В) 1989 г.

В данном исследовании также был расчитан анализ состояния влажности почв, который определяли по индексу WSVI. Это один из показателей, разработанных для объединения данных NDVI и температуры (температуры поверхности земли) с целью определения условий влажности. Значения WSVI варьируют от -4 для экстремальной засухи до +4 для сильно влажных условий и рассчитывается по формуле

$$\boldsymbol{WSVI = NDVI/LST,}$$

[1] *Чумакова И.В., Мишвелов Е.Г., Деревягин Е.В.* Современные геоэкологические особенности Отказненского водохранилища на р. Куме. Евразийский Союз Учёных (ЕСУ). БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ, 2015. № 10 (19). С. 55–57.

где NDVI — вегетационный индекс;

LST — температура поверхности земли.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время Отказненское вдхр. потеряло свою хозяйственную ценность и используется как противопаводковое для трансформации максимальных расходов р. Кумы.

За период эксплуатации водохранилища в нём отложилось 55,4 млн м^3 иловых наносов. За первые 35 лет интенсивность его заиления составляла 1,35 млн м^3/г. Таким образом, полезный объём сократился в отмеченный период на 39,2 млн м^3. Мёртвый объём заилился на 81 % и составлял 3,2 млн м^3. Средняя интенсивность заиления водохранилища в период 2008–2014 гг. составила 0,88 млн м^3/г.[1].

Заиление водохранилища, по нашему мнению, в первую очередь западной пологой части ложа, привело к тому, что объём и площадь водного зеркала водохранилища существенно уменьшились. Так, площадь акватории в 2011 г. по данным ДЗЗ составляла 11,31 км^2, в 2016 г. — 6,34 км^2, а в 2018 — 3,1 км^2 (табл. 1).

Табл. 1. Динамика площади водохранилища за период 1965–2018 гг.
Table 1. The dynamics of the reservoir area for the period 1965–2018

Дата	S, км^2	Длина береговой линии, км	Коэффициент извилистости береговой линии
Проектные данные,1965	19,2	24,91	0,43
Октябрь, 1978	16,89	23,37	0,44
Июнь, 1987	13,37	23,52	0,56
Июль, 1991	13,13	24,78	0,60
Июль, 2000	11,41	28,67	0,80
Июль, 2005	11,56	29,22	0,81
Июль, 2011	11,31	30,00	0,84
Июнь, 2015	10,83	30,63	0,90
Июнь, 2016	6,34	25,18	1,26
Июнь, 2017	5,51	33,45	1,93
Июнь, 2018	3,1	13,26	1,36

По сравнению с НПУ 1965 г. к настоящему времени территория водохранилища сократилась более чем в 6 р. В последние 5–6 лет сокращение шло наиболее интенсивно. Цельного водоёма нет, он представлен лишь фрагментами, которые начали выделяться в начале 1990-х гг. (выделение отдельного южного водоёма в районе впадения р. Золки в р. Куму). Наиболее быстрое сокращение площади водного зеркала наблюдалось в период с 2011 г. по настоящее время, когда площадь водной поверхности сократилась с 11,3 км^2 в 2011 г. до 3,1 км^2 в 2018 г. Коэффициент извилистости береговой линии за весь исследуемый период постоянно увеличивался, достигнув своего максимума в 2017 г. после сильных паводков на реке Куме (1,93), когда на территории водохранилища было множество малых водоёмов. Таким образом, в настоящее время берега водохранилища по своему характеру близки к среднеизрезанным (рис. 2).

Наибольшим изменениям подвергался водоём в северной части водохранилища, тогда как вновь сформированный водоём в юго-восточной его части, питаемый р. Золкой, оставался стабильным.

Дробление водохранилища на малые водоёмы привело к увеличению длины береговой линии, что способствовало активизации эрозионных процессов. Одновременно

[1] Разработка проекта правил использования Отказненского водохранилища. Книга 4. Правила технической эксплуатации и благоустройства Отказненского водохранилища. Пятигорск, 2014. 85 с.

огромные площади ложа освободились от воды и в настоящее время подвергаются совершенно другим природным и антропогенным процессам. На их территории заново формируются первичные почвы, а также растительность.

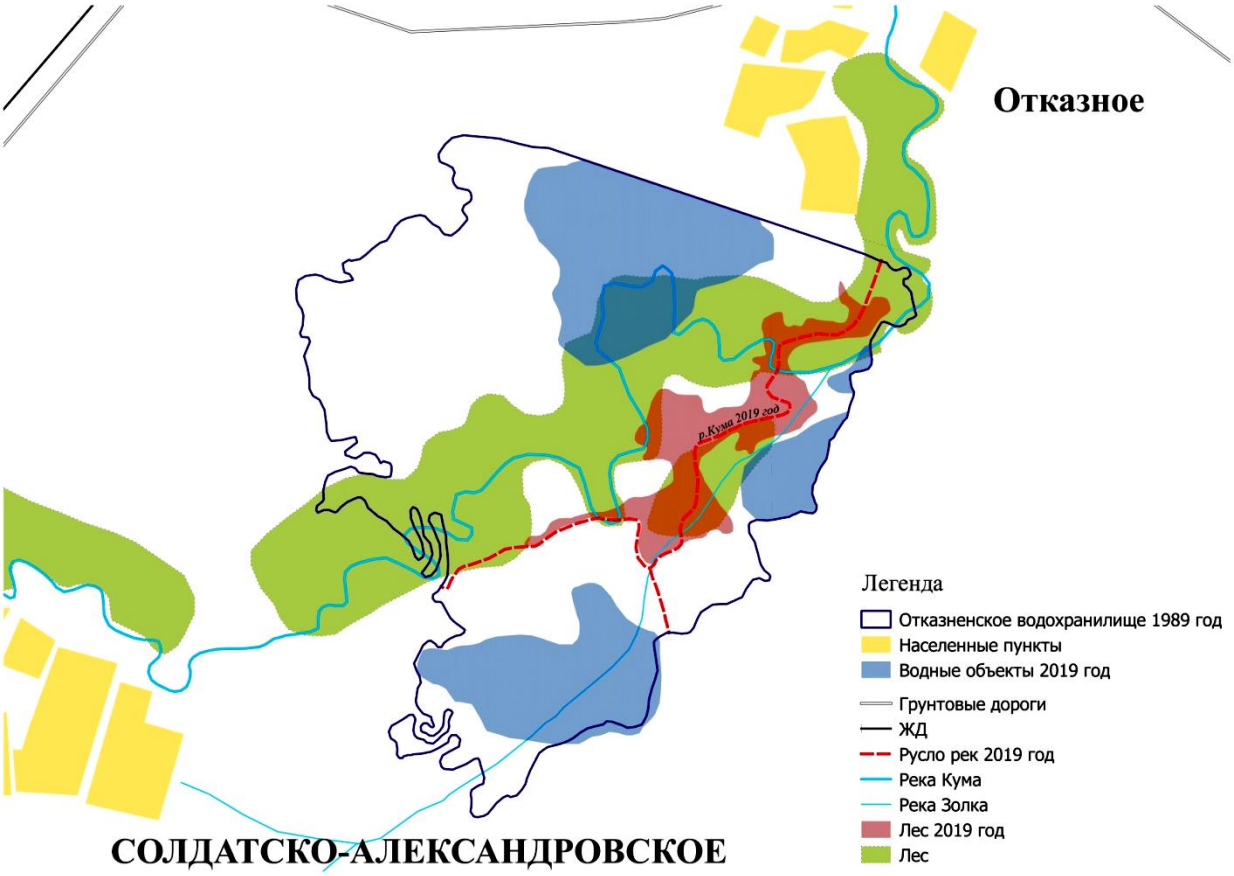


Рис. 2. Ситуационная схема вдхр. Отказненское на основе карты генштаба РККА юга России 1942 г. масштаба 1: 200 000 (в легенде обозначения даны без указания года) и данных ДЗЗ

Fig. 2. The situation scheme of Otkaznenskoe Reservoir on the basis of a map of the General Staff of the Red Army of the South of Russia 1942 on a scale of 1: 200 000 (in the legend the designations are given without indicating the year) and remote sensing data

Трансформация ПТК Отказненского вдхр. под воздействием природных и техногенных факторов привела к сглаживанию сезонных колебаний морфометрических параметров водохранилища (табл. 2). В наибольшей степени для периода с 2015 по 2018 гг. выражены изменения площади акватории в половодье — более чем в 3 р., тогда как в межень — только в 0,3 р. Динамика изменений береговой линии сходная: в половодье с 2015 по 2018 гг. её длина уменьшилась в 2,3 р., тогда как в межень — в 1,7 р.

К настоящему времени динамические процессы заметно ослабели, и с 2018 г. морфометрические параметры по сезонам сильно не изменялись. Выравнивание сезонных параметров водохранилища может быть следствием общей деградации Отказненского вдхр., в ходе которой сохранились наиболее устойчивые участки, имеющие сообщение с рр. Кумой и Золкой, а также из-за аккумуляции наносов, объём которых в ложе водохранилища по состоянию на 2014 г. составил 55,4 млн м^3 (табл. 2).

Строительство водохранилища в 1965 г. в бассейне р. Кумы привело к тому, что 12,82 км русла Кумы и 5,19 км её притока р. Золки оказались затоплены. После обмеления водохранилища р. Кума выработала новое русло длиной 8,54 км (р. Золка — 0,65 км). По сравнению с исходной (по данным топокарты 1942 г.) современная протяжённость реки в границах первоначальной акватории водохранилища уменьшилась на 51,02 %, а также значительно сократился уровень меандрированности. Современное русло реки в пределах бывшей акватории не является типичным для степной реки, а в большей степени приближается к гипотетически прямолинейному каналу, что в основном может быть связано с особой нестойкой механической структурой вновь сформированных илами грунтов. Русло р. Золки в настоящее время на территории водохранилища практически не выражено. Золка питает водоём юго-восточной части водохранилища, а в р. Куму впадает через искусственно созданный канал (рис. 2).

Табл. 2. Сезонная динамика параметров водохранилища в период 2015–2018 гг.
Table 2. Seasonal dynamics of reservoir parameters in the period 2015–2018

Год	Июнь			Октябрь		
	Площадь, км^2	Длина береговой линии, км	К извилистости	Площадь, км^2	Длина береговой линии, км	К извилистости
2015	10,83	30,63	0,90	4,99	20,71	1,32
2016	6,34	25,18	1,26	4,00	16,69	1,33
2017	5,51	33,45	1,93	4,10	19,98	1,55
2018	3,1	13,26	1,36	3,39	12,43	1,17

Помимо оставшихся фрагментов водохранилища в пределах бывшего ложа оформились новые земли (рис. 2). Для всех освободившихся от воды земель в пределах первоначальной акватории (1965 г.) в настоящее время категорию не изменяли, всё это по-прежнему земли водного фонда.

На части территории ложа водохранилища вдоль берегов реки при отступлении воды заново сформировались лесопокрытые территории. В прошлом площади пойменного леса (преобладающие породы — дуб и тополь) по состоянию на 1941 г. составляли 6,65 км^2 (учёт только в пределах полигона бывшего ложа), а в настоящее время — 1,75 км^2 (в основном ива, тамариск, тополь); при этом лишь за последнее десятилетие площадь лесопокрытых территорий увеличилась более чем в 2 р.

Заиливание и сокращение акватории водохранилища обнажало плодородные донные отложения. Уже в 1978 г. на освобождённых от воды территориях активно шли процессы почвообразования, что позволило местному населению уже в начале 2000-х гг. периодически использовать их для сельскохозяйственных целей (пашня). Отмеченный участок расположен в южной части бывшего ложа и граничит с с. Солдато-Александровским. Площадь обрабатываемой территории к настоящему времени по данным космоснимка достигла 2,74 км^2. Урожайность ярового ячменя в этих условиях невысока — 25 ц/га, что на 30–35 % меньше по сравнению с прилегающими сельскохозяйственными угодьями в связи с особым влажностным режимом почв бывшей территории акватории — он отличается от фонового. Для освободившихся акваторий Отказненского вдхр. средневзвешенное значение индекса влажности почв (WSVI) составило 0,0114, что на 60 % выше в сравнении с фоновым значением для прилегающих территорий — < 0,007 (рис. 3). Кроме того, следует отметить существование высоких рисков нерегулярных подтоплений пашни, например, только в 2002 г. форсированными паводковыми горизонтами упомянутый участок был затоплен, что вызвало гибель урожая ячменя и было отнесено к заранее оговоренным последствиям рискованного земледелия.

В настоящее время инициативы местных аграриев по переводу осушенных земель бывшей акватории в категорию земель сельскохозяйственного использования не получили развития в связи с планируемой реконструкцией водоёма.

Практически весь период своего существования водохранилище использовалось не только для водорегуляции и ирригационных целей, а также весьма успешно для рыболовства, рыбоводства и рекреации. Промысловый улов в отдельные годы (1989 г.) достигал 351 т при рыбопродуктивности 195,1 кг/га, а среднегодовой вылов в 1986–2010 гг. составил 154,7 т. Общие среднегодовые запасы рыбы водохранилища были связаны в основном с вселенцами — карпом и толстолобиками; 2-е место по массе в уловах занимал водный серебряный карась[1]. К настоящему времени из-за значительного изменения гидрологических характеристик водоём потерял своё как рыбохозяйственное, так и рекреационное назначение [*Мишвелов,* 2019; *Владимиров и др.*, 1991; *Дега,* 2015].

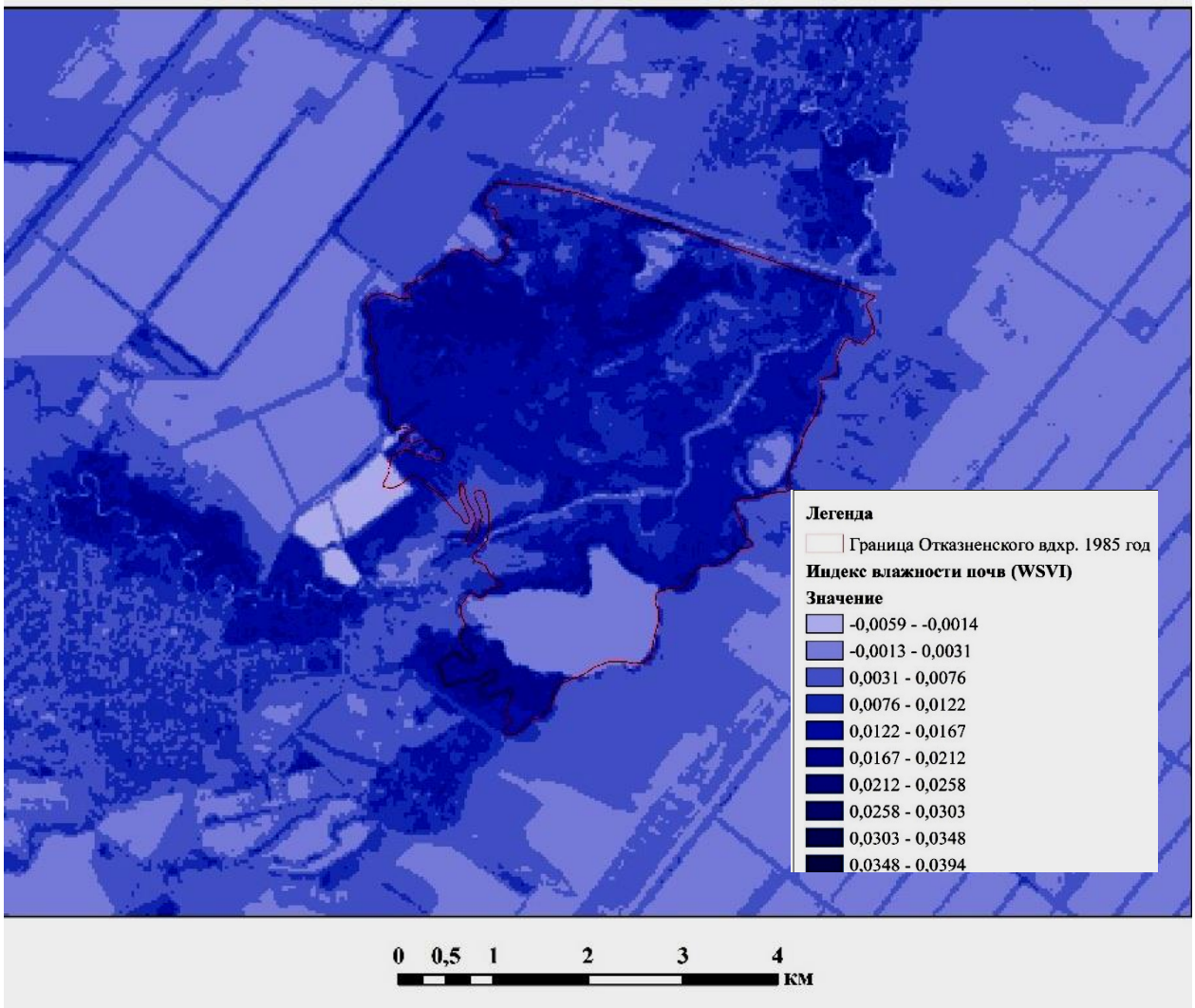


Рис. 3. Индекс влажности почв (WSVI) Отказненского водохранилища для 25.07.2018 г.
Fig. 3. Soil moisture index (WSVI) Otkaznensky Reservoir for July 25, 2018

[1] *Чумакова И.В., Мишвелов Е.Г., Деревягин Е.В.* Особенности рыбохозяйственного использования Отказненского водохранилища на р. Кума в связи эксплуатационными изменениями гидрологических характеристик. Научные исследования: от теории к практике: Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. № 5 (6). С. 25–26.

В 2005 г. в юго-западной части ложа водохранилища на территориях, освобождённых от воды, были созданы новые пруды (площадью 0,28 км^2), что вновь поменяло условия развития территории. В настоящее время площадь прудов увеличена до 0,76 км^2 в основном за счёт выемки иловых отложений и обвалования дамбами.

На территории водохранилища также образовался участок неправильной формы площадью около 1,76 км^2, свободный от воды, но ещё без сформировавшейся растительности и не освоенный населением под сельское хозяйство. На участке активно идут процессы почвообразования, а также эрозии, которая перераспределяет плодородный ил на соседние территории.

Таким образом, на территории ложа водохранилища в настоящее время активно идут природные сукцессионные процессы и антропогенное преобразование геосистем. Всё это способствует активизации геоморфологических, почвенных процессов и смене растительного покрова; формируются сельскохозяйственные ландшафты.

ВЫВОДЫ

За период эксплуатации Отказненского вдхр. произошла его значительная геоэкологическая трансформация, связанная с особенностями водообмена рельефа и отложений иловых наносов, интенсивность которых в отдельные годы достигала 1,35 млн м^3. Таким образом, полезный объём сократился в отмеченный период на 39,2 млн м^3. Мёртвый объём заилился на 81 % и составлял 3,2 млн м^3. Илонакопление, в первую очередь для западной пологой части ложа, по нашему мнению, привело к уменьшению площади водохранилища более чем в 6 р. в сравнении с проектной, его фрагментации и формированию малых самостоятельных водоёмов.

К 2018 г. береговая линия водохранилища сократилась почти в 2 р. по сравнению с проектными данными, а площадь водной поверхности сократилась более чем 6 р. Это способствовало увеличению коэффициента изрезанности береговой линии с 0,43 в 1965 г. до 1,36 в 2018 г. Одновременно огромные площади ложа освободились от воды и в настоящее время подвергаются совершенно другим природным и антропогенным процессам. На их территории заново формируются первичные почвы, а также растительность.

На начальный период наблюдений за сезонными динамическими процессами на территории водохранилища наблюдались значительные колебания уровня воды, которые к концу наблюдения выровнялись. В 2015 г. площадь в течении года менялась в 2 р., а в 2018 г. динамика изменения площади почти не выражена. Это может быть следствием деградации единой экосистемы водохранилища и формирования самостоятельных ПТК в его пределах.

Современное русло р. Кумы в пределах бывшей акватории водохранилища не является типичным для степной реки — её протяжённость уменьшилась на 51,02 % в сравнении с данными топокарты 1941 г.; снизилась и меандрированность. Конфигурация русла приближается к прямолинейному каналу, что в большей степени может быть связано с рыхлой несцементированной структурой вновь образованных илами грунтов, которые легко размываются водным потоком.

В пределах бывшего ложа оформились новые земли, подверженные ускоренным сукцессионным преобразованиям. Вдоль берега новообразованного «укороченного» русла р. Кумы последние десятилетия по мере отступления воды появляется лесная растительность. Новые лесопокрытые территории представлены в основном ивой, тамариском и тополем, тогда как до создания водохранилища преобладающими породами были дуб и тополь. Площадь вновь формируемого леса пока достигла лишь четверти (1,75 км^2) от исходной (6,65 км^2), отмеченной до создания водохранилища, вместе с тем отмечается тренд на её увеличение.

На освобождённых от воды территориях западной и юго-западной бывшей акватории активизировались процессы почвообразования, что позволило местному населению последние 15 лет активно использовать их для сельскохозяйственных целей (пашня). Площадь этих земель к настоящему времени достигла 2,74 км^2. Земледелие также ограничено высокими рисками нерегулярных подтоплений пашни.

В связи со значительным изменением гидрологических характеристик водоём потерял свое как рыбохозяйственное, так и рекреационное назначение.

В связи с неудовлетворительным экологическим состоянием водохранилища и значительным заилением в 2015 г. в рамках Федеральной целевой программы «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 г.» были начаты работы по его реконструкции, включающие ремонт гидротехнических сооружений, очистку от иловых отложений ложа водохранилища и строительство нового водосброса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абшаев М.Т., Борисова Н.В., Малкарова А.М.* О тенденции изменения климата на Северном Кавказе. Всемирная конференция по изменению климата: труды Конференции, Москва, 29 сент. − 3 окт. 2003 г. М., 2004. С. 365−366.

2. *Важнов А.Н.* Анализ и прогноз стока рек Кавказа. М.: Гидрометеоиздат, 1966. 275 с.

3. *Владимиров Л.А., Гигинейшвили Г.Н., Джавахишивили А.И., Закарашвили Н.Н.* Водный баланс Кавказа и его географические закономерности. Тбилиси: Мецниереба, 1991. 141 с.

4. *Дега Н.С., Онищенко В.В.* Эколого-географическая оценка горных территорий Северного Кавказа (на примере Карачаево-Черкесии). Карачаевск: Издательство КЧГУ, 2015. 165 с.

5. *Дегтяренко Т.И.* Климатические и антропогенные изменения стока рек Кавказа. Труды ВНИИГМИ–МЦД, 1988. Вып. 149.

6. *Ильичёв Ю.Г., Дега Н.С., Узденов У.А.* Современное оледенение Большого Кавказа. Малые ледники. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 116 с.

7. *Кондратенко А.А.* Оценка состояния и взаимодействия гидрографических сетей Ставрополья при их хозяйственном использовании: автореферат дисс. ... канд. техн. наук. Новочеркасск: Новочеркасская государственная мелиоративная академия, 2003. 24 с.

8. *Лурье И.К., Косиков А.Г.* Теория и практика цифровой обработки изображений. М.: Научный мир, 2003. 267 с.

9. *Лурье И.К., Косиков А.Г., Ушакова Л.А., Карпович Л.Л., Любимцев М.Ю., Тутубалина О.В.* Компьютерный практикум по цифровой обработке изображений и созданию ГИС. М.: Научный мир, 2004. 142 с.

10. *Мишвелов Е.Г.* Видовая структура уловов промысловых рыб в водоёмах Ставропольского края для периода конца XX – начала XXI веков. Юг России: экология, развитие, 2019. Т. 14. № 1. С. 169–177.

11. *Мишвелов Е.Г., Самотоев А.С.* Изучение водоресурсного потенциала Европейского Юга России с древнейших времен до конца XIX века. Вестник Ставропольского государственного университета, 2011 (а). № 74 (3). С. 178–183.

12. *Мишвелов Е.Г., Самотоев А.С.* Развитие научных представлений по проблеме осадконакопления в водоемах Российской Федерации. Вестник Ставропольского государственного университета, 2011 (б). № 77 (6). С. 220–226.

13. *Прыткова М.Я.* Географические закономерности осадконакопления в малых водохранилищах: Дисс... докт. геогр. наук. Л.: Институт озероведения АН СССР, 1982. 475 с.

14. *Abdul-Rahman A., Pilouk M.* Spatial Data Modelling for 3D GIS. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2008. 128 p.

15. Innovations in Remote Sensing and Photogrammetry. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. 468 p. DOI: 10.1007/978-3-540-93962-7.
16. *Johnson J.K.* Remote Sensing in Archaeology. Tuscaloosa: University of Alabama Press, 2006. 322 p.
17. *Richards J.A.* Remote Sensing with Imaging Radar. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 361 p.
18. Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology. Proceedings of a Training Workshop, 7−11 July 2003, Dehra Dun, India. 2003. 427 p.

REFERENCES

1. *Abdul-Rahman A., Pilouk M.* Spatial Data Modelling for 3D GIS. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2008. 128 p.
2. *Abshaev M.T., Borisova N.V., Malkarova A.M.* On the trend of climate change in the North Caucasus. Abstracts of the reports of the World conference on climate change. Moscow, 29 sept. − 3 oct. 2003. Moscow, 2004. P. 365−366 (in Russian).
3. *Degas N.S., Onishchenko V.V.* Ecological and geographical assessment of the mountain territories of the North Caucasus (on the example of Karachay-Cherkessia). Karachaevsk: Publishing House of KCHSU, 2015. 165 p. (in Russian).
4. *Degtyarenko T.I.* Climatic and anthropogenic changes in the flow of the rivers of the Caucasus. Proceedings of RIHMI–WDC, 1988. Iss. 149 (in Russian).
5. *Ilyichev Yu.G., Degas N.S., Uzdenov U.A.* Modern glaciation of the Greater Caucasus. Small glaciers. Moscow: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 116 p. (in Russian).
6. Innovations in Remote Sensing and Photogrammetry. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. 468 p. DOI: 10.1007/978-3-540-93962-7.
7. *Johnson J.K.* Remote Sensing in Archaeology. Tuscaloosa: University of Alabama Press, 2006. 322 p.
8. *Kondratenko A.A.* Assessment of the state and interaction of hydrographic networks of the Stavropol Territory during their economic use: Abstract of diss. of PhD of technical sciences. Novocherkass: Novocherkassk State Land Reclamation Academy, 2003. 24 p. (in Russian).
9. *Lurie I.K., Kosikov A.G.* Theory and practice of digital image processing. Moscow: Scientific World, 2003. 267 p. (in Russian).
10. *Lurie I.K., Kosikov A.G., Ushakova L.A., Karpovich L.L., Lyubimtsev M.Yu., Tutubalina O.V.* Computer workshop on digital image processing and the creation of GIS. Moscow: Scientific World, 2004. 142 p. (in Russian).
11. *Mishvelov E.G.* The species structure of commercial fish in the reservoirs of the Stavropol Territory for the period of the late XX – early XXI centuries. South of Russia: Ecology, Development, 2019. V. 14. No 1. P. 169–177 (in Russian).
12. *Mishvelov E.G., Samotoev A.S.* Study of the water resource potential of the European South of Russia from ancient times to the end of the XIX century. Vestnik Stavropol State University's (Bulletin of the Stavropol State University), 2011 (a). No 74 (3). P. 178–183 (in Russian).
13. *Mishvelov E.G., Samotoev A.S.* Development of scientific ideas on the problem of sedimentation in the water bodies of the Russian Federation. Vestnik Stavropol State University's (Bulletin of the Stavropol State University), 2011 (b). No 77 (6). P. 220–226 (in Russian).
14. *Prytkova M.Ya.* Geographical patterns of sedimentation in small reservoirs. Dis. ... Dr. geogr. sciences. Leningrad: Institute of Lake Science of Academy of Sciences of the USSR, 1982. 475 p. (in Russian).
15. *Richards J.A.* Remote Sensing with Imaging Radar. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 361 p.
16. Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology. Proceedings of a Training Workshop, 7−11 July 2003, Dehra Dun, India. 2003. 427 p.

17. *Vazhnov A.N.* Analysis and forecast of river flow in the Caucasus. Moscow: Gidrometeoizdat, 1966. 275 p. (in Russian).
18. *Vladimirov L.A., Gigineishvili G.N., Javakhishivili A.I., Zakarashvili H.H.* The water balance of the Caucasus and its geographical patterns. Tbilisi: Metsniereba, 1991. 141 p. (in Russian).

УДК: 528.8+681.3:574.4 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-396-407**

П.Ю. Литинский[1]

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭКОСИСТЕМ ВОДОСБОРА р. КЕМЬ (БАССЕЙН БЕЛОГО МОРЯ) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ GLOBAL FOREST CHANGE

АННОТАЦИЯ

Проведён анализ изменений растительного покрова водосбора в результате промышленного освоения его территории, прежде всего рубки лесов. При обработке снимков Landsat (покрытие GFC) использовался метод моделирования спектрального пространства, обеспечивающий более высокую достоверность результатов классификации по сравнению с традиционными методами. Наиболее существенные изменения на водосборе произошли с 1930-х гг. — начала масштабных рубок, до конца 1990-х. Значительно, более чем на 60 %, уменьшились площади старовозрастных лесов, крупные их массивы остались лишь в охраняемых природных территориях, а также вокруг крупных озёр и вдоль крупных рек благодаря наличию водоохранных зон. В период с 2000 до 2018 гг. за счёт вырубок ещё более уменьшилась площадь продуктивных лесов; они сохранились в основном в пределах охраняемых природных территорий. К 2018 г. отмечается возникновение на значительных (до 70 %) площадях вырубок вторичных (производных) лесов, что свидетельствует о достаточно высоком регенерационном потенциале экосистем водосбора. Для восстановления пространственной структуры лесного покрова в период до начала сканерной съёмки Landsat использовался метод отслеживания траекторий лесовозобновительных сукцессий в спектральном пространстве. Сравнение результатов с данными GFC loss/gain 2000–2018 показало почти полное совпадение по вырубкам, но по возобновлению леса метод отслеживания траекторий показал многократно более высокие результаты, поскольку он выявляет возобновление на значительно более ранней стадии. Отработанная методика будет применяться на водосборах других притоков Белого моря, а результаты использованы в качестве входных данных эколого-социо-экономической когнитивной модели, прогнозирующей состояние экосистем при изменениях климата и приоритетов экономики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: таёжные экосистемы, антропогенные изменения, водосбор Белого моря, данные Global Forest Change

Peter Yu. Litinsky[2]

ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF ANTHROPOGENIC CHANGES IN ECOSYSTEMS OF THE KEM RIVER CATCHMENT (WHITE SEA BASIN) USING GLOBAL FOREST CHANGE DATA

ABSTRACT

The analysis of changes in the catchment vegetation cover as a result of industrial development of its territory, primarily deforestation, was carried out. For processing Landsat

[1] Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», пр. А. Невского, 50, 185030, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия; *e-mail:* **litinsky@sampo.ru**

[2] Northern Water Problems Institute, KRC RAS (Karelian Research Center of RAS), A. Nevsky Ave, 50, 183030, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia; *e-mail:* **litinsky@sampo.ru**

images, the spectral space modeling method was used, which provides higher reliability of the classification results compared to traditional methods. The most significant changes in the catchment occurred from the 1930s (the beginning of large-scale logging), until the end of the 1990s. Significantly, by more than 60 %, the area of old-growth forests decreased, their large fragments remained only in nature protected areas, as well as around large lakes and along large rivers, due to the presence of water protection zones. In the period from 2000 to 2018 due to deforestation, the area of productive forests decreased even more. Nevertheless, by 2019 the occurrence of secondary reforestation on significant areas (up to 70 %) is noted, which indicates a sufficiently high regeneration potential of the catchment ecosystems. To restore the spatial structure of the forest cover in the period before the start of the Landsat 5 operation, the method of tracking the trajectories of reforestation successions in the spectral space was used. A comparison with the results of the Global Forest Change 2000–2018 data (loss/gain) showed almost complete coincidence in cuttings (loss), but the method of reforestation trajectories showed many times higher results in forest gain, since it reveals forest regeneration at a much earlier stage. The developed methodology will be applied on the catchments of other tributaries of the White Sea, and the results will be used as input to an environmental-socio-economic cognitive model that predicts the state of ecosystems under climate changes and economic priorities.

KEYWORDS: boreal ecosystems, anthropogenic changes, White Sea basin, Global Forest Change data

ВВЕДЕНИЕ

Беломорье (Белое море и его водосбор) занимает почти 10 % территории Арктической зоны России; площадь водосбора > 710 000 км^2. Регион имеет большое практическое значение в рамках освоения ресурсов Арктики, в связи с чем в настоящее время Карельский НЦ РАН проводит системные исследования происходящих здесь социо-эколого-экономических процессов. Разрабатываются когнитивные модели этих процессов с целью прогноза влияния климатических и антропогенных изменений на экосистемы и планирования хозяйственной деятельности. Для их информационного обеспечения создаются различные базы данных и электронные атласы [*Филатов и др.*, 2019]. До последнего времени картографические данные имели лишь обзорный характер (м-б 1: 1 000 000 и менее); актуальная геоинформация о структуре и состоянии экосистем имелась лишь для отдельных фрагментов территории.

Создание детальной геоинформационной модели экосистем всего бассейна Белого моря начато с водосбора р. Кемь — одного из крупных западных притоков. Водосбор площадью 27 000 км^2 расположен к востоку от Беломорско-Балтийского водораздела (высоты на данном участке — 300–350 м н.у.м.), по которому проходит российско-финляндская граница. Около 400 км^2 водосбора находится на территории Финляндии. Территория малонаселённая, однако подвержена значительной антропогенной трансформации. Здесь расположен относительно крупный промышленный центр — введённый в эксплуатацию в 1980 г. Костомукшский горно-обогатительный комбинат (ныне АО «Карельский окатыш») — ведущий комбинат по добыче и переработке железной руды в России. Важнейшая отрасль экономики — лесозаготовительная промышленность; масштабные рубки ведутся с 1930-х гг. и ещё более интенсивные — с конца 1950-х гг., поэтому более 2/3 лесов в настоящее время моложе 60–70 лет. Крупные фрагменты старовозрастных лесов остались только вдоль финско-российской границы. Сельскохозяйственные угодья (в основном луга) занимают менее 1 % площади.

Регион хорошо изучен учёными Карельского НЦ РАН [Biotic..., 2003]; одним из результатов этой работы стало создание значительных по площади охраняемых природных территорий, входящих в систему «Зелёного пояса Фенноскандии». Таким

образом, на водосборе представлен весь спектр состояний экосистем — от практически девственного до глубоко антропогенно трансформированного. Территория водосбора служила модельным полигоном для разработки нового метода извлечения информации из сканерных снимков [*Литинский,* 2018], который и применялся в данном исследовании.

Результаты исследований динамики лесного покрова необходимы для прогнозирования как экологических, так и экономических и социальных процессов. Наземные экосистемы поддерживают важнейшие биогеохимические циклы, формируют основной объём потоков парниковых газов между поверхностью Земли и атмосферой и определяют водный, радиационный, температурный режим суши и систему атмосферной циркуляции над континентами [*Pavlov, Bukvareva*, 2012]. Антропогенная деятельность — рубки леса, увеличение числа пожаров — смещает сложившийся углеродный баланс. Рубки, особенно сплошные, помимо изъятия древесной биомассы и прекращения фотосинтеза, оказывают и другое воздействие на баланс углерода — идёт разложение порубочных остатков, а повреждение почвы приводит к вымыванию запасённого в ней углерода в водоёмы, что в свою очередь изменяет их углеродный баланс [*Замолодчиков и др*., 2015].

Территория относится к гумидной зоне, где вклад наземных экосистем в глобальный углеродный баланс увеличивается в связи с тем, что они являются источниками поступления терригенного углерода в водные экосистемы. В последнее время меняется оценка масштабов трансформации углерода во внутренних водах. Исследования показывают, что внутренние водоёмы вносят значительный вклад в углеродный цикл: глобальные годовые выбросы углекислого газа из внутренних вод в атмосферу сходны по величине с его поглощением океанами, а глобальное захоронение органического углерода в донных отложениях озёр превышает накопление органического углерода на дне океана [*Tranvik et al*., 2009].

Целью исследования является анализ изменения растительного покрова водосбора с целью оценки его экологической роли и ресурсного потенциала, а также отработка методики, которая будет применятся на других территориях Беломорья. Одновременно проводилась предварительная оценка степени пригодности для оценки динамики растительности конкретных территорий глобальных данных Global Forest Change [*Hansen et al*., 2013].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Природные условия территории

Территория водосбора (рис. 1) представляет собой типичный образец континентального оледенения. Четвертичный покров сформирован ледниковыми (моренными), флювиогляциальными песчаными и песчано-глинистыми озёрными отложениями. Значительны площади обнажений коренных пород Балтийского щита. Это обусловливает сложность гидрологических условий и высокую мозаичность растительного покрова. Территория относится к северотаёжной подзоне; около 60 % площади занято лесами; преобладающие породы — сосна обыкновенная (*Pinus silvestris L.*) и ель европейская (*Picea abies (L.) Karst*). Берёза пушистая (*Betula pubescens Ehrh.*) присутствует в составе хвойных лесов и доминирует во вторичных лесах на ранних стадиях восстановления. Более 80 % лесных угодий покрыто сосновыми лесами, которые встречаются практически во всех типах местообитаний [*Волков и др*., 1995]. Ельники (12 % лесных площадей) произрастают в основном на склонах моренных холмов.

Средняя годовая температура составляет около 0° С, осадки — 500–550 мм. Из-за высокого увлажнения и малого испарения открытые торфяные болота в целом занимают более трети территории: в западной возвышенной части — около 20 %, в восточной — на Прибеломорской низменности — более половины. Они представлены двумя основными типами: олиготрофными сфагновыми и мезотрофными осоково-сфагновыми. Крупнейшие

болотные системы расположены на морских и озёрных равнинах. Озёрность водосбора — более 10 % [Biotic..., 2003].

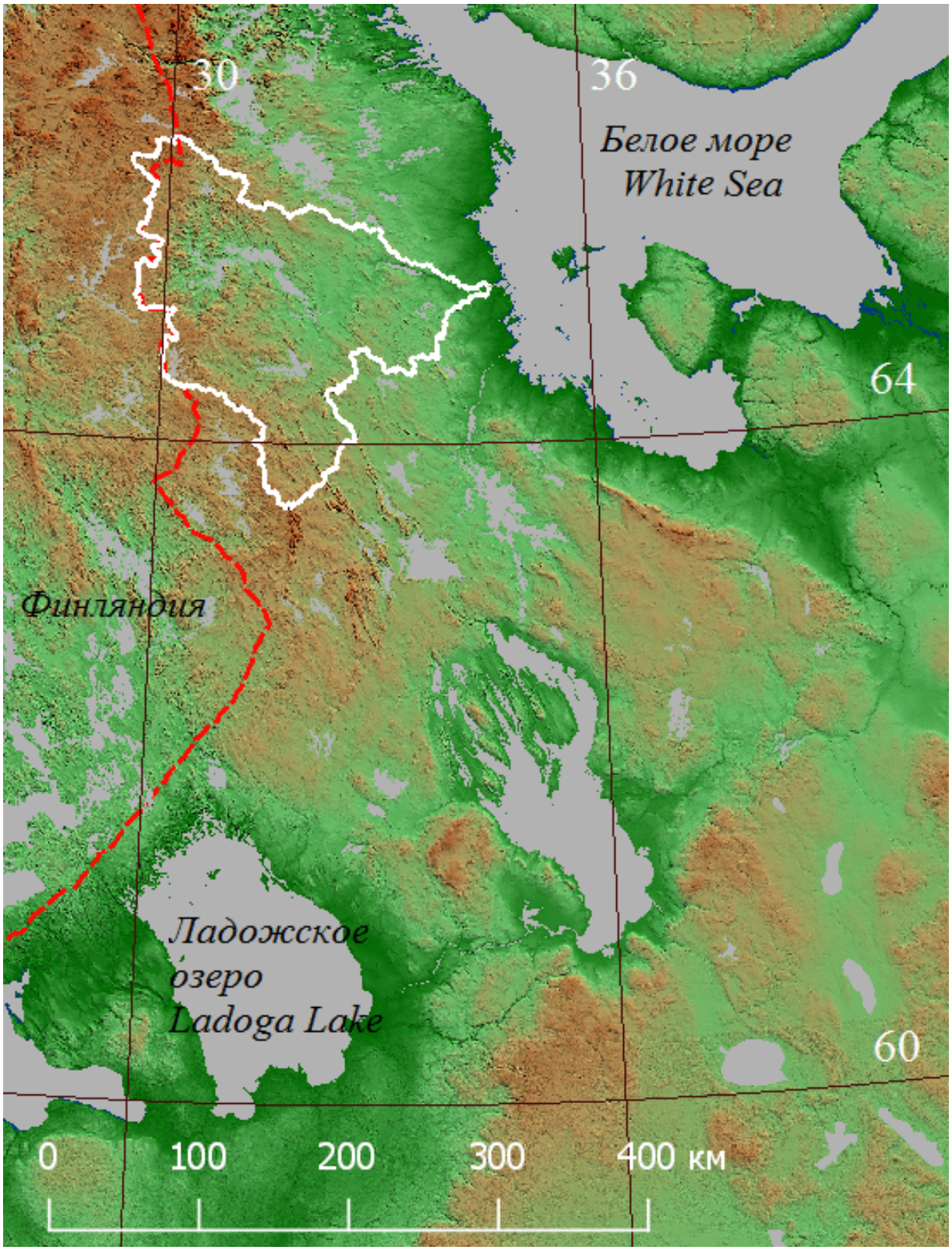


Рис. 1. Границы водосбора р. Кемь
Fig. 1. Location of the Kem River catchment

Исходные данные и программное обеспечение. Для выявления динамики растительного покрова использовались данные Global Forest Change (http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest), которые представляют собой геометрически и радиометрически целостное глобальное покрытие, созданное из безоблачных сцен Landsat 7 и 8. Покрытие включает два основных массива информации: а) исходные спектральные данные (наиболее информативные каналы R, NIR, SWIR1, SWIR2) для 2000 г. (first) и 2018 г. (last) и б) сформированные на их основе слои: данные о лесном покрове на 2000 г. (treecover), потерях лесного покрова в последующие годы от пожаров и вырубок (lossyear) и восстановлении лесов (gain). Все данные представлены в виде растров размером 10 на 10° с разрешением 0.00025°, что обеспечивает практически полное сохранение информативности исходного разрешения 30 м. Формат файлов — Byte GeoTiff. Для получения данных до 2000 г. использовались снимки Landsat TM 1988–1994 гг. paths 184–188, rows 14–15, взятые на сайте USGS https://earthexplorer.usgs.gov.

Для моделирования рельефа с целью определения границ водосбора использовалась цифровая модель высот (DEM) с пространственным разрешением 3″ (приблизительно 50×90 м) и 1 м по высоте (http://viewfinderpanoramas.org). Стандартные операции пре- и постпроцессорной обработки снимков, формирование модели высот и гидрологическое моделирование рельефа (структура водосборов) проводилось с использованием ГИС-пакетов QGIS, GRASS, SAGA (www.qgis.org).

Методика создания модели растительного покрова разработана автором в результате многолетнего изучения структуры и динамики экосистем северотаёжной подзоны Карелии дистанционными методами. Она основана на создании по данным наземных ключевых участков 3D-модели определённым образом трансформированного спектрального пространства сканерного снимка и её сопоставления с биогеоценотической схемой территории [*Литинский, 2018; Litinsky*, 2018]. Созданная таким образом модель чётко отражает естественную структуру растительного покрова, определяемую типом четвертичных отложений и условиями водно-минерального питания, и обеспечивает достоверное выделение различных типов и стадий антропогенных нарушений экосистем. Создание модели спектрального пространства снимков и их классификация проводилось с использованием оригинального программного модуля (свид. о гос. регистрации № 2019662057).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

К настоящему времени модель спектрального пространства включает все основные типы лесных и болотных экосистем данной территории (табл. 1). Для выявления самых существенных особенностей динамики растительного покрова была осуществлена генерализация классифицированных снимков до пяти наиболее контрастных по экологическим и экономическим параметрам категорий:

- озёра;
- спелые леса;
- возникающие на месте вырубок вторичные (производные) леса;
- лишённые растительности категории — карьеры, дороги, застройка;
- открытые болота.

Положение этих категорий в спектральном пространстве показано на рис. 2. Оси координат — LC1 и LC2 — соответственно первая и вторая главные компоненты логарифмированной матрицы снимка (каналы R, NIR, SWIR2), MSI — индекс стресса влажности (отношение каналов SWIR1 и NIR).

Табл. 1. Основные классы экосистем
Table 1. Main ecosystem classes

Спектральные классы (номера соответствуют рис. 2) Spectral classes (numbers as in fig. 2)		**Четвертичные отложения, рельеф Quaternary deposits, relief**
1	сосняки зеленомошные mixed pine/spruce stands on moraine	моренные холмы moraine hill
2	низкополнотные хвойные sparse conifer stands	lacustrine planes – spruce
		холмы денудационно-тектонические (тонкий слой морены) — сосняки denudation-tectonic hills (thin moraine) – pine
3	сосняки брусничные pine stands on sand	флювиогляциальные дельты fluvioglacial deltas
4	сосняки скальные pine stands on rock	скальные обнажения no deposits
5	сосняки багульниковые pine stands on shallow peat (ledum type)	озёрные равнины lacustrine planes
6	сосняки сфагновые pine stands (sphagnum type)	озёрные равнины, локальные депрессии lacustrine planes, local depressions
7	сосняки осоково-сфагновые pine stands (carex-sphagnum type)	
8	высокополнотные ельники dense spruce stands	моренные холмы moraine hill
10 11–15	свежая вырубка new clearcut возобновление сосны pine regeneration	
21–24	болота мезотрофные mesotrophic bogs	озёрные равнины, локальные депрессии lacustrine planes, local depressions
41–44	болота олиготрофные oligotrophic bogs	
81–85	нерастительные категории non-vegetation (rocks, sands)	

Для восстановления пространственной структуры лесного покрова в период до начала сканерной съёмки Landsat 5 в 1985–1986 гг. использовался метод отслеживания траекторий лесовосстановительных сукцессий в спектральном пространстве (рис. 3). Линия, аппроксимирующая положение категории в 3D-пространстве, описывается системой двух уравнений вида:

$$y = f_1(x);$$
$$z = f_2(x, y);$$

где x, y, z — оси LC1, LC2, MSI соответственно;
f_1, f_2 – полиномиальная регрессия 1-3 степени.

Категории, положение которых в спектральном пространстве на снимках 1986–2018-х гг. соответствует показанной на рис. 3 траектории на определённом возрастном отрезке, ранее являлись спелыми лесами (показаны зелёным цветом на рис. 2).

Итоговые данные изменений растительного покрова водосбора за последние 100 лет приведены на рис. 4. Цветовая палитра рис. 2 и 4 одинакова, чтобы подчеркнуть тот факт, что в основе схемы классификации заложены объективные, измеряемые сканером параметры, определяющие положение той или иной категории земной поверхности

в спектральном пространстве снимка. Это обеспечивает максимальную достоверность результатов обработки снимка.

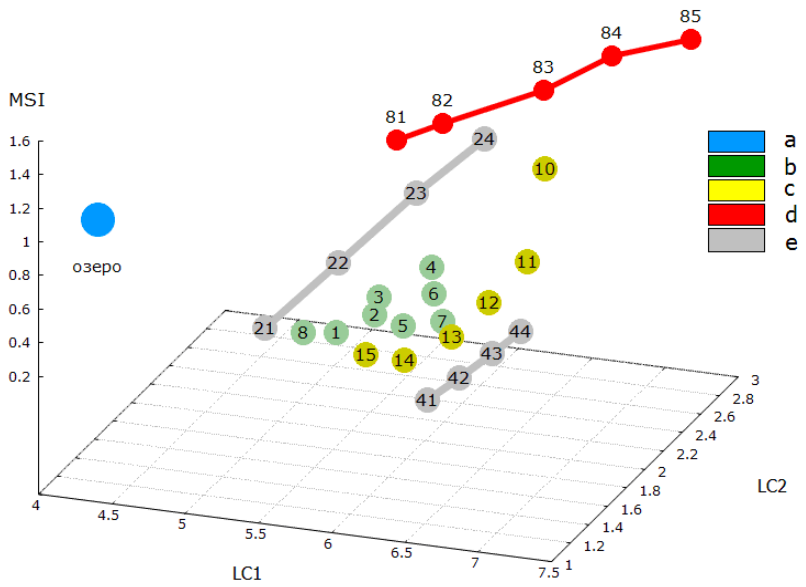


Рис. 2. Модель спектрального пространства снимка Landsat.
Цветовая схема: a — озёра; b — спелые леса; c — возобновление леса;
d — нерастительные категории; e — открытые болота.
Номера классов приведены в табл. 1
Fig. 2. Landsat timage spectral space model.
Colors: a — lakes; b — old growth forests; c — forest regeneration; d — non-vegetation;
e — peatlands. Numbers of classes are given in table 1

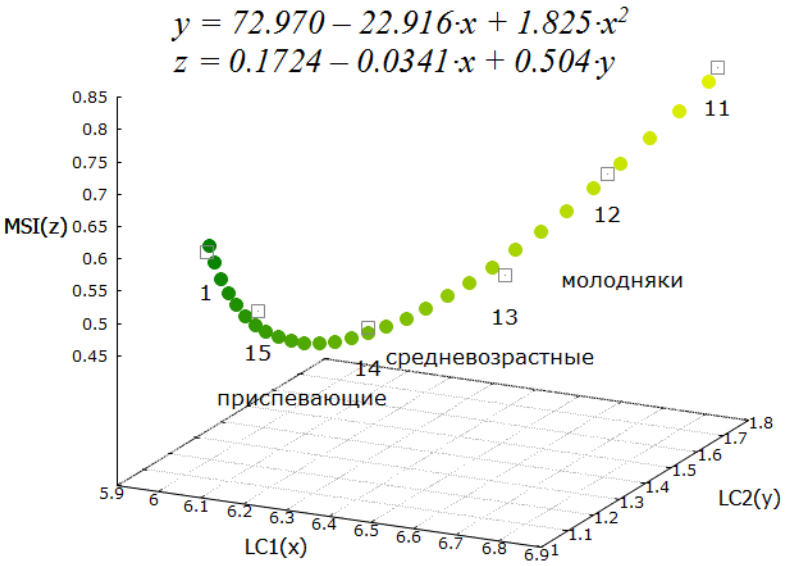


Рис. 3. Траектория лесовосстановления в спектральном пространстве.
Номера классов те же, что и на рис. 2 и табл. 1
Fig. 3. Forest regeneration trajectory in the spectral space.
Numbers of classes are given in fig. 2 and table 1

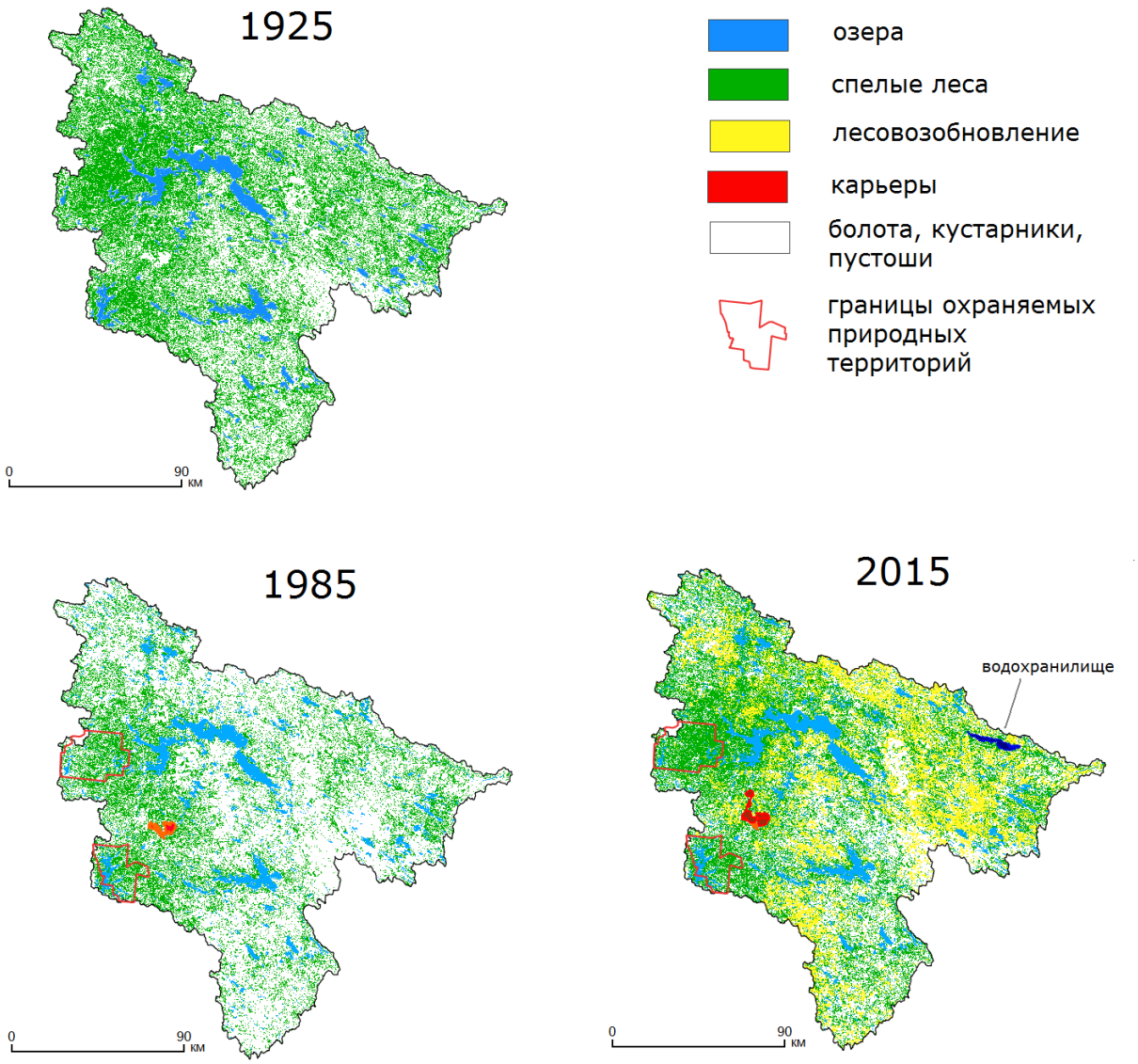


Рис. 4. Динамика лесного покрова водосбора в период 1925–2015 гг.
Цветовая схема та же, что и на рис. 2
Fig. 4. Forest cover dynamics in 1925–2015.
Color palette is the same as in fig. 2

Наиболее существенные изменения произошли с 1930-х гг. (начала концентрированных рубок) до конца 1990-х. Значительно, более чем на 60 %, уменьшились площади старовозрастных лесов; крупные их массивы остались лишь в охраняемых природных территориях, а также вокруг крупных озёр и вдоль крупных рек благодаря наличию водоохранных зон. Рубки проводились в наиболее продуктивных лесах (категории 1, 2 и 8 в табл. 1 и на рис. 2). В период с 2000 до 2018 гг. за счёт вырубок ещё более уменьшилась площадь продуктивных лесов вблизи охраняемых территорий, но к 2018 г. отмечается существенное увеличение площадей вторичных, возникших на местах рубок лесов (категории 13–14 на рис. 2).

Произошедшие в этот период изменения, вызванные другими видами антропогенного воздействия, незначительны и в сумме не превышают 1 % площади водосбора. Несколько увеличились площади карьеров Костомукшского ГОКа и г. Костомукша; ныне они составляют 0.26 % водосбора. Площадь лесных пожаров в любом периоде времени не превышает десятой доли процента. Площадь водохранилища Кривопорожской ГЭС, введённой в эксплуатацию в конце 1980-х гг. — менее 0.1 % водосбора. Изменений в пространственной структуре болот за изучаемый период (которые могли бы быть достоверно выявлены дистанционными методами) не отмечено.

Сравнение полученных результатов с данными treecover, lossyear и gain покрытия Global Forest Change показало следующее. Используемый при создании слоя treecover алгоритм выявляет участки, на которых сформировался сомкнутый полог деревьев выше 5 м. На данной территории к ним были отнесены классы 1 и 8 (табл. 1, рис. 2) с практически полным совпадением результатов. Однако классы 2 и 3, представляющие собой сосновые древостои с сомкнутостью выше 0.5 и высотой более 15 м, данный алгоритм не относит к лесному покрову. Вероятно, причина эта в более ажурном, «прозрачном» пологе сосны, произрастающей в условиях недостаточного увлажнения, и универсальный алгоритм не может учитывать все локальные особенности растительности.

Результаты по вырубкам (forest loss) практически совпадают, поскольку выявление вырубок не представляет методической проблемы ввиду резкого изменения спектральной сигнатуры. Данный слой предоставляет погодичную динамику уменьшения лесного покрова (рис. 5). Ежегодные потери от вырубок в последнее десятилетие составляют не более 0.2 % площади водосбора. Пик 2013 г. вызван относительно крупным пожаром в южной части водосбора.

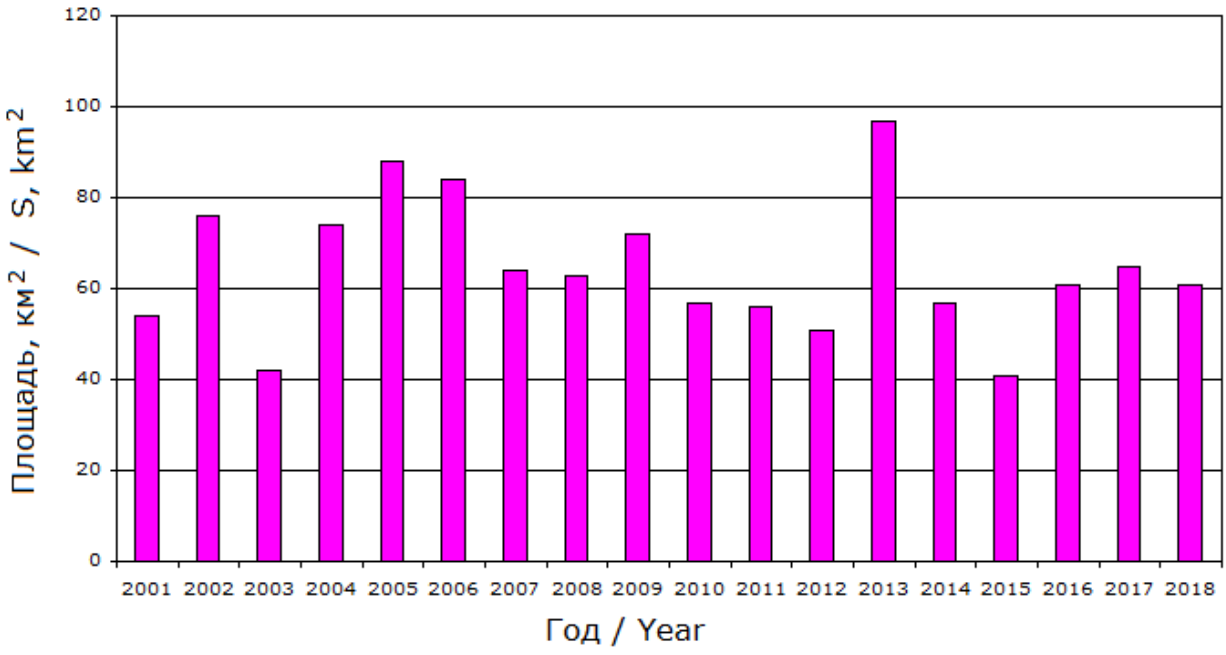


Рис. 5. Динамика потерь лесного покрова по данным GFC
Fig. 5. Forest loss dynamics by GFC data

Данные по возобновлению (gain) многократно ниже приведённых на рис. 4; опять же по причине используемого в GFC алгоритма основная часть производных лесов в настоящее время находится в стадии средневозрастных, где средняя высота превышает

5 м, но доля хвойных пород ещё невелика. Таким образом, метод отслеживания траекторий в спектральном пространстве выявляет возобновление на значительно более ранней стадии.

ВЫВОДЫ

В результате исследований впервые с высокой степенью детальности и достоверности выявлены пространственная структура экосистем водосбора р. Кемь и динамика их антропогенных изменений с 1-ой половины XX в. Благодаря использованию метода моделирования спектрального пространства восстановлено состояние растительного покрова до начала массовых вырубок леса в 1930–1950-х гг. и проявления изменений климата, т.е. в состоянии, близком к естественному, «фоновому». С тех пор на территории водосбора произошло существенное, более чем на 60 %, уменьшение площадей продуктивных старовозрастных лесов, однако к настоящему времени наблюдается повсеместное возникновение на месте вырубок вторичных (производных) лесов, что свидетельствует о достаточно высоком восстановительном потенциале экосистем водосбора. Отработанная методика будет применяться на водосборах др. притоков Белого моря с ориентацией на связь с моделью экосистемы Белого моря [*Толстиков и др.,* 2018]. Полученные результаты будут использованы в качестве входных данных эколого-социо-экономической когнитивной модели, прогнозирующей состояние экосистем при изменениях климата и приоритетов экономики.

Использование данных GFC многократно снижает трудоёмкость извлечения информации из снимков Landsat, поскольку практически исключается большинство операций препроцессорной обработки (выбор безоблачных сцен, геометрическая коррекция, выравнивание гистограмм). В совокупности с применением для обработки данных метода моделирования спектрального пространства это даёт возможность создания по единой методике моделей растительного покрова больших территорий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по гранту РФФИ «Арктика» № 18-05-60296.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out in accordance with the RFBR project “Arctic” № 18-05-60296.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Волков А.Д., Громцев А.Н., Еруков Г.В., Караваев В.Н., Коломыцев В.А., Курхинен Ю.П., Рукосуев С.И., Сазонов С.В., Шелехов А.М.* Экосистемы ландшафтов запада северной тайги (структура, динамика). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1995. 194 с.

2. *Замолодчиков Д.Г., Кобяков К.К., Кокорин А.О., Алейников А.А., Шматков Н.М.* Лес и климат. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2015. 40 с.

3. *Литинский П.Ю.* 3D-модель спектрального пространства снимков Landsat как основа геоматической модели бореальных экосистем. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. Т. 24. Ч. 2. С. 116–128. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-116-128.

4. *Толстиков А.В., Чернов И.А., Мартынова Д.М.* Решение проблемы необходимых данных для численного моделирования процессов в Белом море в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации. Арктика: экология и экономика, 2018. С. 45–55. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-45-55.

5. *Филатов Н.Н., Дружинин П.В., Меншуткин В.В.* Информационное обеспечение комплексных исследований природной среды и социо-экономических условий Белого моря и водосбора. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого

развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2019. Т. 25. Ч. 1. P. 122–137. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-122-137.
6. Biotic diversity of Karelia: conditions of formation, communities and species. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS, 2003. 244 p.
7. *Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V. Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G.* High-resolution global maps of 21st century forest cover change. Science, 2013. V. 342. Iss. 6160. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.
8. *Litinsky P.* Visualization of Landsat image spectral space as a method of boreal ecosystems geomatic modeling (on the example of Eastern Fennoscandia). Geoinformatics & Geostatistics: An Overview, 2018. V. 6. Iss. 3. DOI: 10.4172/2327-4581.1000183.
9. *Pavlov D.S., Bukvareva E.N.* Climate-regulating functions of terrestrial ecosystems and "environmentally friendly" concept of nature management. Biology Bulletin Reviews, 2012. No 2. P. 105–123. DOI: 10.1134/S2079086412020053.
10. *Tranvik L.J., Downing J.A., Cotner J.B., Loiselle S.A., Striegl R.G., Ballatore T.J., Dillon P., Finlay K., Fortino K., Knoll L.B., Kortelainen P.L., Kutser T., Larsen S., Laurion I., Leech D.M., McCallister S.L., McKnight D.M., Melack J.M., Overholt E., Porter J.A., Prairie Y., Renwick W.H., Roland F., Sherman B.S., Schindler D.W., Sobek S., Tremblay A., Vanni M.J, Verchoor A.M., Wachenfeldt E., Weyhenmeyer G.A.* Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. Limnology and oceanography, 2009. V. 54. Iss. 6. Part 2. P. 2298–2314. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298.

REFERENCES

1. Biotic diversity of Karelia: conditions of formation, communities and species. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS. 2003. 244 p.
2. *Filatov N.N., Druzhinin P.V., Menshutkin V.V.* Information support of investigations of environment and socio-economic conditions of White Sea and watershed. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2019. V. 25. Part 1. P. 122–137. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-122-137 (in Russian, abs English).
3. *Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V. Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G.* High-resolution global maps of 21st century forest cover change. Science, 2013. V. 342. Iss. 6160. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.
4. *Litinsky P.Yu.* 3D model of the spectral space of Landsat images as the basis of the boreal ecosystems geomatic model. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Petrozavodsk: KRC RAS, 2018. V. 24. Part 2. P. 116–128. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-116-128 (in Russian, abs English).
5. *Litinsky P.* Visualization of Landsat image spectral space as a method of boreal ecosystems geomatic modeling (on the example of Eastern Fennoscandia). Geoinformatics & Geostatistics: An Overview, 2018. V. 6. Iss. 3. DOI: 10.4172/2327-4581.1000183.
6. *Pavlov D.S., Bukvareva E.N.* Climate-regulating functions of terrestrial ecosystems and "environmentally friendly" concept of nature management. Biology Bulletin Reviews, 2012. No 2. P. 105–123. DOI: 10.1134/S2079086412020053.
7. *Tolstikov A.V., Chernov I.A., Martynova D.M.* Solution of the problem of necessary data for numerical modeling of processes in the White Sea in the interests of the development of the Arctic zone of the Russian Federation. Arctic: ecology and economics, 2018. P. 45–55. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-45-55 (in Russian).
8. *Tranvik L.J., Downing J.A., Cotner J.B., Loiselle S.A., Striegl R.G., Ballatore T.J., Dillon P., Finlay K., Fortino K., Knoll L.B., Kortelainen P.L., Kutser T., Larsen S., Laurion I., Leech D.M., McCallister S.L., McKnight D.M., Melack J.M., Overholt E., Porter J.A., Prairie Y., Renwick*

W.H., Roland F., Sherman B.S., Schindler D.W., Sobek S., Tremblay A., Vanni M.J, Verchoor A.M., Wachenfeldt E., Weyhenmeyer G.A. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. Limnology and oceanography, 2009. V. 54. Iss. 6. Part 2. P. 2298–2314. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298.

9. *Volkov A.D., Gromtzev A.N., Erukov G.V. Karavaev V.N., Kolomytsev V.A., Kurhinen Y.P., Rukosuev S.I., Sazonov S.V., Shelehov A.M.* Ecosystems of north-west taiga landscapes (structure, dynamics). Petrozavodsk: KarRC RAS, 1995. 194 p. (in Russian).

10. *Zamolodchikov D.G., Kobyakov K.K., Kokorin A.O., Aleinikov A.A., Shmatkov N.M.* Forest and climate. Moscow: World Wide Fund for Nature (WWF), 2015. 40 p. (in Russian).

УДК: 528.8:631.6.02 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-408-420**

С.А. Антонов[1]

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

АННОТАЦИЯ

Во многих аграрных регионах России значительные площади земель деградированы, и Ставропольский край не является исключением. Защитные лесные насаждения играют важную роль для защиты почвы от дефляции и водной эрозии. Значительные площади защитных лесных насаждений находятся в неудовлетворительном состоянии, что приводит к снижению эффективности их защитной функции. В результате исследования была разработана новая методика оценки пространственного положения защитных лесных насаждений с использованием геоинформационных технологий и данных дистанционного зондирования Земли, которая доказала свою эффективность на территории Будённовского района Ставропольского края. Установлено, что существующие на территории района защитные лесные насаждения недостаточно эффективно защищают пашню от дефляции. Только 5 % защитных лесных насаждений располагаются на рекомендованных расстояниях друг от друга и 10 % — под оптимальным углом к наиболее вредоносным ветрам. Низкая эффективность защитных лесных насаждений связана с особенностями их проектирования на начальных этапах создания защитного каркаса, достижением ими предельного возраста, а также значительными разрушениями, полученными за счёт хозяйственной деятельности человека. Для оценки эффективности защитных лесных насаждений в борьбе с водной эрозией была разработана авторская методика по корректировке цифровой модели рельефа SRTM с целью устранения локальных возвышений рельефа, которые отмечались в местах расположения защитных лесных насаждений. Установлено, что показатель горизонтальности рубежей на территории Будённовского района равен 11 %, что свидетельствует о том, что защитные лесные насаждения в районе исследования создавались преимущественно для защиты пашни от дефляции. Представленные методические подходы могут быть использованы для корректировки существующих, а также проектирования новых защитных лесных насаждений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геоинформационные технологии, данные дистанционного зондирования Земли, дефляция, защитные лесные насаждения, методика

[1] ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», лаборатория ГИС-технологий, ул. Никонова, д. 49, 356241, Михайловск, Ставропольский край, Россия; *e-mail:* **santosb@mail.ru**

Sergey A. Antonov[1]

SPATIAL ANALYSIS OF PROTECTIVE FOREST PLANTATIONS BASED ON GEOGRAPHIC INFORMATION TECHNOLOGIES AND REMOTE SENSING DATA

ABSTRACT

In many agricultural regions of Russia, significant land areas are degraded and the Stavropol Territory is no exception. Protective forest plantations play an important role in protecting the soil from deflation and water erosion. Significant areas of protective forest plantations are in unsatisfactory condition, which leads to a decrease in the effectiveness of their protective function. As a result of the study, a new methodology was developed for assessing the spatial position of protective forest plantations using geographic information technologies and remote sensing data, which has tested in the territory of the Budyonnovsky District of the Stavropol Territory. It has been established that the existing protective forest plantations in the district are not sufficiently effective in protecting the arable land from deflation. Only 5 % of protective forest plantations are located at recommended distances from each other and 10 % are at an optimal angle to the most harmful winds. The low efficiency of protective forest plantations is associated with the peculiarities of their design at the initial stages of creating a protective framework, their achievement of the maximum age, as well as significant damage resulting from human activities. To assess the effectiveness of protective forest plantations in combating water erosion, we developed an original methodology for adjusting the digital elevation model SRTM in order to eliminate local elevations of the relief at the locations of protective forest plantations. It was found that the horizontal indicator of the boundaries in the territory of the Budyonnovsky District is 11 %, which indicates that protective forest plantations in the district were created primarily to protect the arable land from deflation. The presented methodological approaches can be used to adjust existing, and design new protective forest plantations.

KEYWORDS: geographic information technologies, remote sensing data, deflation, protective forest plantations, method

ВВЕДЕНИЕ

Для большинства аграрных регионов России очень остро стоит проблема деградации почвенного покрова, и Ставропольский край не является исключением. По данным дистанционного мониторинга, проведённого в 2015 г., на 47 % пашни края отмечается проявление водной эрозии различной степени интенсивности [*Esaulko et al.*, 2019]. Дефляции подвержено 10,7 % пахотных земель края, а совместное проявление водной и ветровой эрозии выявлено на 2,3 % пашни, при этом отмечается тенденция к расширению площади земель, подверженных данным видам деградации [*Цховребов и др.*, 2002].

В качестве основных причин увеличения площади деградированных земель следует выделить следующие: рост антропогенной нагрузки, неконтролируемая распашка территории сенокосов и пастбищ (по данным дистанционного мониторинга 2015 г., в Ставропольском крае более 330 тыс. га таких земель [*Антонов и др.*, 2018]), несоблюдение структуры посевных площадей и севооборотов, отсутствие адаптации земледелия к ландшафтным особенностям территории, невысокая эффективность противоэрозионных агролесомелиоративных мероприятий и т.д.

[2] FSBSI “North-Caucasian Federal Scientific Agrarian Center”, Laboratory of GIS-technology, Nikonov str., 49, 356241, Mikhailovsk, Stavropol Territory, Russia; *e-mail:* **santosb@mail.ru**

Для защиты почв от дефляции и водной эрозии особое внимание необходимо обратить на защитные лесные насаждения (ЗЛН), которые способствуют формированию устойчивых агролесоландшафтов [*Кулик, Пугачёва,* 2016]. Они имеют ключевое значение для аграрных регионов, поскольку способствуют задержанию снега, перераспределению поверхностного стока, улучшению теплового, водного и питательного режимов, а также значительно снижают вредоносность засух и суховеев, что в итоге способствует росту продуктивности сельскохозяйственных культур.

В настоящее время в России площадь ЗЛН составляет около 2,8 млн га. Во многих аграрных регионах ЗЛН находятся в неудовлетворительном состоянии, что приводит к снижению эффективности их защитной функции, а на отдельных территориях ЗЛН разрушены полностью. В качестве основных факторов возникновения данной ситуации можно выделить природно-климатические, естественные (достижение лесными насаждениями предельного возраста) и антропогенные (расширение площади пашни за счёт вырубки ЗЛН). В связи с этим необходима объективная оценка состояния и эффективности ЗЛН, которая может быть проведена с использованием современных данных дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий и их верификацией наземными методами.

Современные географические информационные системы (ГИС) и данные дистанционного зондирования Земли играют важную роль во многих отраслях экономики, и сельское хозяйство не является исключением.

Использование данных дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий для целей агролесомелиорации является новым направлением исследований. Наиболее существенных результатов по геоинформационному картографированию леса достигли учёные из Института леса СО РАН г. Красноярск [*Малышева,* 2007; *Кулик, Рулев,* 2000]. В работах Е.С. Павловского, Ю.Ю. Герасимова, В.И. Сухих, К.Н. Кулик и др. подробно рассмотрен опыт применения данных дистанционного зондирования Земли и подходов к дешифрированию ЗЛН [*Павловский и др.,* 1985; *Герасимов и др.,* 2002; *Сухих,* 1998; 2001; *Кулик, Кошелева,* 2011].

Учёными «Федерального научного центра агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» г. Волгоград разработаны методики определения состояния защитных лесных насаждений и агролесомелиоративной оценки ЗЛН по данным дистанционного зондирования Земли [*Кулик, Кошелев,* 2017].

Развитие технологий дистанционного мониторинга и ГИС, используемых для обработки пространственно-координированных данных, требует регулярной корректировки существующих методик и подходов к оценке состояния и эффективности ЗЛН.

Целью исследования является разработать новую методику оценки пространственного положения и эффективности защитных лесных насаждений с использованием геоинформационных технологий и данных дистанционного зондирования Земли. Апробация методики была проведена на территории Будённовского района Ставропольского края.

Научная и практическая новизна исследования состоит в том, что новая методика позволит провести пространственный анализ защитных лесных насаждений для оценки их эффективности в качестве противоэрозионного каркаса и разработать подходы для проектирования новых ЗЛН на базе современных данных дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве исходных материалов для проведения исследования были использованы данные мультиспектральной съёмки со спутников GeoEye 1, WorldView 2 и 3, охватывающие период 2018−2019 гг. Особенностью используемых спутниковых данных

является то, что они обладают сверхвысоким (< 2 м) пространственным разрешением и отображают данные в «естественных» цветах. Космические снимки доступны через веб-сервис Google Earth Pro[1], который позволяет не только просматривать космические снимки, но и осуществлять векторизацию объектов и явлений.

Создание цифровой модели рельефа территории исследования проводилось на основе данных радиолокационной топографической съёмки (SRTM 3 — Shuttle Radar Topography Mission), которые распространяются под свободной лицензией. Период съёмки — февраль 2000 г. Пространственное разрешение после первичной обработки данных радиолокационной съёмки составляло 3″ (угл. сек., ~ 90 м). В 2014 г. Правительство США в рамках Саммита ООН по климату анонсировало улучшение пространственного разрешения данных SRTM в 2015 г. до 1″ (~ 30 м). Данные SRTM доступны на сайте проекта Earth Explorer «Геологическая съёмка США» (United States Geological Survey)[2]. Выбор данных SRTM для моделирования рельефа обусловлен их достаточной вертикальной точностью с отклонением ±5,94 м [*Elkhrachy*, 2018] и отсутствием «артефактов» и пустот на снимках. Данные SRTM обладают более высокой точностью в сравнении с данными ASTER GDEM 2, также распространяемыми под свободной лицензией [*Santillan, Makinano-Santillan,* 2016].

Основным методом анализа данных дистанционного зондирования Земли является дешифрирование на основе прямых дешифровочных признаков для выделения защитных лесных насаждений.

В качестве основной ГИС программы нами была использована ArcGIS 10.4[3], которая обладает широкими функциональными возможностями, начиная от экспорта данных, полученных из различных источников, и заканчивая проведением пространственного анализа, моделирования и картографирования процессов и явлений.

При проведении исследования были использованы следующие методы ГИС: наложение (оверлей), векторизация, пространственная выборка, расчёт площади, анализ близости, расчёт пространственной ориентации полигона, вписывание полигона в окружность, изменение проекции, объединение атрибутов по местоположению, геостатистическая обработка, интерполяция, удаление точек внутри полигона, создание мозаики, построение буферных зон, трансформация растрового слоя в векторный точечный слой.

Апробация методики исследования была проведена на территории Будённовского муниципального района Ставропольского края (табл. 1).

Табл. 1. Координаты крайних точек территории исследования (Будённовский муниципальный район, Ставропольский край)
Table 1. Coordinates of the research area (Budyonnovsky District, Stavropol Territory)

Крайние точки	Широта	Долгота
Западная	44°53'29" с.ш.	43°39'39" в.д.
Северная	45°09'11" с.ш.	44°02'08" в.д.
Восточная	44°37'49" с.ш.	44°36'15" в.д.
Южная	44°25'41" с.ш.	44°14'57" в.д.

[1] Google Earth Pro. Электронный ресурс: https://www.google.com/intl/ru/earth/versions/ (дата обращения: 01.07.2019)
[2] Earth Explorer USGS. Электронный ресурс: https://earthexplorer.usgs.gov/ (дата обращения: 15.08.2019)
[3] Краткое руководство по ArcGIS 10.4.1 for Desktop. Электронный ресурс: https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.4/get-started/setup/arcgis-desktop-quick-start-guide.htm (дата обращения: 01.08.2019)

Будённовский муниципальный район является крупным аграрным районом в Ставропольском крае. Площадь района составляет 3060 км^2. Территория района характеризуется высокой степенью распаханности — 78 % территории занимает пашня [*Антонов и др.*, 2018]. Рельеф района представляет собой низменную равнину, изрезанную балками и речными долинами.

Согласно среднемноголетним климатическим данным (1981−2010 гг.), район относится к засушливой агроклиматической зоне со значением гидротермического коэффициента 0,73 и суммой активных температур 3725 °С. Среднегодовая температура составляет 10,8 °С, а годовая сумма осадков 435 мм. Район относится к территориям со среднеконтинентальным типом климата и находится в переходной зоне от степей к полупустыне.

В Будённовском районе преобладают светло-каштановые и тёмно-каштановые почвы, на отдельных участках они засолены. На севере района преобладают светло-каштановые почвы с участками солонцов и солончаков.

На территории района нередко отмечается атмосферная засуха и сильные ветры-суховеи. В районе преобладают ветры восточного направления, причём их наибольшая сила наблюдается в марте−апреле. Количество дней в году с превышением скорости ветра 15 м/с составляет 25.

Сложные почвенно-климатические условия района на фоне высокой антропогенной нагрузки требуют эффективной защиты от водной и ветровой эрозии.

В качестве основных характеристик защитных лесных насаждений были использованы:

- метрические характеристики защитных лесных насаждений (суммарная протяжённость/площадь, средняя длина/ширина);
- оценка сохранности защитных лесных насаждений;
- общая защитная лесистость района;
- ветрозащитная функция (оценка расстояния между основными защитными лесными насаждениями и их расположение относительно направления вредоносных ветров, по среднемноголетним данным Ставропольского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды) [*Родин и др.*, 2014];
- водозащитная функция (оценка горизонтальности рубежей) [*Холупяк*, 1973].

При проведении исследования была разработана и апробирована авторская методика корректировки исходной цифровой модели рельефа (ЦМР), полученной по данным радиолокационной съёмки SRTM. Целью создания данной методики является удаление локальных возвышений рельефа в местах расположения ЗЛН на ЦМР для создания более точной модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методика оценки пространственного положения ЗЛН включает в себя несколько этапов:

- векторизация пашни и ЗЛН;
- расчёт метрических характеристик ЗЛН;
- оценка сохранности ЗЛН на основании прямых дешифровочных признаков;
- расчёт защитной лесистости района;
- выделение основных ЗЛН;
- расчёт расстояний между основными ЗЛН;
- определение пространственной ориентации основных ЗЛН относительно направления вредоносных (суховейных, метельных) ветров;
- создание и корректировка цифровой модели рельефа SRTM;
- оценка горизонтальности всех ЗЛН.

На начальном этапе были проведены дешифрирование и векторизация пашни и ЗЛН с помощью программы Google Earth Pro. Выделение пашни и ЗЛН осуществлялось на основании прямых дешифровочных признаков, таких как цвет, форма, текстура. В основу векторизации ЗЛН был заложен следующий принцип: ЗЛН, расположенное вокруг пашни, должно быть привязано к границам отдельных полей и представлять собой полигон. В результате все полезащитные лесные насаждения в Будённовском районе имеют прямую форму; исключение составляют приовражные, прибалочные, придорожные лесные полосы, форма которых может отклоняться от прямолинейной.

После векторизации объектов в программе Google Earth Pro полученные данные из формата *.kml/kmz были экспортированы в формат shapefile (*.shp). Особенностью данных, полученных в программе Google Earth Pro, является то, что они экспортируются в проекции GCS_WGS_1984 (EPSG 4326) и единицами их измерения являются градусы. В программе ArcMap с помощью инструмента ArcToolBox необходимо изменить проекцию на WGS_84_UTM_zone_38N (EPSG 32638) или другую проекцию, в которой используются единицы измерения метры. Данная проекция была использована для всех наборов данных, поскольку она обеспечивает максимальную точность при расчёте метрических характеристик. В результате завершения этапа векторизации была получена карта пашни и ЗЛН Будённовского муниципального района (рис. 1).

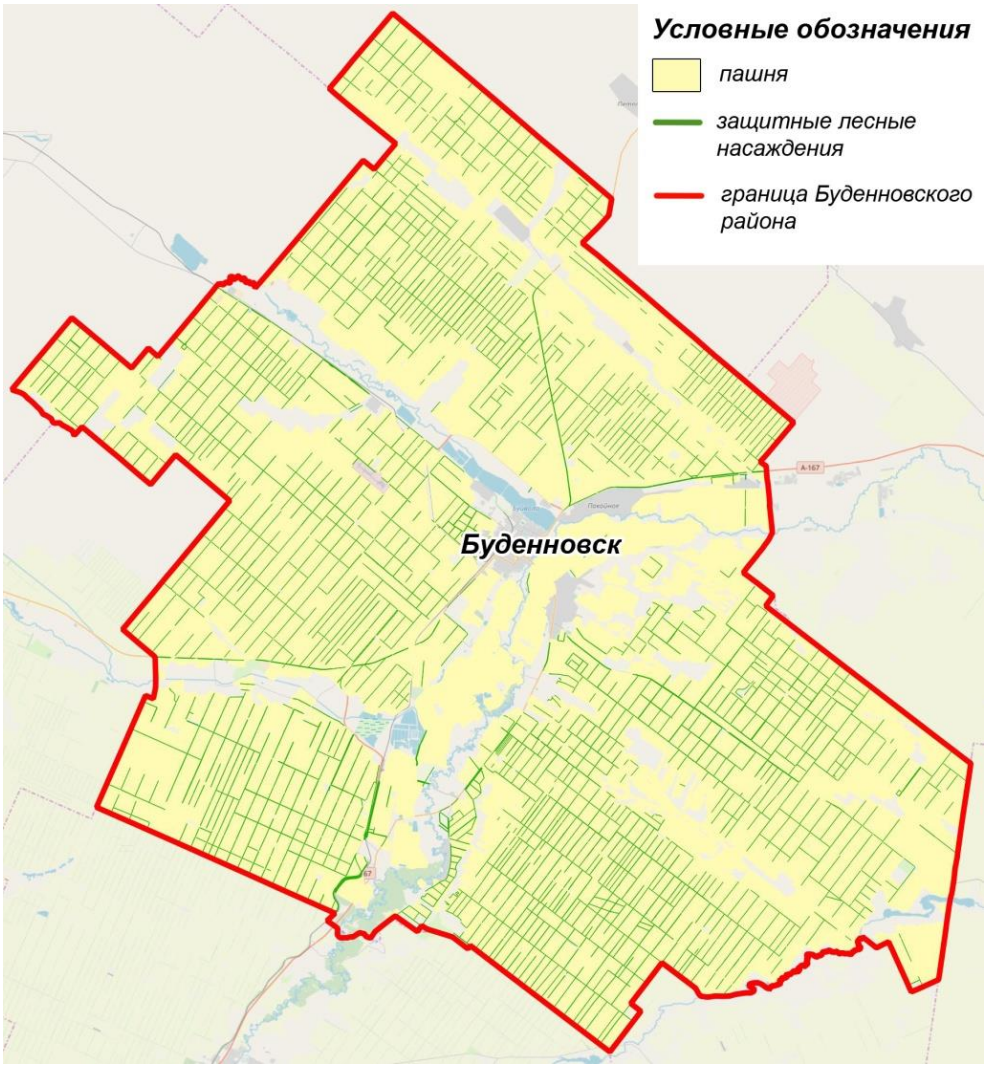


Рис. 1. Пашня и защитные лесные насаждения Будённовского района
Fig. 1. Arable land and protective forest plantations of Budyonnovsky District

На следующем этапе был проведён расчёт метрических характеристик ЗЛН и пашни. Для расчёта площади полигональных объектов в атрибутивной таблице каждого слоя была создана колонка, и в ней произведён расчёт площади (Right Click => Calculate Geometry); в качестве проекции для проведения расчёта мы выбрали проекцию WGS_84_UTM_zone_38N.

По результатам расчёта площадей было установлено, что площадь пашни в Будённовском районе составляет 242 751 га, а площадь ЗЛН — 8 096 га. В результате защитная лесистость в районе, которая рассчитывается как отношение площади пашни к площади ЗЛН, составила 3,1 %. Защитная лесистость района ниже рекомендованной для сухостепной зоны в агролесомелиорации (3,8−4,8 %), по данным ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения» РАН. Полученные результаты свидетельствует о недостаточном количестве ЗЛН на территории района, что связано с их разрушением и увеличением площади пашни в районе за счёт неконтролируемой распашки сенокосов и пастбищ.

Для расчёта длины и ширины полигонов ЗЛН мы использовали ArcToolBox. Для начала мы вписали полигоны ЗЛН в окружности с помощью Data Management Tools => Features => Minimum Bounding Geometry с параметром Geometry Type => Circle (рис. 2). В результате работы функции были построены окружности вокруг полигонов ЗЛН, для которых была рассчитана площадь. На основании полученных данных о площади окружности можно произвести расчёт диаметра, который будет соответствовать длине ЗЛН. Для расчёта необходимо использовать Field Calculator атрибутивной таблицы (*VB* Script: length = Sqr ([Circle_Area]/3.14)*2). Расчёт ширины ЗЛН был проведён также при помощи Field Calculator по формуле: width = area / length.

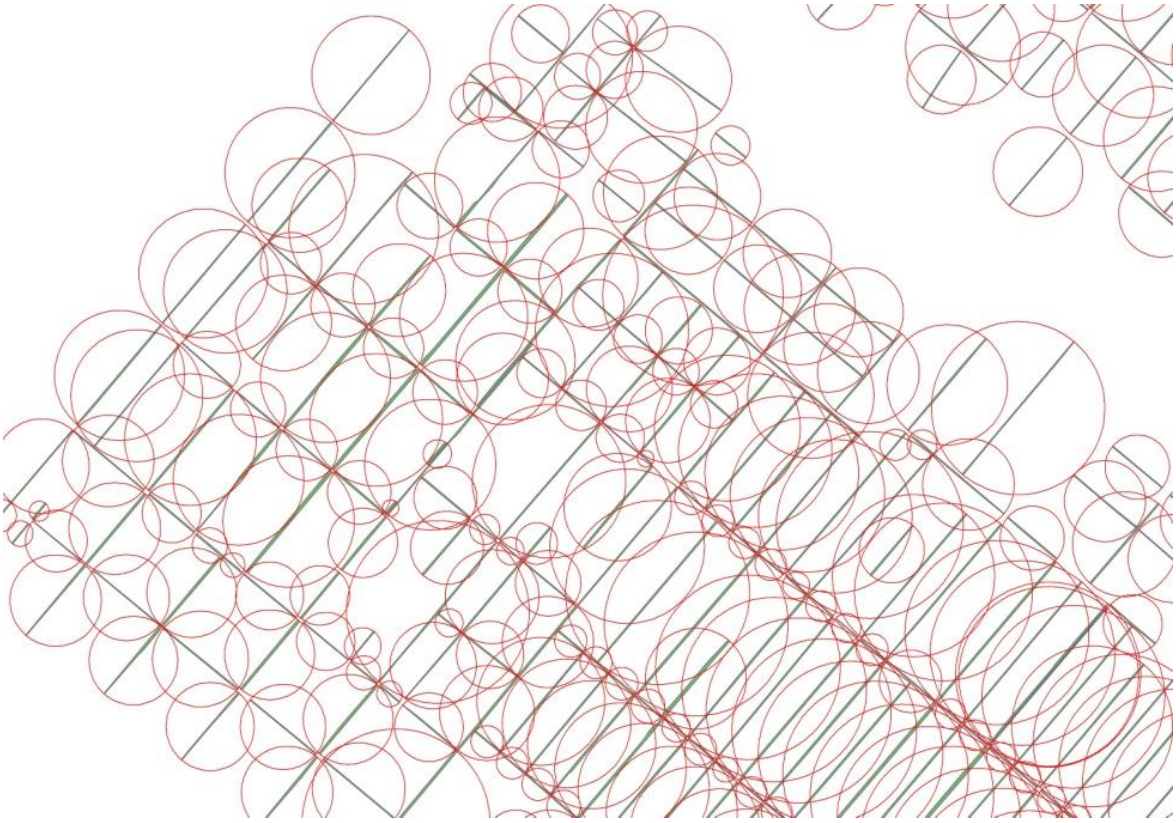


Рис. 2. Результат работы функции Minimum Bounding Geometry
Fig. 2. Minimum Bounding Geometry function result

В результате проведённого расчёта средняя длина всех ЗЛН в Будённовском районе составила 1 308 м, причём она меняется от 132 м до 4 985 м. Средняя ширина всех ЗЛН составила 23 м с колебаниями от 9 м до 108 м. Гистограммы распределения длины и ширины ЗЛН представлены на рис. 3.

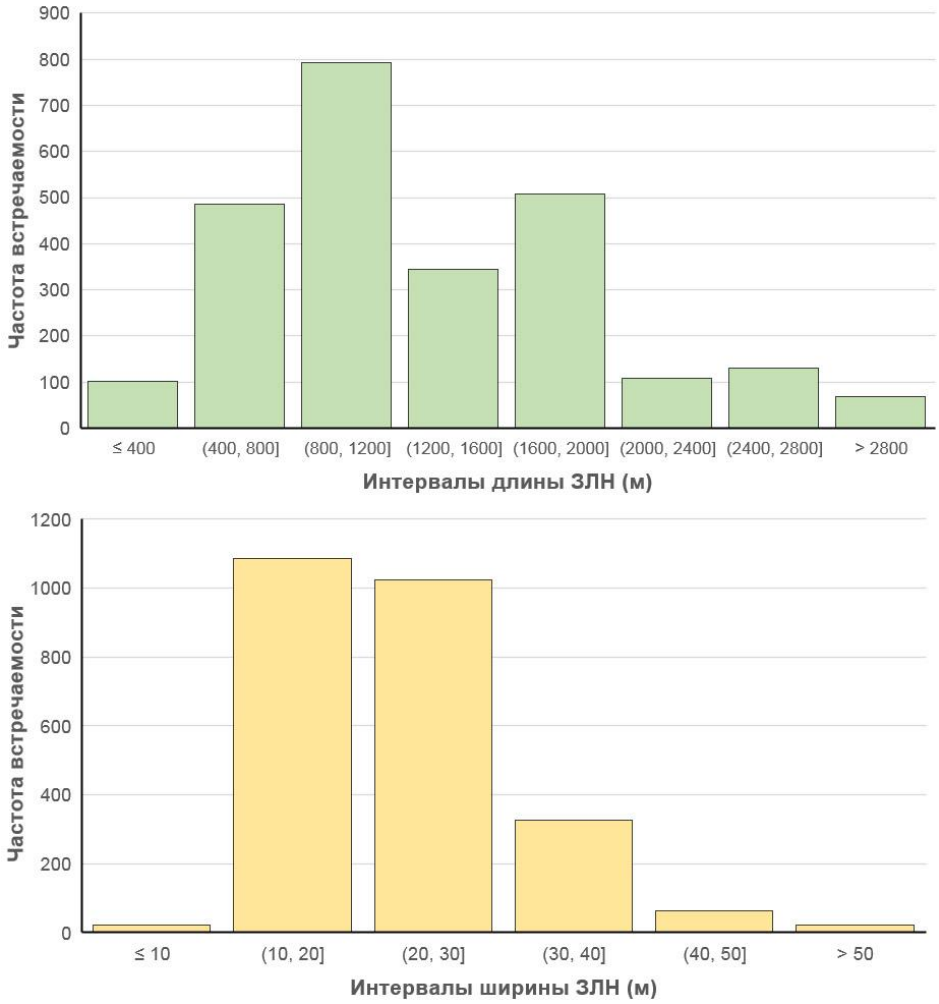


Рис. 3. Гистограммы длины и ширины защитных лесных насаждений
Fig. 3. Histograms of protective forest plantations length and width

Полученные результаты свидетельствуют о том, что 90 % ЗЛН имеют ширину в интервале 10−30 м, что соответствует рекомендациям по агролесомелиоративному проектированию. Анализ длины позволил выделить ЗЛН, которые относятся к основным (они проектируются с учётом максимального противодействия наиболее вредоносному фактору). К основным относятся ЗЛН длиной от 800 м до 2 000 м, которые располагаются на равнинных участках с крутизной склона до 1,5−2,0 °. В Будённовском районе 60 % ЗЛН относятся к основным, что свидетельствует о том, что при проектировании ЗЛН в районе в качестве наиболее вредоносного фактора рассматривалась дефляция.

Согласно рекомендациям, используемым в агролесомелиорации при проектировании основных ЗЛН, для защиты почв от дефляции существуют определённые расстояния, на которых необходимо размещать ЗЛН. Это расстояние напрямую зависит от типа почв; так, для тёмно-каштановых почв оно составляет 350 м, для светло-каштановых — 250 м [*Родин и др.*, 2014].

Для определения расстояния, на котором расположены основные ЗЛН для каждого ЗЛН (полигональный объект), был создан центроид (Data Management Tools => Features => Feature To Point с параметром Inside). После создания центроидов мы нашли ближайший объект при помощи функции Near (Analysis Tools => Proximity => Near). Особенностью функции Near является то, что при выборе Input Features и Near Features можно указывать один и тот же слой с данными (в нашем случае это слой с центроидами). Важно при выборе метода расчёта расстояний использовать параметр GEODESIC — он позволяет учитывать кривизну Земли и расстояния между объектами рассчитываются точнее. В результате выполнения функции Near в атрибутивной таблице появляется поле NEAR_DIST, в котором хранится расстояние до ближайшего объекта.

Таким образом, нами было установлено, что только 5 % основных защитных лесных насаждений в Будённовском районе располагаются на рекомендованных расстояниях друг относительно друга, что значительно снижает эффективность защиты почв от дефляции.

Другой важной характеристикой пространственного положения ЗЛН при проектировании их в качестве защиты от ветровой эрозии является допуск 30 ° в отклонении основных ЗЛН от перпендикулярного направления вредоносных ветров. По данным Ставропольского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, в Будённовском районе господствующими и наиболее вредоносными являются восточные ветры (рис. 4).

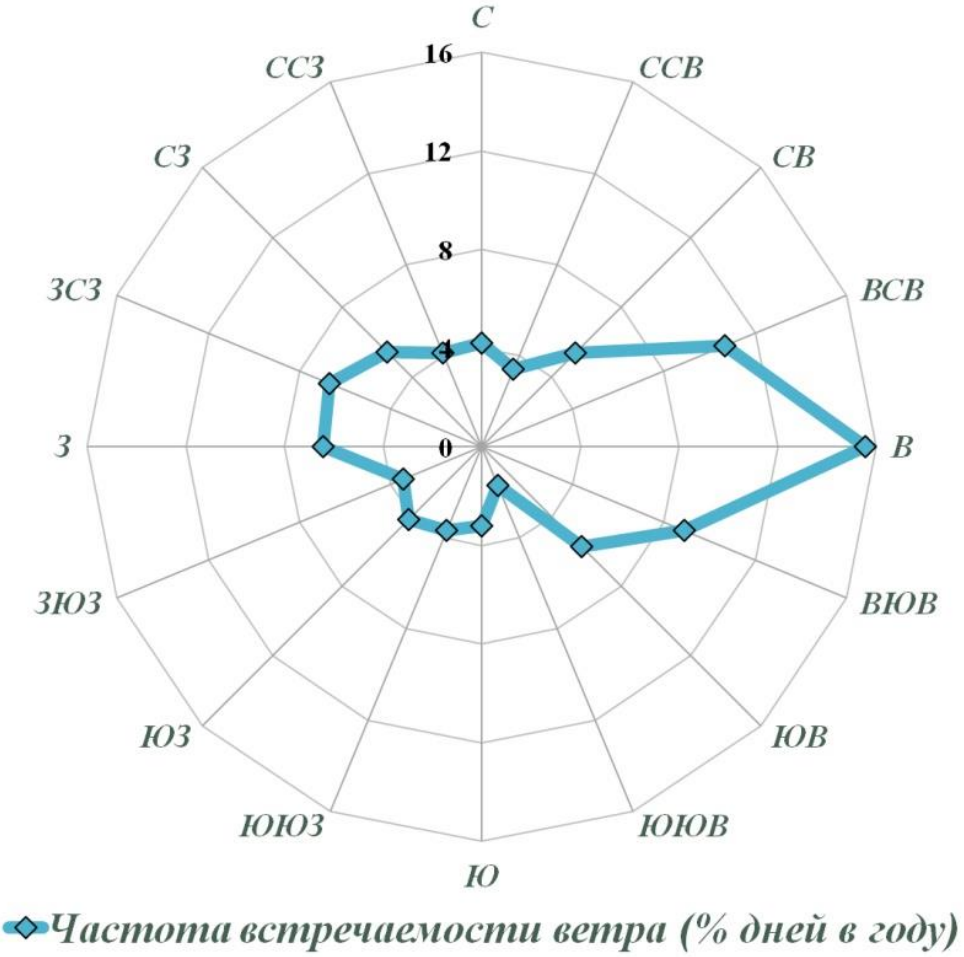


Рис. 4. Роза ветров Будённовского района
Fig. 4. Wind rose of Budyonnovsky District

Для анализа пространственного положения основных ЗЛН мы рассчитали их основной угол поворота (Cartography Tools => Cartographic Refinement => Calculate Polygon Main Angle с параметром Rotation Method = GEOGRAPHIC). В результате расчёта основного угла поворота полигона в атрибутивную таблицу были занесены значения угла поворота. Нами были созданы запросы на языке SQL, которые позволяют определить правильность положения ЗЛН относительно направления господствующих и наиболее вредоносных ветров (табл. 2).

В результате установлено, что из всех основных ЗЛН Будённовского района под оптимальным углом относительно направления наиболее вредоносных ветров расположено только 10 % ЗЛН, остальные 90 % являются недостаточно эффективными для защиты почв от дефляции.

Для оценки эффективности ЗЛН в борьбе с водной эрозией была разработана авторская методика по корректировке ЦМР SRTM с целью устранения локальных возвышений рельефа, которые отмечались в местах расположения ЗЛН.

Табл. 2. SQL запросы для выбора ЗЛН,
оптимально расположенных для защиты от ветровой эрозии
Table 2. SQL queries to select protective forest plantations
optimally positioned to protect against wind erosion

Направление ветра	SQL выражение
С, Ю	*"angle" > -30 AND "angle"< 30
ССВ, ЮЮЗ	*"angle" > -7.5 AND "angle"< 52.5
СВ, ЮЗ	*"angle" > 15 AND "angle"< 75
ВСВ, ЗЮЗ	*("angle" > 37.5 AND "angle"< 67.5) OR ("angle" < -82.5 AND "angle" > -90)
В, З	*("angle" > 60 AND "angle"< 90) OR ("angle" < -60 AND "angle" > -90)
ВЮВ, ЗСЗ	*("angle" > 82.5 AND "angle"< 90) OR ("angle" < -37.5 AND "angle" > -90)
ЮВ, СЗ	*"angle" > -75 AND "angle"< -15
ЮЮВ, ССЗ	*("angle" > 0 AND "angle"< 7.5) OR ("angle" < 0 AND "angle" > -52.5)

***** — *SELECT * FROM (shapefile) WHERE*
angle — *столбец в таблице, содержащий угол поворота ЗЛН (результат выполнения Main Polygon Angle)*

Данные SRTM были получены на сайте проекта Earth Explorer «Геологическая съёмка США» (USGS). Они представляют собой тайлы фиксированного размера. Рельеф территории Будённовского района представлен 4 тайлами, из которых была создана мозаика (Data Management Tools => Raster => Raster Dataset => Mosaic). Далее необходимо «обрезать» полученную мозаику границами Будённовского района (Spatial Analyst Tools => Extraction => Extract by Mask). После этого мы преобразовали ЦМР в точечный векторный слой, каждая точка которого расположена в центре пикселя и имеет высотную отметку (Conversion tools => From Raster => Raster to Point).

Для получения корректного результата вокруг ЗЛН был построен буфер, причём размер его должен в 3 р. превышать среднюю ширину ЗЛН — в нашем случае это 69 м (Analysis Tools => Proximity => Buffer с параметром Method = GEODESIC). После этого мы наложили точечный векторный слой и слой с буфером и удалили все точки, которые находятся внутри буфера (Editing Tools => Erase Point с параметром Operation Type = Inside) — данная операция обычно занимает очень длительное время. После её завершения мы получили высотные отметки, очищенные от локальных возвышений под ЗЛН.

На последнем этапе по данным точечного векторного слоя была проведена интерполяция для создания исправленной ЦМР (3D Analyst Tools => Raster Interpolation => Topo to Raster с параметрами Field = GRID_CODE, Type = PointElevation). Использование данной функции позволяет получить ЦМР более высокого разрешения, но делать этого не рекомендуется, т.к. это может привести к снижению горизонтальной и вертикальной точности итоговой ЦМР.

Оценка горизонтальности ЗЛН проводится по методике К.Л. Холупяк (показатель горизонтальности равен суммарной протяжённости горизонтальных участков ЗЛН, разделённой на общую длину ЗЛН). Для определения горизонтальности мы использовали исправленную ЦМР с наложением на неё всех ЗЛН и геостатистической обработкой полученных результатов (Spatial Analyst Tools => Zonal => Zonal Statistics as Table с параметром Statistics Type = RANGE); полученную таблицу при помощи функции JOIN мы соединили через идентификатор со слоем ЗЛН. Если перепад высот (RANGE), на которых располагается ЗЛН, превышал 2 м, тогда мы относили данный участок к негоризонтальным.

В результате установлено, что показатель горизонтальности рубежей К.Л. Холупяк на территории Будённовского района равен 11 %, что подтверждает ранее сделанные выводы о том, что ЗЛН в районе создавались преимущественно для защиты пашни от дефляции.

ВЫВОДЫ

Разработанная методика оценки пространственного положения и эффективности защитных лесных насаждений с использованием современных геоинформационных технологий и данных дистанционного зондирования Земли доказала свою эффективность. Представленные методические подходы могут быть использованы для корректировки существующих, а также проектирования новых защитных лесных насаждений.

На примере Будённовского района Ставропольского края установлено, что существующие на территории района ЗЛН недостаточно эффективно защищают пашню от дефляции. Только 5 % ЗЛН располагаются на рекомендованных расстояниях друг от друга и 10 % — под оптимальным углом к наиболее вредоносным ветрам. По нашему мнению, низкая эффективность ЗЛН связана с особенностями их проектирования на начальных этапах создания защитного каркаса, достижением ими предельного возраста, а также значительными разрушениями, полученными за счёт хозяйственной деятельности человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антонов С.А., Есаулко А.Н., Сигида М.С., Голосной Е.В.* Оценка развития процессов водной эрозии на территории агроландшафтов Ставропольского края и их влияние на продуктивность. Вестник АПК Ставрополья, 2018. № 1 (29). С. 67−73. DOI: 10.25930/vmg3-j684.

2. *Герасимов Ю.Ю., Хлюстов В.К., Кильпеляйнен С.А., Боровиков Н.З.* Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве: учебник. Петрозаводск: ПетрГУ, 2002. 248 с.

3. *Кулик К.Н., Кошелев А.В.* Методическая основа агролесомелиоративной оценки защитных лесных насаждений по данным дистанционного мониторинга. Лесотехнический журнал, 2017. № 3 (27). С. 107−114. DOI:10.12737/article_59c22527885b57.91268039.

4. *Кулик К.Н., Кошелева О.Ю.* Автоматизированное дешифрирование защитных лесных насаждений по космоснимкам высокого разрешения. Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук, 2011. № 3. С. 55−57.

5. *Кулик К.Н., Пугачёва А.М.* Лесомелиорация — основа создания устойчивых агроландшафтов в условиях недостаточного увлажнения. Лесотехнический журнал, 2016. Т. 6. № 3 (23). С. 29−40.

6. *Кулик К.Н., Рулев А.С.* Геоинформационное картографирование в агролесомелиорации. Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук, 2000. № 1. С. 42−43.
7. *Малышева Н.В.* Картографическое обеспечение государственного лесного фонда с использованием ГИС. Лесное хозяйство, 2007. № 3. С. 40−42.
8. *Павловский Е.С., Виноградов Б.В., Боровиков Н.З.* Аэрокосмические методы в агролесомелиорации. Вестник сельскохозяйственной науки, 1985. № 7 (346). С. 100−105.
9. *Родин А.Р., Родин С.А., Васильев С.Б., Силаев Г.В.* Лесомелиорация ландшафтов: учебник. М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2014. 192 с.
10. *Сухих В.И.* Вклад аэрокосмических методов в развитие лесного хозяйства России. Лесное хозяйство, 1998. № 3. С. 34−37.
11. *Сухих В.И.* Становление космических методов в лесном хозяйстве России. Лесное хозяйство, 2001. № 2. С. 6−11.
12. *Холупяк К.Л.* Устройство противоэрозионных лесных насаждений. М.: Лесная промышленность, 1973. 152 с.
13. *Цховребов В.С., Тюльпанов В.И., Подсвиров В.И.* Современное состояние почв Центрального Предкавказья. Материалы Второй международной научной конференции «Эволюция и деградация почвенного покрова», 2002. Т. 1. С. 15−17.
14. *Elkhrachy I.* Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran city, Saudi Arabia. Ain Shams Engineering Journal, 2018. V. 9. Iss. 4. P. 1807−1817. DOI: 10.1016/j.asej.2017.01.007.
15. *Esaulko A., Sigida M., Golosnoy E., Antonov S., Lobankova* O. Condition monitoring and analysis of development in winter crops of water erosion processes using remote sensing technologies. Engineering for Rural Development, 2019. V. 18. P. 391−397. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N204.
16. *Santillan J.R., Makinano-Santillan M.* Vertical accuracy assessment of 30-m resolution ALOS, ASTER and SRTM global DEMS over Northeastern Mindanao, Philippines. XXIII ISPRS Congress. Comission IV. International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016. V. 41. Iss. B4. P. 149−156. DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B4-149-2016.

REFERENCES

1. *Antonov S.A., Esaulko A.N., Sigida M.S., Golosnoy E.V.* The estimation of water erosion processes on Stavropol Region agricultural landscapes and their impact on productivity. Agricultural Bulletin of Stavropol Region, 2018. No 1 (29). P. 67−73. DOI: 10.25930/vmg3-j684 (in Russian).
2. *Elkhrachy I.* Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran city, Saudi Arabia. Ain Shams Engineering Journal, 2018. V. 9. Iss. 4. P. 1807−1817. DOI: 10.1016/j.asej.2017.01.007.
3. *Esaulko A., Sigida M., Golosnoy E., Antonov S., Lobankova* O. Condition monitoring and analysis of development in winter crops of water erosion processes using remote sensing technologies. Engineering for Rural Development, 2019. V. 18. P. 391−397. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N204.
4. *Gerasimov Yu.Yu., Hlyustov V.K., Kilpilyanen S.A., Borovikov N.Z.* Aerospace methods in forestry: Textbook. Petrozavodsk: PetrSU, 2002. 248 p. (in Russian).
5. *Kholupyak K.L.* The arrangement of anti-erosion forest plantations. Moscow: Forest Industry, 1973. 152 p. (in Russian).
6. *Kulik K.N., Koshelev A.V.* Methodological basis for agroforestry assessment of protective forest stands according to remote monitoring data. Lesotekhnicheskiy zhurnal [Forestry Engineering Journal], 2017. No 3 (27). P. 107−114. DOI:10.12737/article_59c22527885b57.91268039 (in Russian).

7. *Kulik K.N., Kosheleva O.Yu.* Automated decryption of protective forest stands from high-resolution satellite imagery. Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences, 2011. No 3. P. 55−57 (in Russian).
8. *Kulik K.N., Pugacheva A.M.* Forest reclamation — the basis for creating sustainable agrolandscapes in conditions of insufficient moisture. Lesotekhnicheskiy zhurnal (Forestry Engineering Journal), 2016. V. 6. No 3 (23). P. 29−40 (in Russian).
9. *Kulik K.N., Rulev A.S.* Geoinformation mapping in agroforestry. Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences, 2000. No 1. P. 42−43 (in Russian).
10. *Malysheva N.V.* Cartographic support of the state forest fund using GIS. Forestry, 2007. No 3. P. 40−42 (in Russian).
11. *Pavlovskii E.S., Vinogradov B.V., Borovikov N.Z.* Aerospace methods in agroforestry. Vestnik (Herald) of the Russian agricultural science, 1985. No 7 (346). P. 100−105 (in Russian).
12. *Rodin A.R., Rodin S.A., Vasiliev S.B., Silaev G.V.* Land reclamation of landscapes: Textbook. Moscow: Moscow State Forestry University (MSFU), 2014. 192 p. (in Russian).
13. *Santillan J.R., Makinano-Santillan M.* Vertical accuracy assessment of 30-m resolution ALOS, ASTER and SRTM global DEMS over Northeastern Mindanao, Philippines. XXIII ISPRS Congress. Comission IV. International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016. V. 41. Iss. B4. P. 149−156. DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B4-149-2016.
14. *Sukhikh V.I.* Contribution of aerospace methods to the development of Russian forestry. Forestry, 1998. No 3. P. 34−37 (in Russian).
15. *Sukhikh V.I.* The formation of space methods in the forestry of Russia. Forestry, 2001. No 2. P. 6−11 (in Russian).
16. *Tskhovrebov V.S., Tul'panov V.I., Podsvirov V.I.* The current state of the Central Ciscaucasia soils. Proceedings of the Second International Scientific Conference "Evolution and degradation of soil cover", 2002. V. 1. P. 15−17 (in Russian).

DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-421-435

Hemalatha Gonuguntla[1], **Khudoyberdi A. Abdivaitov**[2], **Mahalingam Bose**[3], **Muzaffar E. Rakhmataliev**[4]

A COMPARISON OF SENTINEL-1 AND SENTINEL- 2 IN ASSESSING FLOODED AREA AND BUILT-UP LAND USE: A CASE STUDY OF SELECTED COASTAL DISTRICTS IN ANDHRA PRADESH, INDIA

ABSTRACT

In tropical climatic conditions, floods occur during heavy rainfall. Floods during this thick cloud cover partially stops the optical imagery to pass through the atmosphere and record the surface reflectance. Another kind of satellite imagery that is available is microwave remote sensing data that can pass through the clouds. However, the exploration of this microwave remote sensing began recently for earth observation applications. So, the algorithms and methods available for exploiting advantages from microwave data is still under research. The current part of the work is to explore the methods available to differentiate between the microwave data (Sentinel-1) and Optical imagery (Sentinel-2) in flooded and built-up area estimation. The ultimate aim is to conclude with most suitable datasets and fast computing methods in estimating the built-up area and flooded area during the emergency disaster time. Two case studies taken up for the study are August 2019 East Godavari floods and October 2019 Titli cyclone. So, the adopted method to estimate the flooded areas and built-up areas from the Sentinel-1A and Sentinel-2B was RGB clustering (Red, Green and Blue clustering) using the derived RGB colour combinations in snap 7.0 software. The datasets were classified into built-up, flooded area and vegetation areas using Random Forest supervised classification, a machine learning technique Validation of estimated built-up and flooded areas estimated from Sentinel-1A and Sentinel-2B was done using the random pixel distribution technique. Since the de-centralisation of estimated flooded areas and built-up area helps in fast distribution of the response forces to the affected area, estimation of built-up and flooded area was also taken up for the sub-districts of East Godavari district, India. Finally, the study estimates the damaged built-up and vegetation due to August 2019 East Godavari floods from Sentinel-1A and Sentinel-2B. Flooded area due to 'Titli' cyclone 2018 was estimated in East Godavari, Visakhapatnam and Vijianagaram districts of Andhra Pradesh state.

KEYWORDS: Microwave remote sensing, optical remote sensing, RGB clustering, Random Forest supervised classification, damage estimation

INTRODUCTION

The current work is centred at exploration of differences between sentinel-1 and sentinel-2 in terms of methodology and estimation of built-up and flooded areas. The current research extends the RGB combinations exploration towards flooded areas estimation in Sentinel-2 and built-up area estimation in Sentinel-1 from previous research work of flooded area estimation in Sentinel-1 and built-up area estimation in Sentinel-2 respectively. 2014 Uttarakhand floods and

[1] Central University of Karnataka (CUK), Kadaganchi, Aland Road, 585367, Kalaburagi Dist., Karnataka, India; *e-mail:* **hemagonuguntla@gmail.com**

[2] Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers (TIIAME), Kari Niyaziy str., 39, 100000, Tashkent, Uzbekistan; *e-mail:* **abdivaitov90@list.ru**

[3] Central University of Karnataka (CUK), Kadaganchi, Aland Road, 585367, Kalaburagi Dist., Karnataka, India; *e-mail:* **mahabose@gmail.com**

[4] Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers (TIIAME), Kari Niyaziy str., 39, 100000, Tashkent, Uzbekistan; *e-mail:* **m.raxmataliyev@tiiame.uz**

August 2019 floods in East Godavari district of Andhra Pradesh state in India, revealed that the rivers in tropical regions are dynamic. There are two major ways to rescue people from flood. First to save immediately after flood and second is encouraging people to build residences in flood resilient places which are of immediate and gradual methods respectively. Hence the reason for India there are rescue teams and flood analysis teams jointly working for flood risk management. Since the existence of dynamic weather phenomenon, emphasis shall be on rescue operations during flood time unlike on replacing residences to flood resilient locations. Hence the reason for the current research is on fast computable and reliable method in mapping flooded areas to support in emergency times.

To obtain the spatial and temporal information of earth's surface elements like built-up areas, vegetation, flooded areas and water bodies, major methods existed are field survey, airborne remote sensing and satellite remote sensing. Every year thousands of people losing their livelihoods, huge damage to infrastructure due to cyclones leading billions of economic losses to Andhra Pradesh state of India. Assessing the damage occurred immediately after cyclone ensures the early redressal mechanisms from the government to stabilise the livelihoods of people as soon possible. This motivated the current research to study about the damage assessment due to cyclones over Andhra Pradesh state. Andhra Pradesh was selected as a study because, among three states (Odisha, Andhra Pradesh and Tamilnadu) affected due to cyclone at east coast of India, AP is at centre of them, running into huge economic loss every year compare to other states. The urban areas are also expanding at a rapid pace with congested streets, clustered settlements, concentrated infrastructure and dense population. Due to the presence of these elements in urban areas, field survey is highly difficult in terms of time and work for estimating the damage due to disaster. Hence remote sensing, sensing from far, plays a very important role in assessing damage in terms of its capacity to cover a vast area in one acquisition time and high-resolution acquisition capability at economically viable price [*Joyce et al.*, 2009; *Klemas*, 2009]. These remote sensing capabilities in times of disaster emergency, motivated the current research towards exploration of different remote sensing datasets and their differences in capabilities in estimating the flooded areas, built-up areas, vegetation and water bodies. The ultimate aim is to assess the damage caused by Cyclones in Andhra Pradesh state, India. Damage in terms of built-up area, vegetation, and inundated area using SAR and Optical imagery. The aim of the current research is to find out advantages and limitations of a S-1A (microwave remote sensing satellite data) and S-2B (optical remote sensing satellite data) in estimating built-up, flooded and vegetation areas. Finally, to explore the fast computing methods, so that disaster response forces can mitigate computing time and hence more time can be invested in rescue tasks (fig. 1).

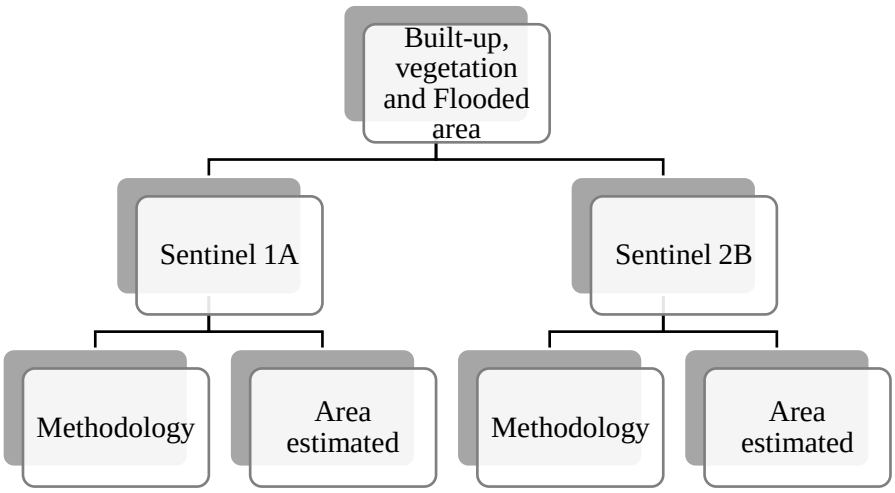


Fig. 1. Displaying the aim of current work

The main objectives of this research are:

- Analysing time and dates of 2018 Titli cyclone and 2019 August floods (in East Godavari district) that affected the Andhra Pradesh state for data acquisition.
- Exploring differences in methods between Sentinel-1A and Sentinel-2B in estimation of flooded areas, built-up and vegetation areas.
- Damaged area estimation of Built-up area, vegetation due to august 2019 EG floods. Flooded areas due to 2018 Titli cyclone in East Godavari, Visakhapatnam and Vizianagaram districts of Andhra Pradesh state and August 2019 floods in East Godavari district of Andhra Pradesh state.
- Accuracy assessment of the results obtained.

Study area for Titli cyclone is East Godavari, Visakhapatnam and Vizianagaram districts of Andhra Pradesh state, India. Study area for 2019 August East Godavari floods is East Godavari district (fig. 2).

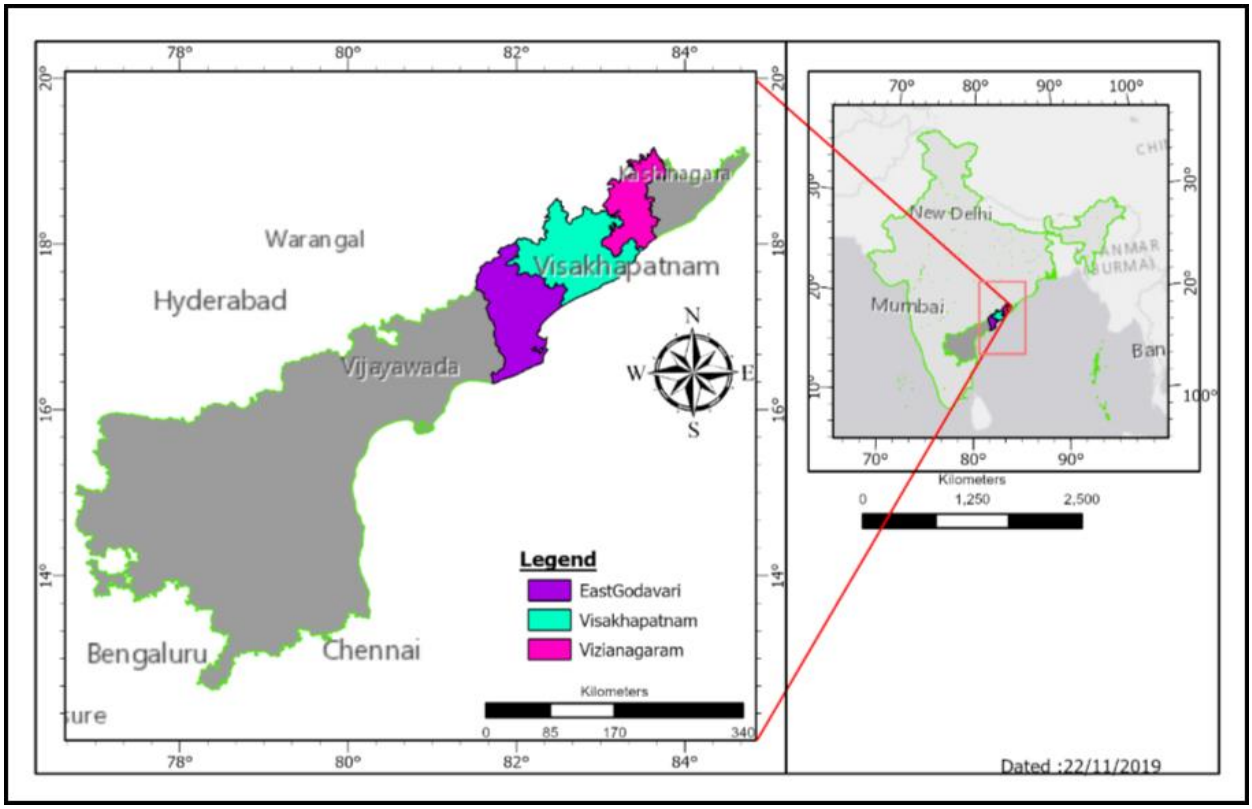


Fig. 2. Study area of the current work

The chapter of the background information details about conceptual understanding on floods, Cyclone, built-up area. Then it details about the current practices of flood, built-up areas estimation. Finally, it details about two case studies that were taken up currently and distinguishing the two different datasets namely Sentinel-1A, which is microwave remote sensing data and Sentinel-2B, which is optical remote sensing data.

The continuous heat of water forms water vapor. The water vapor converts to water during rains and the heat get released to the atmosphere. This released heat warms up the surrounding air and makes it move up thereby decreasing the pressure. This low-pressure area attracts the high-pressure winds around. This cycle repeats until a low-pressure system surrounded by high speed winds. This system is called cyclone. Tropical cyclones which formed over warm ocean basins from which they intensify into severe to very severe cyclones. One such

very severe cyclone 'HUDHUD' that hit east coast of Andhra Pradesh state in 2014 left huge economic loss besides human loss [*Jain*, 2015]. Flood is an overflow of huge amount of water upon dry land by crossing normal limits. In India, millions of human lives, cattle and agricultural crops are being destroyed due to lack of planning and improper weather forecasting *[Saptarsi et al.*, 2018]. Flood usually crosses the distances at a greater speed ad increases with greater heights. Hence every minute counts in rescue operations. Any delay in identifying the flood areas and sometimes predicting the flood areas may cost a life.

East Godavari district located at East bank of Godavari river in Andhra Pradesh state, India. It got affected by the severe floods occurred during first week of the August 2019. Heavy and incessant rainfall lead the flood water from Godavari river to cross river banks and inundate the nearby districts. Hence this is our first current study to compare the flood area estimation between the Sentinel-1A and Sentinel-2B data sets [*Pradesh*, 2019].

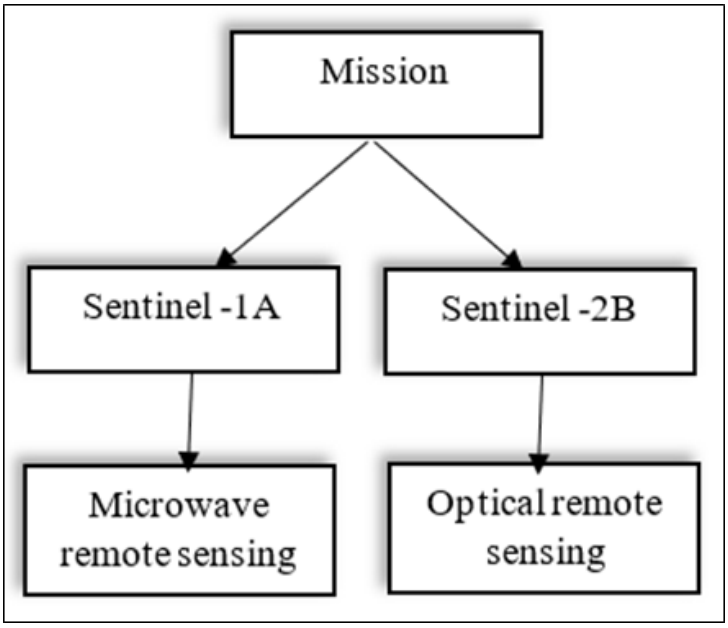


Fig. 3. Difference between the S-1A & S-2B

Among the different types of remote sensing (RS), microwave RS and optical RS are the two RS types most popularly advancing into the estimation of built-up and flooded areas. European Space Agency (ESA) launched two major satellites name Sentinel-1 and Sentinel-2. Sentinel-1 is a combo of two satellites namely Sentinel-1A (S-1A) and Sentinel-1B (S-1B) which are the sensors of microwave remote sensing. Sentinel-2 is a combo of two satellites namely Sentinel-2A (S-2A) and Sentinel-2B (S-2B) which are the sensors of optical remote sensing (fig. 3).

Sentinel-1 mission is the first and one among the five earth observation missions of European Space Agency (ESA) that are developed for Copernicus joint initiative to continue the C-band SAR Earth Observation heritage of the European Space Agency's ERS-1, ERS-2 and ENVISAT, and Canada's RADARSAT-1 and RADARSAT-2. Remote sensing from S-1 depends on transmission, reception, absorption, and direction of sensors energy. The C-band has a wavelength of 5.8 cm, which is common on many airborne research systems and space-borne systems (including IRS Oceansat-1 and RISAT) [*Aher et al.*, 2014]. The electromagnetic waves are produced by excited atoms. Every atom of a material produces the electromagnetic waves into multiple directions or multiple plain of oscillations. This type of light beam which has vibrations in more than one plain is called "Unpolarised light". If the light beam which has

vibrations in one plain is called “Polarised light”. In polarised radar, the antenna or Synthetic aperture can transmit or receive signals in either horizontal or vertical mode. Similarly, the antenna receives either the horizontally or vertically polarised backscattered energy and some radars can receive both. These two polarisation states are designated by the letters H (for Horizontal) and V (for Vertical). Thus, resulted in four combinations of polarisation effects [*Bhatta*, 2011].

Polarisation effects:

- VV — Vertical transmit, Vertical receival;
- VH — Vertical transmit, Horizontal receival;
- HH — Horizontal receival, Horizontal transmit;
- HV — Horizontal transmit, Horizontal receival.

Sentinel-1 revisit period is increased due to two factors. Firstly, due to inclusion of Terrain Observation with Progressive Scans SAR (TOPSAR) technique, resulting in a large footprint while maintaining a relatively high spectral resolution. Secondly, Sentinel-1 mission consists of two satellites (Sentinel-1A and Sentinel-2B, launched in 3rd April 2014 and 25th April 2016 respectively) which will individually record radar images for every 12 days, disregarding the weather and time of the day. The two satellites share the same orbital plane with 180° orbital phasing difference, so that temporal resolution also shared between them resulting in revisit time reduced from 6−12 days [*Yague-Martinez et al.*, 2016]. The S-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging instrument is able to switch between four sensor observation modes: Strip Map (SM), Interferometric Wide Swath (IW), Extra-Wide Swath Mode (EW) and Wave-Mode (WV) with different spatial resolutions and different swath widths. For the current work, IW mode (250 km swath width and approximately 10 m spatial resolution) was taken.

Sentinel-2 mission consists of two satellites Sentinel-2A and Sentinel-2B launched in 23rd June 2015 and 7th March 2017 respectively with orbital phasing difference of 180° to each other, with swath width of 290 da[1]. Remote sensing from S-2 depends on transmission, reception and absorption of parts of Electromagnetic spectrum, with different spatial resolutions [*Kaplan, Avdan*, 2017]. S-2 is carrying a Multi-Spectral Imaging Instrument (MSI). In S-2, all 13 spectral bands are openly accessible, unlike the S-1, in which among VV, VH, HH, HV polarised bands only VV, VH are accessible to all including other non-European citizens. Among 13 spectral bands, 4 are visible (with 10 m spatial resolution), 6 are of Near Infrared (with 20 m spatial resolution) and 3 are of Short-Wave Infrared bands (with 60 m spatial resolution). Revisit time of S-2A and S-2B together makes up revisit time of 5-10 days of revisit time.

The histogram of the imageries assists in differentiating between the water and non-water classes. Using histogram thresholding technique, backscattered (Sigma nought) distribution of pixel values of features can be differentiated with higher values of backscatter indicate non-water class and lower values indicate water class. This method of Threshold technique is one among popular methods for flood estimation [*Dadhich et al.*, 2019]. Sometimes, threshold technique is applied with morphological filtering operations, which helps in filling the gaps and holes resulting from binary mask of threshold technique [*Jo et al.*, 2018]. RGB clustering is current popular method which is easy to estimate the flood areas using RGB colour combinations *[Uddin et al.*, 2019].

Using Tasselled Cap Transformation (TCP) technique of Orthogonal transformation model from segmented Sentinel-2 images, finally classifying the flooded areas one among complicated methods currently practised [*Nedkov*, 2017]. Another method, which uses of altitude and precipitation information, is One-class classifier Bias support vector machines (BSVM). Land cover classification using Best Available Pixel (BAP) composites, times series and ecological information [*Gómez et al.*, 2016]. The chance of cloud free data over the same

[1] *Suhet*. Sentinel -2 User Handbook, European Space Agency, 2015

location increases with repeat observation. Cloud free surface reflectance composites over larger areas can be auto generated from choice-based Landsat observations. These BAPs can be produced with preferred rule-based criteria for specified applications like land cover *[Griffiths et al.*, 2013; *White et al.*, 2014]. But for the current study, RGB clustering method was explored in Sentinel-2 for flooded areas estimation. This method uses of RGB colour combinations and based on visual interpretation; the elements of the earth surface get classified.

Built-up damage assessment using coherent change detection [*Guida et al.*, 2018]. In some cases SAR simulation technique is explored besides comparing with real SAR images to mitigate distortions of the high buildings and other urban features due to occlusions in SAR images [*Balz*, 2004]. But for the current study RGB clustering from RGB colour combinations was explored, which formulates as a fastest and simplified method in built-up estimation followed by damage estimation.

There are two major techniques for built-up area extraction from satellite imagery. Firstly, techniques based on conventional multi-spectral image classification like supervised, unsupervised, object based or deep learning classification [*Ndehedehe et al.*, 2013; *Rawat, Kumar*, 2015; *Forget et al.*, 2017; *Bramhe et al.*, 2018]. Secondly, techniques based on normalised differences indices like normalised difference built-up index (NDBI), urban index (UI), enhanced built-up index (EBI), principal component analysis based built-up area index (PCABAI), etc. [*Xu*, 2007; *Kumar et al.*, 2012; *Varshney*, 2013; *Valdiviezo et al.*, 2018]. For the current built-up area estimation the RGB clustering from RGB colour combination as suggested [*Vigneshwaran, Selvaraj*, 2018] was used.

The current study is taken up with certain limitations in data and processing. First is the Data availability without same dates from S-1A and S-2B, since S-1A and S-2B are two different satellites launched in different orbits at different launching times. Second is the pre-processing of S-2B was not extended for removing the cloud cover from the imagery at least near to the cloud data due to the lack of resources in terms of software and algorithms to ensure it.

MATERIALS AND METHODS OF RESEARCHES

Entire methodology was majorly divided under five major parts. Firstly, pre-processing of both S-1A and S-2B using Snap 7.0 and Sen2Cor plugin respectively. Pre-processing is followed by flooded areas and built-up areas estimation. Later the damaged built-up and vegetation due to august 2019 east Godavari floods. The acquired results from classification were validated using random pixel distribution technique in Snap software (fig. 4).

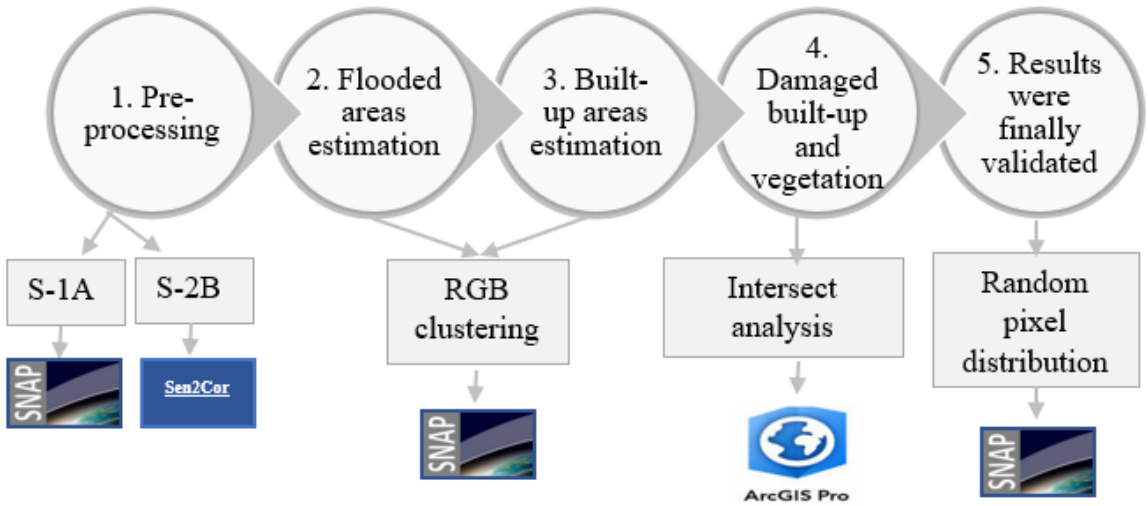


Fig. 4. Main methodology workflow

Since the current work is about comparing the estimation of S-1A and S-2B, the datasets were acquired as per the timing of two case studies of August 2019 floods in East Godavari district and Titli cyclone during October 2018 in East Godavari, Visakhapatnam and Vizianagaram district. The datasets were also acquired as per the requirements of built-up and vegetation estimations. The sources for this data acquisition are Copernicus open access hub, Alaska satellite facility and National disaster response force (table 1).

Table 1. Dates of data acquired for current work

Mission	**August Floods**	**Built-up**	**Titli Cyclone**
Sentinel-1A	Preflood: 2nd May 2019 Flood: 6th August 2019	28th September 2018 2nd May 2019	Preflood: 28th September 2018 Flood: 10th October 2018
Sentinel-2B	Preflood: 6th May 2019 Flood: 4th August 2019	6th May 2019	

Since the current study aims at differentiating flooded areas, built-up and vegetation, between microwave and optical data, S-1A and S-2B were acquired. These are openly accessible. The properties of S-1A and S-2B that were acquired for the current study are mentioned in the following (table 2).

Table 2. Properties of data that were collected

Sentinel -1A	**Sentinel -2B**
Properties: • Mission — Sentinel-1A with Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging instrument; • Sensor acquisition mode — Interferometric wide swath mode (IW); • Resolution type — High; • Product type — Ground range detected high resolution images (GRDH); • Level of processing mode — L1; • Polarisation type — Standard Dual polarisation (SDV) =VV+VH; • Spatial resolution — 10 m; • Revisit time of together S1A & S2B range — 6−12 days	Properties: • Mission — Sentinel-2B with multispectral imaging (MSI) instrument; • Level of processing mode — L1 C; • Bands — 13 spectral bands; • Revisit time of together S2A and S2B — 5−10 days

Pre-processing of S-1A and S-2B involves in correction of the imageries to further process for specified applications. Pre-processing workflow consists of seven major methods followed as suggested here [*Filipponi*, 2019]:

1. Apply orbit file: This step corrects the orbit between mission's swath and real ground. The required orbit states vector for orbit file correction are provided within the metadata of SAR products and are not reliably accurate. The precise orbit of satellites is determined after few days and are available after the product generation.

2. Thermal noise removal: Since the S-1A and S-1B both are of active sensors; it imprints some thermal noise on imageries while transmitting and recording active microwave sensor's energy. Hence the S-1A and S-1B imageries' intensity is disturbed by the additive thermal noise, especially in the cross-polarized channel [*Park et al.*, 2017].

3. Calibration to Sigma 0: Since the values recorded in the datasets are not easy interpretable, all the backscattered energy that got recorded by the sensor gets calibrated to sigma 0 values, which are interpretable by the successive processing algorithms.

4. Speckle removal: Speckle is like a granular or salt and pepper noise in SAR imageries due to the interference of waves [*Lee et al.*, 1994]. Lee filter with window size of 7*7 was applied to remove the speckle in S-1A imageries.

5. Slice Assembly: Since the current data are in one orbit, the swaths collected can be just assembled. That's the reason why the mosaic technique is not applied for current study area extraction from multiple swaths.

6. Range Doppler Terrain Correction: The SAR sensor of S-1A or S-1B records the data in right looking orientation, and hence the data also looks like a mirror image of real world. The range doppler terrain correction is applied to correct the imagery orientation from sensor's orientation to earth's orientation.

7. Mask out to study area: Finally, the data was masked out to the study area, using respective study area boundaries.

Sen2Cor plugin:

- Sen2Cor is a Level-2A processor, for which the main purpose is to correct single-date S-2 Level-1C Top-Of- Atmosphere (TOA) products from the effects of the atmosphere and to deliver Level-2A Bottom-Of-Atmosphere (BOA) reflectance product. Other products generated by the Sen2Cor plugin are Aerosol Optical Thickness (AOT) map, a water vapour (WV) map and a Scene Classification (SCL) map with quality indicators for cloud and snow probabilities [*Main-Knorn et al.*, 2017].
- Sen2Cor plugin workflow consists of five modules coordinating interactions within the workflow. The Scene Classification (SCL) and Atmosphere correction (AC) modules are specially designed for processing the S-2 Level-1C input data into Level-2A products.

The main processing workflow consists of five following methods [*Gascon et al.*, 2017]:

1. Cloud Detection: to detect the cloud cover, which later used for removing the cirrus cloud.

2. Scene Classification (SCL): to classify the input S-1C data into 11 classes viz., vegetation, soils, cirrus class, water, snow, cloud shadows, dark area pixels, unclassified saturated or defective pixels including 2 classes for cloud probabilities (medium, high).

3. Retrieval of Aerosol Optical Thickness (AOT): to retrieve the aerosols values from Level-1C data and then measure for the visual transparency of the atmosphere.

4. Retrieval of Water vapor (WV): to retrieve the water vapour values from the Level-1C for which the Atmospheric Pre-corrected Differential Absorption algorithm will be used.

5. Conversion of TOA to BOA: The values of Top of the Atmosphere (TOA) will be calibrated to Bottom of the Atmosphere (BOA) which helps is analysing what is on the earth's surface, by neglecting the values reflected from top of the atmosphere.

6. Finally, the results obtained were multi-size mosaiced (since that bands of S-2B were of multiple spatial resolutions) and masked out to the study area.

The RGB clustering is the most common technique for data compression and iso-clustering works better on an optimal number of classes usually unknown [*Komac*, 2006; *Mohamed, Verstraeten*, 2012]. The RGB clustering functions are a simple classification algorithm that quickly compresses a three-band image into a single-band pseudo-colour image without necessarily classifying any particular features and without a signature file and decision rule. The RGB clustering provides greater control over the parameters used to partition the pixels into similar classes [*Kumar et al.*, 2016; *Mahi et al.*, 2016]. After exploring for RGB clustering, random forest classification technique was used to classify image into flooded and non-flooded areas. Random forest classification over maximum likelihood was chosen supervised classification of specified classes. Since RF method ensures a unique predictive validity and

model interpretability within known machine learning methods [*Horning*, 2010; *Clement et al.*, 2017].

Only VV band was explored for the built-up estimation from S-1A as suggested here [*Deepthi et al.*, 2018]. The RGB colour combination of NIR, Red, NIR bands for built-up in S-2B was explored as suggested here [*Vigneshwaran, Selvaraj*, 2018].

RESULTS OF RESEARCHES AND THEIR DISCUSSION

Samples of flooded areas were taken from the RGB colour combination result. So whichever the areas appeared in bright red colour channel, those are considered as training samples for flooded areas. Along with flooded areas, samples of waterbodies were taken from the areas of dark black colour and finally remaining areas were considered as samples for non-flooded areas. With these training samples, RF supervised classification was computed to estimate the flooded areas out of S-1A RGB colour combination (fig. 5) and S-2B (fig. 6) respectively. Flooded area of august 2019 East Godavari floods was estimated as 600.806251 km^2. The Non-flooded areas were estimated as 9748.992449 km^2 and waterbodies estimated as 440.793296 km^2.

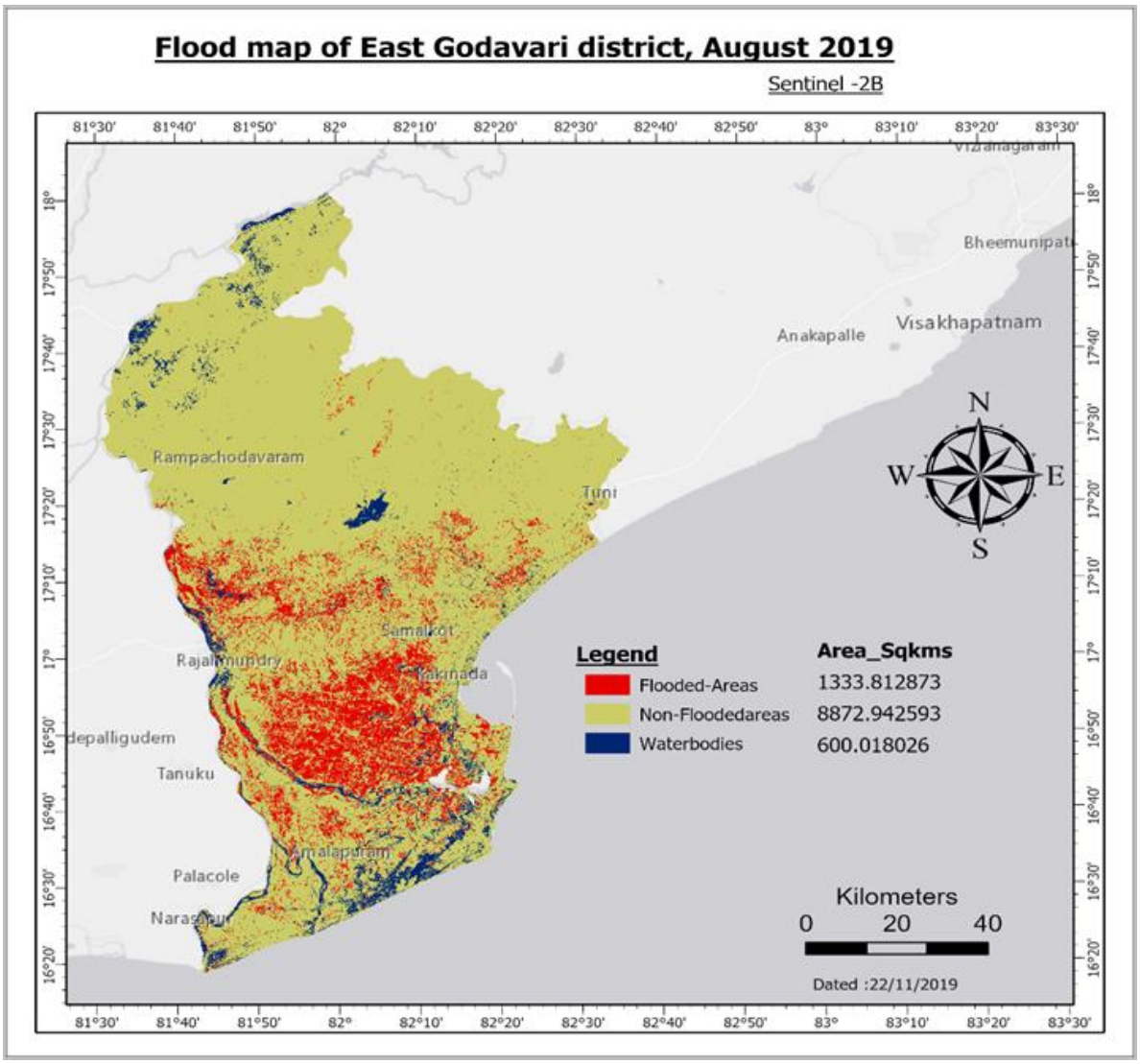


Fig. 5. Area under flood due to august 2019 EG floods, i.e., estimated in S-2B is 1333.812873 km^2

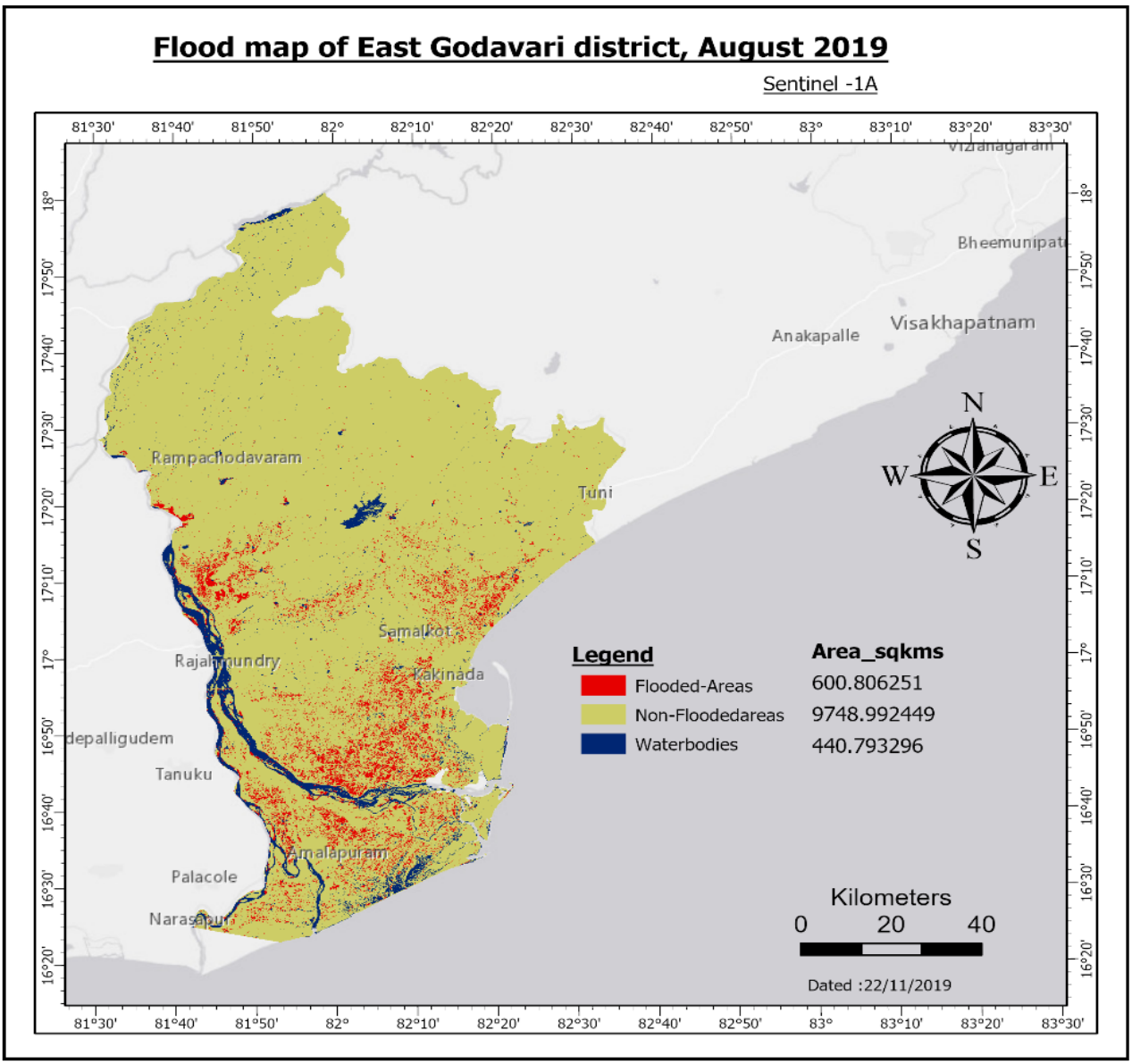


Fig. 6. Flood map of East Godavari, August 2019 from S-2B, i.e., estimated was 600.806251 km^2

Samples of built-up areas were taken from different RGB colour combination result by altering the RGB colour channels and using Google Earth. The areas appeared in red colour channel considered as training samples for built-up areas. Along with built-up areas, samples of vegetation from green colour channel and water body samples from dark black colour were taken. The RF supervised classification was computed to estimate the built-up areas out of S1-A RGB colour combination (fig. 7) and (fig. 8) respectively. Built-up map of East Godavari, 2018 from S-1A i.e., estimated was 1276.094558 and from S-2B (2018) estimated was 500.305358 km^2.

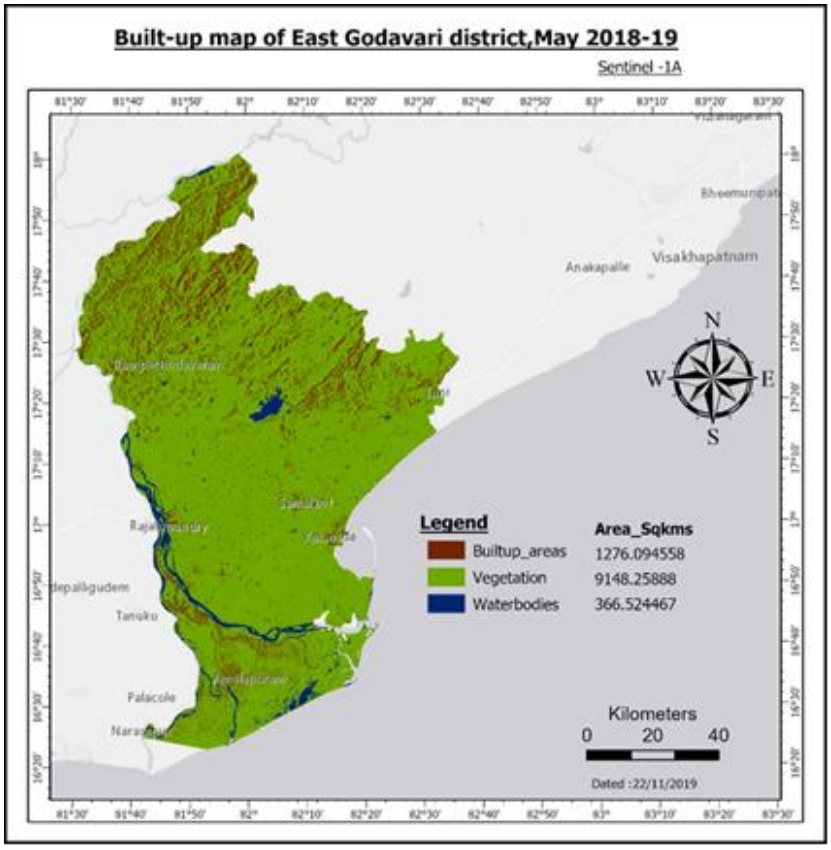


Fig. 7. Built-up map of East Godavari, 2018 from S-1A, i.e., estimated was 1276.094558 km^2

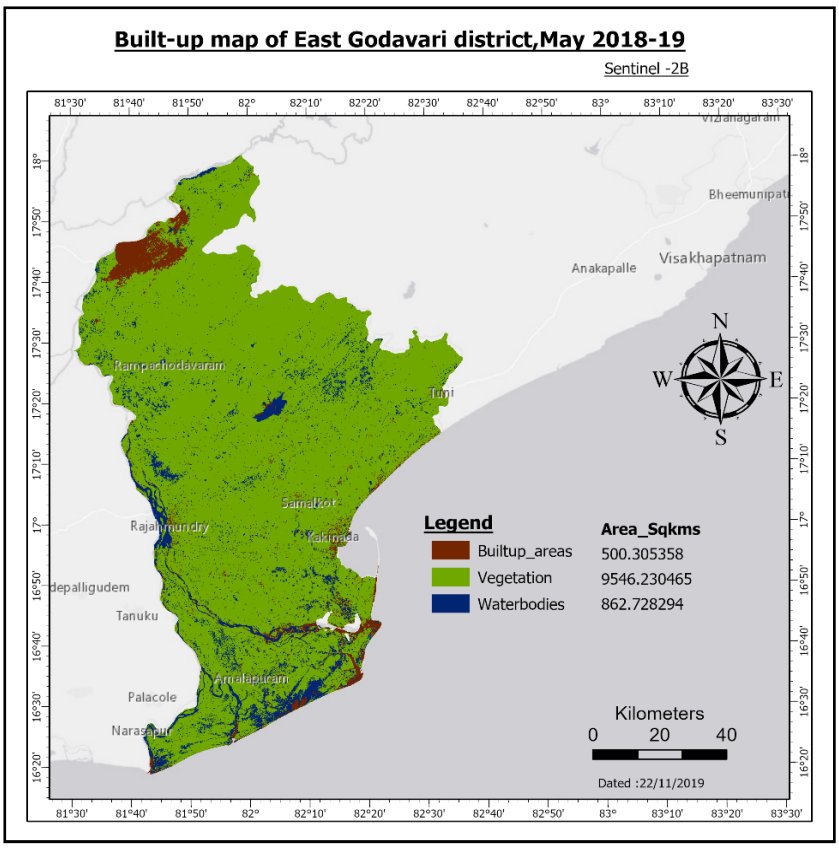


Fig. 8. Built-up map of East Godavari, 2018 from S-2B, i.e., estimated was 500.305358 km^2

CONCLUSIONS

The RGB clustering through RGB colour combination is basic method finally adopted after exploration among the fast computing methods which assists in fast computation and estimation of the flooded areas and estimation of the damaged built-up and vegetation areas due to the august 2019 East Godavari floods, India. Before applying the RGB clustering for the S-2B imageries, pre-processing is a major requirement, since the S-2B is not resistant from atmospheric and weather disturbances while recording the energy from the surface of the earth. Sen2Cor plugin was used for fast pre-processing of the S-2B imageries.

In S-2B the flooded area estimated was high than S-1A. Decentralisation to the level of sub-districts or mandals of East Godavari district was performed. The observation made here is the districts lied at the banks of the Godavari river, has low flood area estimation in S-1A and high flood area estimation in S-2B. The reason could be the gap of the two days late acquisition by S-1A and early data record by the S-2B. Hence, the limitation here would be the availability of the S-1A data during the occurrence of the flood but not two or few days later the event. Otherwise, S-2B would be preferred over S-1A. Because, S-2B data may be available during the floods and it gives approximate aerial extent of floods.

In terms of built-up area estimation, S-1A has higher area than S-2B. Decentralisation to the level of sub-districts or mandals is performed to analyse which are the areas might get classified as built-up area in S-1A built-up area estimation. The observation made from this decentralisation is that the sub-districts which has the high land cover of the fallow lands and dry lands over the mountainous areas also got classified as built-up areas in S-1A. Hence, this current work should be extended towards the delineation of the fallow lands and drylands from the built-up areas in S-1A for accurate built-up area estimation.

Further outlook:

- This work could be further extended towards careful exploration for the training samples collection in S-1A, since in our current work parts of fallow lands and dry lands were classified as built-up areas.
- What could be the changes in estimations of built-up, vegetation, and flooded areas would be with cloud free Sentinel -2B data.
- Differentiating on same dates data of S-1A and S-2B.
- Currently only the flooded area was estimated, but the quantitative analysis of flood depth also needed to explore [*Jo et al.*, 2018]. Because depth of the flood water formulates more crucial part for disaster rescue teams to evacuate people and to plan rescue operations.

REFERENCES

1. *Aher S.P., Khemnar S.B., Shinde S.D.* Synthetic aperture radar in Indian remote sensing. International Journal of Applied Information Systems, 2014. V. 7. No 2. P. 41−44.

2. *Balz T.* SAR simulation based change detection with high-resolution SAR images in urban environments. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul, 2004. V. 35. Part B.

3. *Bhatta B.* Remote sensing and GIS (2nd edition). India: Oxford University Press, 2011. 752 p.

4. *Bramhe V., Ghosh S.K., Garg P.K.* Extraction of built-up areas using convolutional neural networks and transfer learning from Sentinel-2 satellite images. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2018. V. 3. P. 79–85. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-79-2018.

5. *Clement M.A., Kilsby C.G., Moore P.* Multi-temporal synthetic aperture radar flood mapping using change detection. Journal of Flood Risk Management, 2017. No 4. P. 152–168. DOI: 10.1111/jfr3.12303.

6. *Dadhich G., Miyazaki H., Babel M.* Applications of Sentinel-1 synthetic aperture radar imagery for floods damage assessment: A case study of Nakhon Si Thammarat, Thailand. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information

Sciences, 2019. V. XLII-2/W13. P.1927−1931. DOI: https://doi.org/ 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1927-2019.
7. *Deepthi R., Ravindranath S., Raj G.K.* Extraction of urban footprint of bengaluru city using microwave remote sensing. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2018. V. XLII-5. P. 735–740. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-5-735-2018.
8. *Filipponi F.* Sentinel-1 GRD preprocessing workflow. 3rd International Electronic Conference on Remote Sensing. Rome, Italy, 2019. V. 48. DOI: 10.3390/ECRS-3-06201.
9. *Forget Y., Linard C., Gilbert M.* Automated supervised classification of Ouagadougou built-up areas in Landsat scenes using OpenStreetMap. Conference: Joint Urban Remote Sensing Event, Dubai, 2017. No 3. DOI: 10.1109/JURSE.2017.7924571.
10. *Gascon F., Bouzinac C., Thépaut O., Jung M., Francesconi B., Louis J., Lonjou V., Lafrance B., Massera S., Gaudel-Vacaresse A., Languille F., Alhammoud B., Viallefont F., Pflug B., Bieniarz J., Clerc S., Pessiot L., Trémas T., Cadau E., Bonis R.D., Isola C., Martimort M., Fernandez V.* Copernicus Sentinel-2A calibration and products validation status. Remote Sensing, 2017. V. 9. 584 p.
11. *Gómez C., Michael A.W., Wulder., White J.C.* Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016. V. 116. P. 55–72. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.03.008.
12. *Griffiths P., Linden S., Kuemmerle T., Hostert P.* A pixel-based Landsat compositing algorithm for large area land cover mapping. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2013. V. 6. P. 2088–2101.
13. *Guida L., Boccardo P., Donevski I., Schiavo L.L., Molinari M.E., Monti-Guarnieri A., Oxoli D., Brovelli M.A.* Post-disaster damage assessment through coherent change detection on sar imagery. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2018. V. 3. P. 431–436.
14. *Horning N.* Random Forests: An algorithm for image classification and generation of continuous fields datasets. International Conference on Geoinformatics for Spatial Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences, Osaka, 2010. V. 911. P. 1−6.
15. *Jain R.K.* “Cyclone Hudhud”. Strategies and Lessons for Preparing Better & Strengthening Risk Resilience in Coastal Regions of India. National Disaster Management Authority, 2015. 58 p.
16. *Jo M.J., Osmanoglu B., Zhang B., Wdowinski S.* Flood extent mapping using dual-polarimetric Sentinel-1 synthetic aperture radar imagery. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2018. V. 3. P. 711−713. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-711-2018.
17. *Joyce K.E., Belliss S.E., Samsonov S.V., McNeill J.S., Glassey J.P.* A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters. Progress in Physical Geography, 2009. V. 33. P. 183–207. DOI: 10.1177/0309133309339563.
18. *Kaplan G.J., Avdan U.* Object-based water body extraction model using Sentinel-2 satellite imagery. European Journal of Remote Sensing, 2017. V. 50. No 1. P. 137−143. DOI: 10.1080/22797254.2017.1297540.
19. *Klemas V. V.* The role of remote sensing in predicting and determining coastal storm impacts. Journal of Coastal Research, 2009. V. 25. P. 1264–1275. DOI: 10.2112/08-1146.1
20. *Komac M.* A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. Geomorphology, 2006. V. 74. P. 17–28. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.07.005.

21. *Kumar A., Pandey A.C., Jeyaseelan A.T.* Built-up and vegetation extraction and density mapping using WorldView-II. Geocarto International, 2012. V. 27. P. 557–568. DOI: 10.1080/10106049.2012.657695.
22. *Kumar G., Sarthi P.P., Ranjan P., Rajesh R.* Performance of k-means based satellite image clustering in RGB and HSV color space. International Conference on Recent Trends in Information Technology (ICRTIT), Chennai, India. 2016. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICRTIT.2016.7569523.
23. *Lee J.S., Jurkevich L., Dewaele P., Wambacq P., Oosterlinck A.* Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review. Remote Sensing, 1994. V. 8. P. 313–340.
24. *Mahi H., Farhi N., Labed K.* Unsupervised classification of satellite images using K-Harmonic means algorithm and cluster validity index. EARSeL eProc, 2016. V. 15. 10 p. DOI: 10.12760/01-2016-1-02.
25. *Main-Knorn M., Pflug B., Louis J., Debaecker V., Müller-Wilm U., Gascon F.* Sen2Cor for Sentinel-2. Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII, Germany, 2017. SPIE Proceedings. V. 10427. 12 p. DOI: 10.1117/12.2278218.
26. *Mohamed I.N.L, Verstraeten G.* Analyzing dune dynamics at the dune-field scale based on multi-temporal analysis of Landsat-TM images. Remote Sensing of Environment, 2012. V. 119. P. 105–117. DOI: 10.1016/j.rse.2011.12.010.
27. *Ndehedehe C.E., Oludiji S.M., Asuquo I.M.* Supervised learning methods in the mapping of built up areas from Landsat-based satellite imagery in part of Uyo Metropolis. New York Science Journal, 2013. V. 6. P. 45–52.
28. *Nedkov R.* Orthogonal transformation of segmented images from the satellite Sentinel-2. Comptes Rendus de l'Academic Bulgare des Sciences, 2017. V. 70. P. 687–692.
29. *Park J.W., Korosov A., Babiker M.* Efficient thermal noise removal of Sentinel-1 image and its impacts on sea ice applications. EGU General Assembly Conference Abstracts, Vienna, Austria, 2017. P. 12613.
30. *Pradesh A.* Flood situation in Godavari delta still grim. The Hindu. Delhi, 2019. No 8. Electronic resource: https://www.thehindu.com/news/national/andhra-pradesh/flood-situation-in-godavari-delta-still-grim/article28816309.ece (accessed 05.05.2020).
31. *Rawat J.S., Kumar M.* Monitoring land use or cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India. Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 2015. V. 18. P. 77−84. DOI: 10.1016/j.ejrs.2015.02.002.
32. *Saptarsi G., Ghosh S., Chakrabarti A., Chakraborty B., Chakraborty S.* A review on application of data mining techniques to combat natural disasters. Ain Shams Engineering Journal, 2018. V. 9. P. 365 –378. DOI: 10.1016/j.asej.2016.01.012.
33. *Uddin K., Matin M.A., Meyer F.J.* Operational flood mapping using multi-temporal Sentinel-1 SAR images: A case study from Bangladesh. Remote Sensing, 2019. V. 11 (13). P. 1518. DOI: 10.3390/rs11131581.
34. *Valdiveizo-N J.C., Salazar-G A., López-C A.A.* Built-up index methods and their applications for urban extraction from sentinel 2A satellite data: discussion. Optical Society of America, 2018. V. 35. N 1. P. 35−44. DOI: 10.1364/JOSAA.35.000035.
35. *Varshney A.* Improved NDBI differencing algorithm for built-up regions change detection from remote sensing data: An automated approach. Remote Sensing Letters, 2013. V. 4. P. 504−512. DOI: 10.1080/2150704X.2013.763297.
36. *Vigneswaran S., Selvaraj V.K.* Extraction of built-up area using high resolution Sentinel-2A and google satellite imagery. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2018. V. XLII-4/W9. P. 165−169. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-165-2018.
37. *White J.C., Wulder M.A., Hobart G.W., Luther J.E., Hermosilla T., Griffiths P., Coops N.C., Hall R.J., Hostert P., Dyk A., Guindon L.* Pixel-based image compositing for large-area dense

time series applications and science. Canadian Journal of Remote Sensing, 2014. V. 40. P. 192–212. DOI: 10.1080/07038992.2014.945827.
38. *Xu X.* Extraction of urban built-up land features from Landsat imagery using a thematic-oriented index combination technique. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2007. V. 73. No 12. P. 1381−1391.
39. *Yague-Martinez N., Prats-Iraola P., Gonzalez F.R., Brcic R., Shau R., Geudtner D., Eineder M., Bamler R.* Interferometric processing of Sentinel-1 TOPS data. EEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016. V. 54. P. 2220–2234. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2497902.

DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-436-442

Lola V. Sichugova[1]**, Dilbarkhon Sh. Fazilova**[2]

STRUCTURAL INTERPRETATION OF LINEAMENTS USING SATELLITE IMAGE PROCESSING: A CASE STUDY IN THE VICINITY OF THE CHARVAK RESERVOIR

ABSTRACT

This work presents the results of lineaments interpretation using the automated method of the satellite images in the territory of the Charvak water reservoir in Uzbekistan. Tectonic and local (water impoundment in Charvak reservoir) features of the region deformation were determined on base LINE algorithm in software PCI Geomatica. The thematic map with the geospatial arrangement of lineaments was constructed on base of satellite images LANDSAT-8 processing. We concluded that water level fluctuations have a greater influence on the appearance of the lineaments structure than periods of water filling and downstream in the reservoir. Lineament density maps showed dominantly increased density towards the north-southern direction is due to tectonic features of the region and the west-eastern direction is due to water level fluctuations in the reservoir. The lineaments density maps for summer-autumn periods showed the faults arising from water level fluctuations only. Winter-spring period affected with high influence of the seasonal (snow pack, rainfall) processes as well.

KEYWORDS: lineaments, LINE algorithm, LANDSAT-8, line density, Charvak reservoir

INTRODUCTION

Currently, a significant development was given by satellite observation methods of geodynamic processes. The operational analysis of geodynamics by recording the variability of lineaments on selected satellite images is one of the advanced methods for monitoring tectonically active territories [*Bondur et al.*, 2009]. Lineament analysis was used to study active fault patterns in unreachable mountain areas [*Chaabouni et al.*, 2012] and for analysis of underground water dynamics [*Takorabt et al.*, 2018]. Remote sensing techniques are highly informative, in particular, for assesment of the geodynamic environment state near artificial water reservoirs [*Gubin*, 2010]. Territories with a high density of lineaments is unsuitable for the construction of dams and reservoirs as the possibility of water leakages into the subsurface, slope and dam failures and rate of sedimentation would be higher [*Prabhakaran, Jawahar*, 2018]. This work describes the method and the results of the analysis of lineaments structures by interpretation satellite data of the Landsat-8. The vicinity of Charvak water reservoir was chosen for analysis of deformations due to tectonic movements and water level fluctuations in the reservoir processes.

Study Area

The Charvak water reservoir is located in the Middle Tien-Shan zone at the boundary the Tien-Shan orogenic territory and the Turan plate. The mountain ranges (Karzhantau, Chatkal and Kurami), covered by young structures in some areas, surround this field and decrease in southwest direction. Recent up thrusts and deflections characterize plain part of the territory [*Yarmuhamedov et al.*, 1979].

In 1970, construction of the Charvak dam with the height of 167 m has ended and started flowage of Brichmulla depression and filling of the reservoir. Along the 1000 km river's length

[1] Ulugh Beg Astronomical Institute (UBAI) of the Uzbekistan Academy of Sciences, Astronomicheskaya str., 33, Uzbekistan, Tashkent; *e-mail*: **slola988@gmail.com**

[2] Ulugh Beg Astronomical Institute (UBAI) of the Uzbekistan Academy of Sciences, Astronomicheskaya str., 33, Uzbekistan, Tashkent; *e-mail*: **dil_faz@yahoo.com**

between the Toktogul and the Chardarya reservoirs, Charvak and two other main reservoirs (Karakul, Andijan) are included to the Naryn–Syrdarya-cascade. The reservoir surface area is about 40 km^2 and its capacity is 2 km^3. Water reservoir intends mainly for hydro-power purposes [*Rakhmatullaev et al.*, 2013]. High mountainous regions are located in the south-east and north near Charvak water reservoir and the maximum heights reaches up to 3000 m.

MATERIALS AND METHODS OF RESEARCHES

The free-availability of global coverage Landsat-8 data provides the opportunity for medium resolution global land surface monitoring [*Roy et al.*, 2014]. The Landsat-8 satellite is in circular sun-synchronous orbits and, with the 15° Operational Land Imager (OLI) sensor field of view with 16-day repeat cycles. The Landsat-8 images with 30 m resolution of the study region from the United States Geological Survey (USGS) Earth Explorer website were obtained for special (top water level, downstream, fully drawn down) time periods in the Charvak reservoir (December, March, June and September). The Landsat-8 has 11 reflective wavelengths (from 435 nm to 12510 nm) bands, 7 of them (coastal, blue, green, red, NIR, SWIR 1/2) were used in this study.

Automated lineament analysis methodology was used in this research. Data analysis carried out using ENVI, PCI Geomatica and ArcGIS software. The first step of the methodology is the selection of initial input data for lineament extraction. Image processing for the extraction of lineaments involving multi-bands image, contrast stretching, and image enhancement. Principal Component Analysis (PCA) was carried out on the satellite data using ENVI software. PCA was created with seven multi-bands images. It is used to de-correlate the different bands and to reduce the dimension of the resulting feature space enhancing the multi-band image for structural interpretation purposes. The goal was to use inter-band correlation, to compress textural information from the seven co-occurrence images and to represent nearly the whole of the available information. Fig. 1 shows the result of the PCA of the study area.

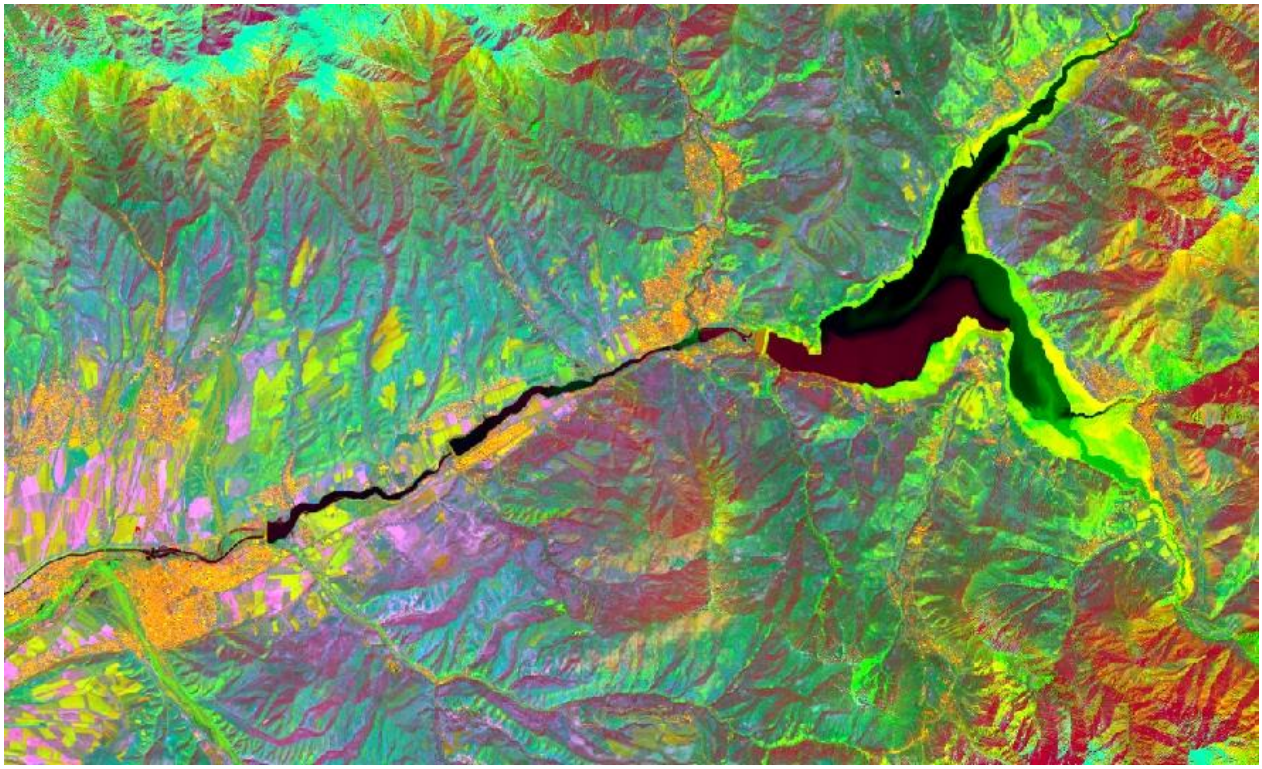


Fig. 1. PCA of the study area in March 2016

The analysis of the automatic extraction of lineaments was done using the LINE module of PCI Geomatica [Geomatica, 2013]. The principle of operation of the module is to extract linear objects from the raster images and the output lines are saving in vector format. The final poly-lines are saved in a vector segment. The algorithm parameters used for processing are as follows:

1. RADI — Radius of the filter in pixels;
2. GTHR — Threshold for edge gradient;
3. LTHR — Threshold for curve length;
4. FTHR — Threshold for line fitting error;
5. ATHR — Threshold for angular difference;
6. DTHR — Threshold for linking distance.

The LINE algorithm consists of three main processing steps: edge detection, thresholding and curve extraction. In the first step, the Canny Edge detection algorithm is applied to produce an edge strength image. There are three sub steps: filtering the input image using the Gaussian functions with a radius according to the parameter Filter Radius (RADI), gradient calculation and, finally, pixels whose gradient are not the local maximum are suppressed by setting the edge strength to 0. In the second stage, the edge strength image is a threshold to obtain a binary image. The threshold value is defined by the Edge Gradient Threshold (GTHR) parameter. And, finally, the last stage, curve extraction, consists of producing pixel-wide skeleton curves, extracting of a sequence of pixels for each curve and converting them to vector format by fitting line segments to it. The maximum fitting error (distance between the two) is specified by the Line Fitting Threshold (FTHR) parameter. And finally, the algorithm links pairs of polylines that satisfy the conditions:

- Two end-segments of the two polylines face each other and have similar orientation (the angle between the two segments is less than the value specified by ATHR);
- The two end-segments are close to each other (the distance between the end points is less than the value of DTHR).

The parameters of the algorithm are presented in table 1. The length and rose diagrams of the lineaments of automatically extracted were also calculated. The lineament density parameter was built in ArcGIS using the density tool. This instrument calculates the density of linear facilities in each cell of the exit grid.

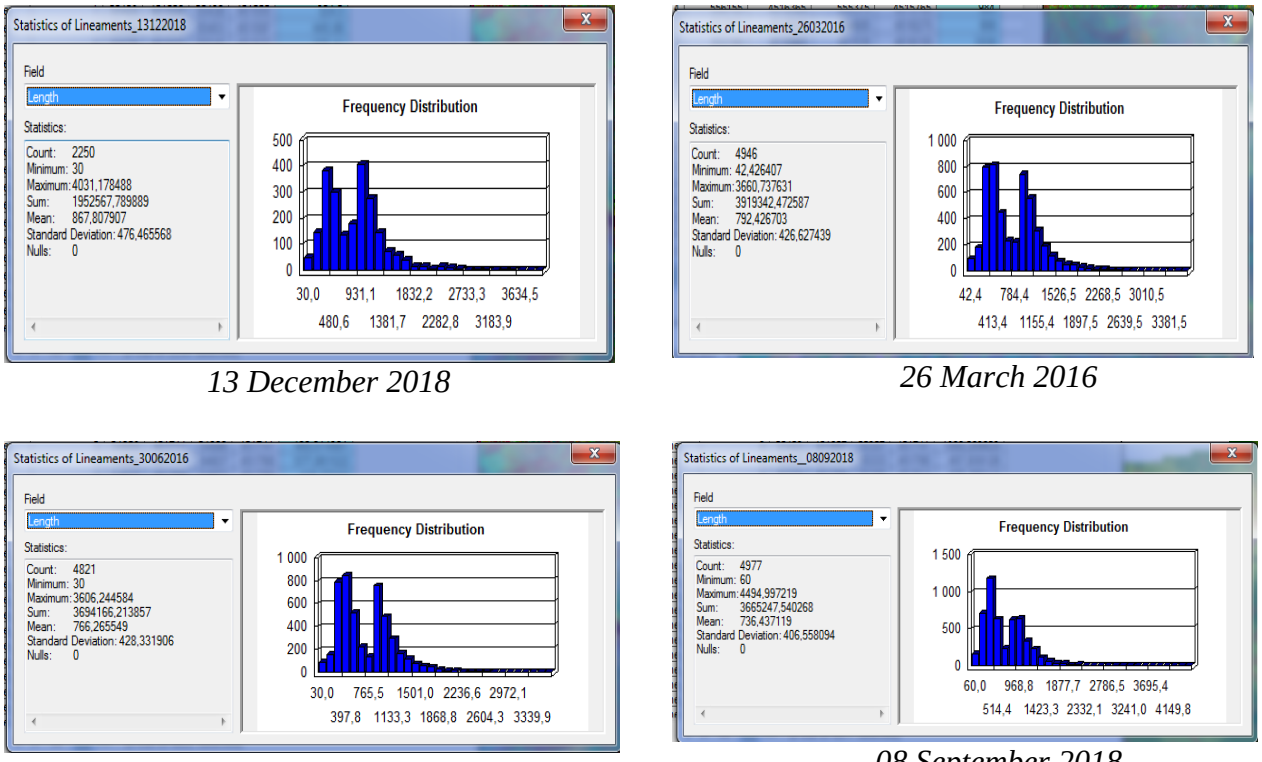
Table 1. Parameters of the LINE Algorithm

№	Name	Description	Unit	Data range	Value
1	RADI	Filter Radius	Pixels	0–8192	10
2	GTHR	Edge Gradient Threshold	—	0–255	50
3	FTHR	Line Fitting Threshold	Pixels	0–8192	30
4	LTHR	Line Fitting Threshold	Pixels	0–8192	3
5	ATHR	Angular Difference Threshold	Degrees	0–90	15
6	DTHR	Linking Distance Threshold	Pixels	0–8192	20

RESULTS OF RESEARCHES AND THEIR DISCUSSION

Linear features on a satellite image regularly reflect the geological lineaments (faults or fractures) and hydrological structures (river or shoreline) [*Lillesand et al.*, 2004]. The lineaments were extracted from the PCA image to show distinct structural features (including faults, shears and fractures). The fig. 2 and table 2 present statistics (maximum and minimum length, density and orientation) of lineaments for different time periods. Results show that the minimum of

lineaments numbers reached in December month (2250) during reservoir end of water downstream time. In contrast, March, June and September are periods with high numbers of lineaments. It is possible that water level fluctuations have a greater influence on the appearance of the lineaments structure than periods of water filling and downstream in the reservoir.



13 December 2018 *26 March 2016*

30 June 2016 *08 September 2018*

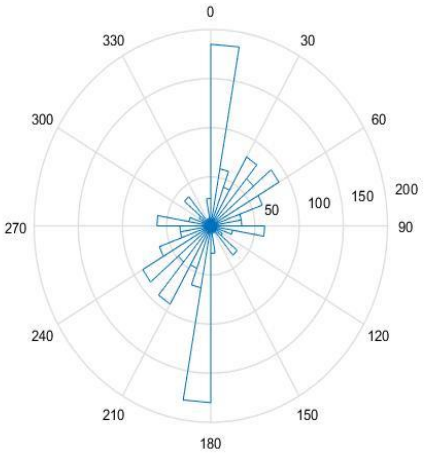
Fig. 2. Histograms of statistics length of lineaments

Table 2. Histograms of statistics length of lineaments

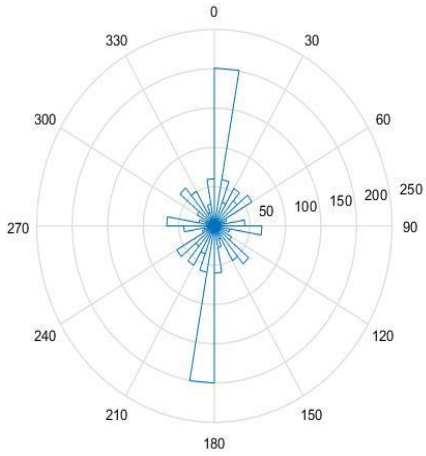
Value	December	March	June	September
Count	2250	4946	4821	4977
Minimum, m	30	42,426407	30	60
Maximum, m	4031,178488	3660,737631	3606,244584	4494,997219
Sum, m	1952567,789889	3919342,472587	3694166,213857	3665247,540268
Standard Deviation, m	476,465568	426,627439	428,331906	406,558094

Analysis of the lineament network for different time periods images allows highlighting of the orientation of them (fig. 3). The interpretation of all lineaments allowed dominance of N–S as a main lineament direction and W–E striking as a secondary lineament direction for whole territory. N–S orientation of the lineaments is all periods and may indicate the trend of the fault movement in the region [*Burtman*, 2019]. W–E orientation dominates during high water capacity periods (June, September) and may indicate water level variation effect.

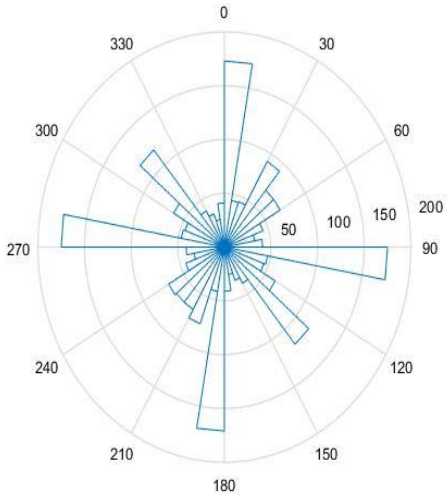
Lineament density maps for the study area present the concentrations of the lineaments near the Charvak reservoir more detailed (fig. 4). It appears from all maps that there are several zones in the area. The resulting lineament density maps show dominantly increased density towards the southeastern part of the area. In the northern part of the area, there is a high concentration of lineaments for winter-spring period; that seems to be the result of high effectively of the seasonal (snow pack, rainfall) processes. The lineaments density maps for June and September can clear reflect faults arising from water level fluctuations.



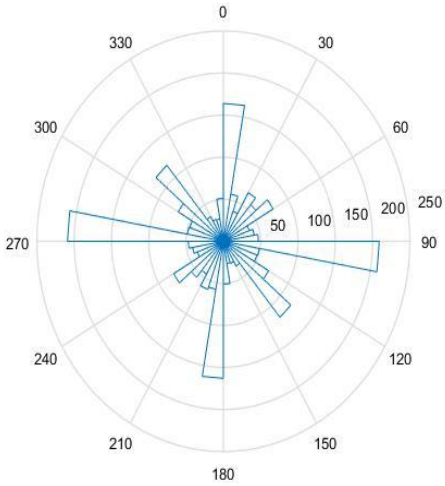
13 December 2018



26 March 2016



30 June 2016



08 September 2018

Fig. 3. Rose diagrams showing the main trends for the observed lineaments

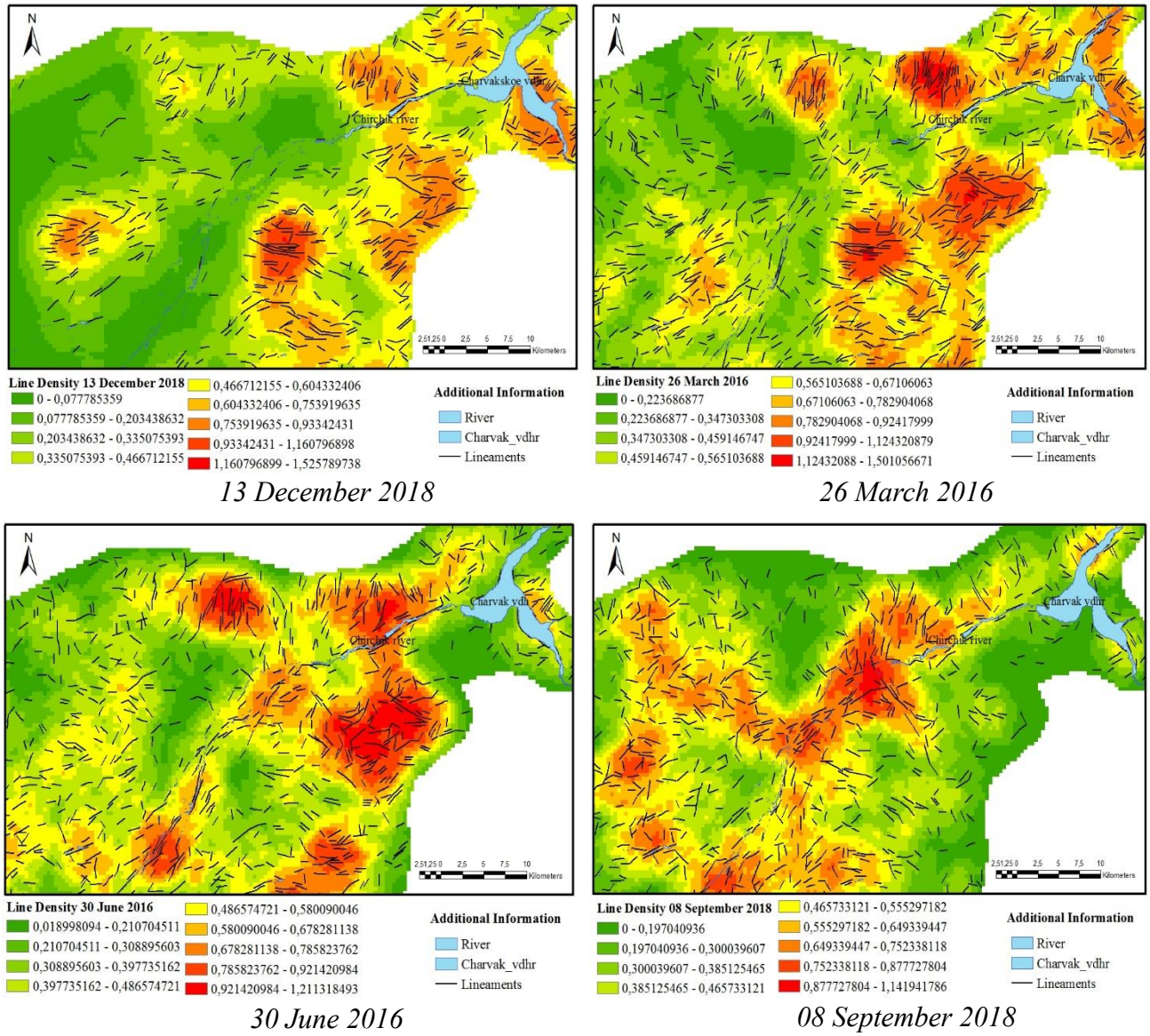


Fig. 4. Lineament density map

CONCLUSIONS

This study was conducted to characterize and to analyze the spatial organization of lineaments in the vicinity of the Charvak reservoir. The Landsat-8 images with 30 m resolution of the study region from the USGS Earth Explorer website were obtained for special (top water level, downstream, fully drawn down) time periods in the Charvak reservoir (December, March, June and September). Automated lineament analysis methodology was used in this research. ENVI, PCI Geomatica and ArcGIS software were used for data processing. Results show that the minimum of lineaments number reached in December month (2250) during reservoir end of water downstream time. In contrast, March, June and September are periods with high numbers of lineaments. We concluded that water level fluctuations have a greater influence on the appearance of the lineaments structure than periods of water filling and downstream in the reservoir. The lineaments density maps for summer-autumn periods showed the faults arising from water level fluctuations only. Winter-spring period affected with high influence of the seasonal (snow pack, rainfall) processes as well.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was carried out within the scientific and applied project FA-A5-F014 of the Astronomical Institute of Uzbekistan with the financial support of the Ministry of Innovative Development of the Republic of Uzbekistan.

REFERENCES

1. *Bondur V.G., Krapivin V.F., Savinykh V.P.* Monitoring and forecasting natural disasters. Moscow: Scientific World, 2009. 692 p. (in Russian).
2. *Burtman V.* Disjunctive dislocations of the upper crust of Tien Shan. Reports Earth Sciences, 2019. V. 484. P. 37–39. DOI: 10.1134/S1028334X19010185.
3. *Chaabouni R., Bouaziz S., Peresson H., Wolfgang J.* Lineament analysis of South Jene in Area (Southern Tunisia) using remote sensing data and geographic information system. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 2012. V. 15. P. 197–206.
4. *Gubin V.N.* Satellites technology in geodynamics. Minsk: Minsktipproekt, 2010. 87 p. (in Russian).
5. *Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W.* Remote Sensing and Image Interpretation. 5th edition. New York: John Wiley & Sons Inc., 2004. 666 p. DOI: 10.2307/634969.
6. Geomatica 2013. OrthoEngine. Course Exercises. Version 2013. Richmond Hills, Ontario, Canada: PCI Geomatics Enterprises Inc., 2013. 169 p.
7. *Prabhakaran A.N., Jawahar Ray N.* Mapping and analysis of tectonic lineaments of Pachamalai hills, Tamil Nadu, India using geospatial technology. Geology, Ecology, and Landscapes, 2018. 22 Mar. P. 81–103. DOI: 10.1080/24749508.2018.1452481.
8. *Rakhmatullaev Sh., Huneau F., Celle-Jeanton H., Le Coustumer Ph., Motelica-Heino M., Bakiev M.* Water reservoirs, irrigation and sedimentation in Central Asia: A first cut assessment for Uzbekistan. Environmental Earth Sciences, 2013. No 68 (4). P. 985–998. DOI: 10.1007/s12665-012-1802-0.
9. *Roy D.P., Wulder M.A., Loveland T.R., Woodcock C.E., Allen R.G., Anderson M.C.* Landsat-8: science and product vision for terrestrial global change research Remote Sens. Environ, 2014. No 145. P. 154–172.
10. *Takorabt M., Toubal A.C., Haddoum H., Zerrouk S.* Determining the role of lineaments in underground hydrodynamics using Landsat 7 ETM+ data, case of the Chott El Gharbi Basin (western Algeria). Arabian Journal of Geosciences, 2018. No 11 (76). DOI: 10.1007/s12517-018-3412-y.
11. *Yarmukhamedov A.R., Yakubov D.H., Sattarov A.S.* Modern geodynamics of East Uzbekistan. Tashkent: “Fan”, 1979. 111 p. (in Russian).

DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-443-453

Lorant Földváry[1,2], Victor Statov[3], Nizamatdin Mamutov[3]

APPLICABILITY OF GRACE AND GRACE-FO FOR MONITORING WATER MASS CHANGES OF THE ARAL SEA AND THE CASPIAN SEA

ABSTRACT

The GRACE gravity satellite mission has provided monthly gravity field solutions for about 15 years enabling a unique opportunity to monitor large scale mass variation processes. By the end of the GRACE, the GRACE-FO mission was launched in order to continue the time series of monthly gravity fields. The two missions are similar in most aspects apart from the improved intersatellite range rate measurements, which is performed with lasers in addition to microwaves. An obvious demand for the geoscientific applications of the monthly gravity field models is to understand the consistency of the models provided by the two missions.

This study provides a case-study related consistency investigation of GRACE and GRACE-FO monthly solutions for the Aral Sea region. As the closeness of the Caspian Sea may influence the monthly mass variations of the Aral Sea, it has also been involved in the investigations. According to the results, GRACE-FO models seem to continue the mass variations of the GRACE period properly, therefore their use jointly with GRACE is suggested.

Based on the justified characteristics of the gravity anomaly by water volume variations in the case of the Aral Sea, GRACE models for the period March−June 2017 are suggested to be neglected. Though the correlation between water volume and monthly gravity field variations is convincing in the case of the Aral Sea, no such a correlation for the Caspian Sea could have been detected, which suggests to be the consequence of other mass varying processes, may be related to the seismicity of the Caspian Sea area.

KEYWORDS: data acquisition, gravity field, gravimetry, temporal variation

INTRODUCTION

Geoinformatics, basically, a tool for handling geographic information (or shortly geoinformation), that is data and information having an implicit or explicit association with a location relative to the Earth[4]. The data or information can be any kind, but it always relies (directly or indirectly) on observations, i.e. outcome of data acquisition.

In practice, the strength of Geographic information systems (GIS) with respect to classical map-based representation of location-based quantities is that they are supported by interactive tools, i.e. queries can be defined by the users, and different spatial data analyses can be implemented, and the map content according to the result of the analyses can be edited. All in all, GIS provides a much more flexible platform than electronic maps, therefore they became popular for numerous applications ranging from the simplest visual data screening through location intelligence studies to severe, elaborated geoscientific research.

[1] Institute of Geoinformatics, Óbuda University, Pirosalma str., 1−3, H-8000, Székesfehérvár, Hungary; *e-mail:* **foldvary.lorant@amk.uni-obuda.hu**

[2] Geodetic and Geophysical Institute, Research Centre of Astronomical and Earth Sciences, Hungarian Academy of Science, Csatkai Endre str., 6−8, H-9400, Sopron, Hungary; *e-mail:* **foldvary.lorant@csfk.mta.hu**

[3] Karakalpak State University, A. Dosnazarov ko'shesi, 230112, Nukus, Uzbekistan; *e-mail:* **nukusgiscenter@gmail.com**

[4] ISO/TC 211. Multi-lingual glossary of terms. 2016. Web resource: http://www.isotc211.org/Terminology.htm (accessed 24.04.2020).

Among the quasi-infinite range of GIS applications, gravity field of the Earth can also make benefit of Geoinformation Science (GISc). Even though, the GIS era has been started in the late 1970^{s} or 1980^{s}, its potential has not become clear for the gravimetry community even until the 1990^{s}. Among the first papers on use of GIS for the gravity field, some has been inappropriately addressed, e.g. Maslov [1996] has labeled an analysis on the role of the marine gravity in measuring the sea surface topography as "GIS data sets optimization". An expedient attempt to test the applicability of GIS for geodesy has been delivered by Crippa, Sanso [1996]. This study has used the GRASS GIS for integrating and processing a geoid model and satellite altimetry data. Basically, the GIS tools, which were actually applied in that study were:

1) representation of the data sets (both gridded and sparse data);
2) interpolation of one data to the points of the other;
3) outlier detection by comparison the interpolated data with the other;
4) smoothing of the outlier-eliminated data and interpolation back to the original points.

Even though they have concluded that GIS was fast and reliable, they have also found that it may have a little, but meaningful impact on geodesy. By the time, both GIS tools and geodetic observation techniques improved a lot, as so, it makes sense to revisit this conclusion.

There are very few published attempts for applying GIS software for gravity field variables are known so far. An online GIS service, the Gravity Information System (SIS) has been developed at the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, Germany[1]. This system is presented on a Java platform, which enables query of gravity information (the gravity value, or free-air or Bouguer anomaly, also contour lines of gravity referred to as "gravity zones") by coordinates (or by clicking on the base map) at the physical surface (approximated by the SRTM DEM model) or at any arbitrarily defined altitude above it. The background of the workspace can either be topographic or gravity anomaly map. This system makes only partially use of the benefits of the GIS in both on data query and on data representation.

The China Regional Gravity Information System (RGIS) has been developed by the China Geological Survey [*Zhang et al.*, 2011]. This system is based on the MapInfo platform with OLE technology. As it is stated in Zhang et al. [2011], the system can visually interpret data of spatial geography, geology and gravity for China. It furthermore enables graphical data editing and data table operations, and what is really specific is that there are classical gravimetric tools are defined, such as gravity reduction, gravity (and magnetic) field transformation, and gravity anomaly inversion. The system has been developed for regional use. The system is developed for terrestrial gravimetric data. Unfortunately, the system cannot be tested, as no internet availability could be found.

Further attempts for gravity field GIS are provided by Hobbs et al. [2000], Hinze et al. [2005], Wang, Zhang [2008], Tracey, Nakamura [2010] and Földváry et al. [2015]. The latter has developed a GIS package termed Gravity_RS_GIS, which has used as input data for temporal gravity variation GRACE monthly solutions for the period of April 2002 to April 2015 [*Földváry et al.*, 2015]. As time is passing by, update of the input data is essential, which is in the focus of this study. Meanwhile the GRACE mission has been ended, and for its replacement the GARCE-FO has been launched. It is essential to check the consistency of the earlier of the new monthly solutions, how smooth the continuation of the time series has been achieved, in order to derive proper queries and geostatistics. The investigations were performed with the Gravity_RS_GIS package [*Földváry et al.*, 2015] and with MATLAB ver. R2018b.

[1] Schwere-Informationssystem. Online GIS service. Web resource: https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt1/fb-11/fb-11-sis.html (accessed 24.04.2020)

MATERIALS AND METHODS OF RESEARCHES

The Gravity Recovery and Climate Experiment (abbr. GRACE) has provided gravity field models with monthly resolution for the period of 2002 to 2017 [*Bettadpur*, 2018]. This is a unique option for determining temporal variations of the gravity, consequently, mass redistribution processes generating the gravity change [*Wahr, Schubert*, 2007]. Seasonal mass variations (annual and semi-annual) of the Earth, which are capable by the GRACE monthly solutions are contributed by atmospheric, hydrologic, cryospheric and oceanographic masses [*Ilk et al.*, 2005]. Accordingly, the GRACE monthly models can efficiently be applied for investigation of seasonal periodical processes over large areas, such as oceanic transport process [*Chambers et al.*, 2004; *Chen et al.*, 2019] or hydrological processes [*Andersen et al.*, 2008; *Kiss, Földváry*, 2017a], and also for long periodic or secular mass variation, such as crustal motions [*Wang et al.*, 2019] or ice mass balance variations [*Shum et al.*, 2008; *Földváry*, 2012; *Kiss, Földváry, 2017b].*

Due to its success and notable contribution to Earth sciences and climate change related monitoring, by the end of the GRACE, the need for its continuation was obvious. The GRACE Follow-On (GRACE-FO) has been launched in 2017, providing further monthly solutions with a notable gap in the time series. The GRACE-FO is basically identical to the GRACE in its orbital configuration and technical design, apart from the intersatellite range rate measurements, which is performed with lasers in addition to microwaves, to achieve more precise results [*Yu*an, 2019].

As for the derived monthly gravity solutions, there are inconsistencies during the GRACE lifetime, also there is a gap between the GRACE and GRACE-FO. Table 1 summarize the available monthly solutions derived using GRACE (until 2017) and GRACE-FO (from 2018) observations. Comments to the notations in the table: X — a regular monthly solution, s — model for a notably shorter period, d — the actual period is notably delayed with respect to the nominal period, a — the actual period is notably advanced with respect to the nominal period.

Table 1. GRACE and GRACE-FO monthly solutions

	Jan	**Feb**	**Mar**	**Apr**	**May**	**Jun**	**Jul**	**Aug**	**Sep**	**Oct**	**Nov**	**Dec**
2002				X	s			X	X	X	X	X
2003	X	X	X	X	s		X	X	X	X	X	X
2004	s	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2005	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2006	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2007	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2008	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2009	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2010	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2011		s	X	X		X	X	X	X	X	a	d
2012	X	X	X	a		X	X	X	X		X	X
2013	X	X		s	X	X	X			X	X	X
2014	s		X	X	X	s		X	X	X	X	
2015	s	X	X	X	a		X	X	X			d
2016	X	X	X		X	X	X	d			d	d
2017	d		d	d	s	a						
2018						X	s			d	X	X
2019	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		

For the period of April 2002 to November 2019, monthly solutions could have been derived for 178 cases, which is 84.4 % of the potentially desired 211 models. Beyond the missing 33 months, only the 87.1 % of the available monthly solutions (i.e. 155 months) fulfill its requirements, the remaining models are partially successful attempts to derive some solution by the available data: for 10 months (5.6 %) models could derived using shorter time span (data length ranges from 14 to 20 days), and for further 13 models (7.3 %) it could be derived by

shifting relevantly (i.e. even with 2 weeks) the its period. It obviously shows that the different monthly solutions are not consistent in accuracy, also the timing of the models cannot considered be as regular. For each monthly solution, a posteriori covariance information is provided, which can be applied for weighting the different monthly solutions. As for the irregular timing, a more reliable reference day can be defined by considering the days of actual observations for each model. This way, however, the data is not consistent and not regularly sampled anymore.

The inconsistency of the GRACE monthly solutions is particularly important for two periods: basically, models in 2002 and models from August 2016 until the end of mission are less accurate. The latter case is a consequence of the malfunction (and then the subsequent turn-off) of the accelerometer of GRACE B satellite. It is important therefore to understand that the nominal gap of 11 months between GRACE and GRACE-FO is rather longer as the later models of GRACE are less accurate, particularly the last 3 epochs show anomalous behavior. In the following section, i.e. the cases studies, the less accurate periods of GRACE are indicated.

RESULTS OF RESEARCH AND THEIR DISCUSSION

As the shrinking of the Aral Sea yields notable mass loss over large area [*Gaybullaev et al.*, 2012], it should be detected by GRACE and GRACE-FO as well. In order to analyze it, CSR RL06 monthly solutions have been used up to degree and order 60 to determine time series of gravity anomaly for the Aral Sea region. The models have been smoothed with a Gaussian filter of 300 km, and the de-striping filter of Swenson, Wahr [2006] was applied. Then a linear trend on the resulted time series of gravity anomaly has been fit to capture long-term mass variations.

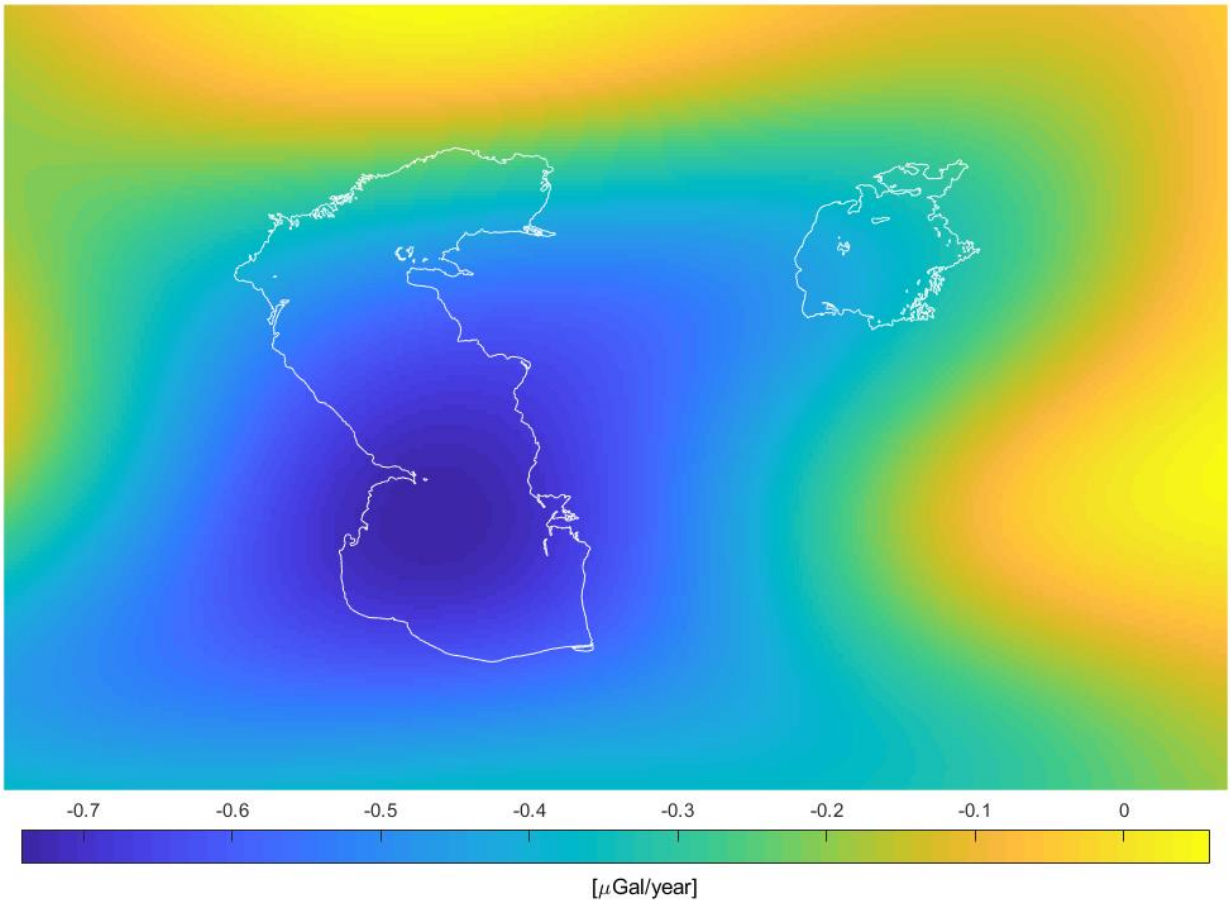


Fig. 1. Linear trend of gravity anomaly in the region of the Aral Sea and the Caspian Sea

Fig. 1 shows the resulted linear trends of gravity anomaly in мGal/year unit for the region covered by meridians of 42 °E and 67 °E longitude, and by parallels of 34 °N and 50 °N latitudes. It is obvious from fig. 1 that analysis of the Aral Sea cannot be done without considering the effect of the nearby Caspian Sea.

The notably larger mass variation of the Caspian Sea is a consequence of its notably larger area: the Caspian Sea has constantly an approximate area of ~371,000 km^2 (without the Kara-Bogaz-Gol Bay) [*Chen et al.*, 2017], while the Aral has been shrunk to an area of ~7,000 km^2 (in 2014) [*Sun, Ma*, 2019] from its original area of ~68,900 km^2. Note that due to the characteristics and the altitude of the GRACE orbit, furthermore due to the unavoidable use of smoothing and de-striping filters, reasonable results can be expected for test area of at least 200.000 km^2 [*Swenson, Wahr*, 2007], thus the area affected by the Aral Sea surface and subsurface water mass variations is just at the edge of the suitable resolution.

In fig. 2 and fig. 3 the annual change of water level and volume is shown based on Hydroweb data [*Cretaux et al.*, 2011]. Note that the used water level and volume variations data are of monthly resolution, annual averages in fig. 2 and fig. 3 are only used for display in order to eliminate seasonal variations to get a clear picture on the tendencies of variations. In fig. 2, the water level data for the Aral Sea is displayed separately for the northern (Small Aral Sea) and the southern reservoirs (Large Aral Sea), where the latter has divided into eastern and western parts around 2010 and is displayed separately from then on. As for the water volume in fig. 3, the water volume of the separated reservoirs of the Aral Sea is added. As for the Caspian Sea, only water level data is available, which has been converted to volume change for fig. 3 by multiplication with the inundation area.

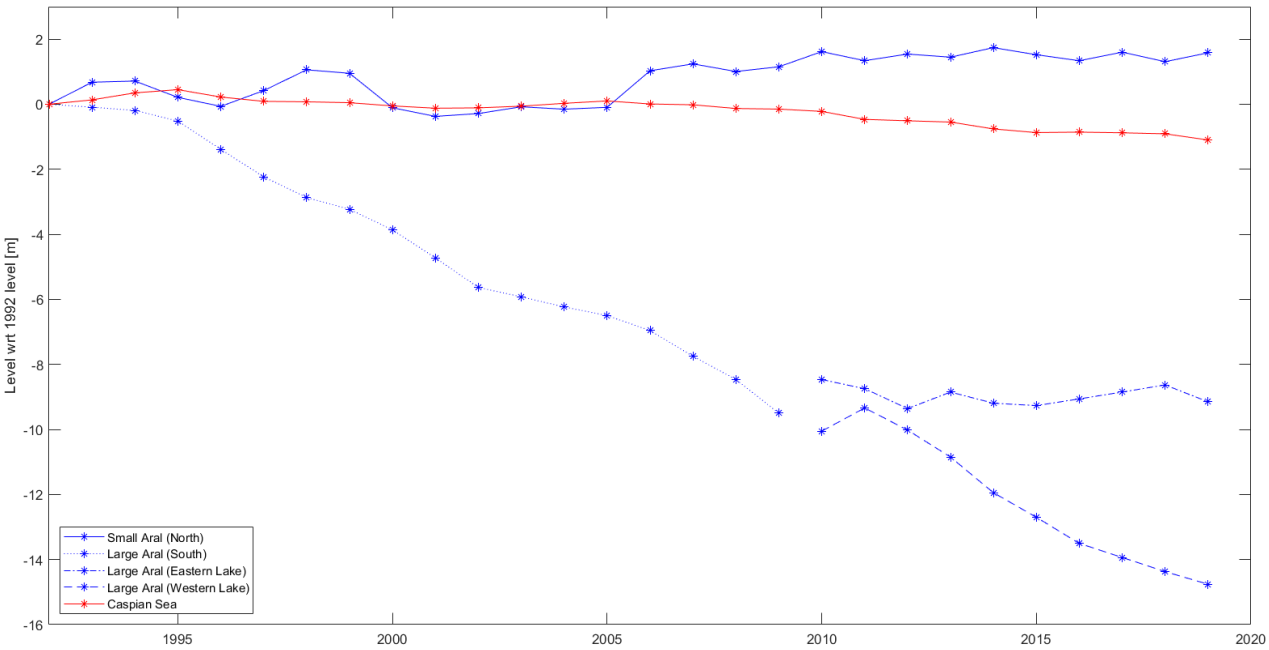


Fig. 2. Annual water level change of the Aral Sea and the Caspian Sea

Even though in the case of the Aral Sea, water level variations occur in the range of 10 cm/year, and that of the Caspian Sea is only in the range of cm/year (fig. 2), the larger area result in larger changes in volume of water (fig. 3). The average sea level change of the Caspian Sea for the 1996−2010 period were estimated by Chen et al. [2017] to be -6.72 cm/year, which is equivalent to volume change of -24.93 km^3/year. It is similar to our estimation, when linear trend of volume change is determined concentrating only on the GRACE era, i.e. 2002−2017. It has

resulted in -25.62 km^3/year and -3.40 km^3/year, respectively for the Caspian Sea and for the Aral Sea (the estimated averages are shown on the figure with dashed lines). According to this estimate, roughly 7.5 times more mass loss is expected in the Caspian Sea, though notable differences may be observed due to salinity and temperature differences of the water bodies.

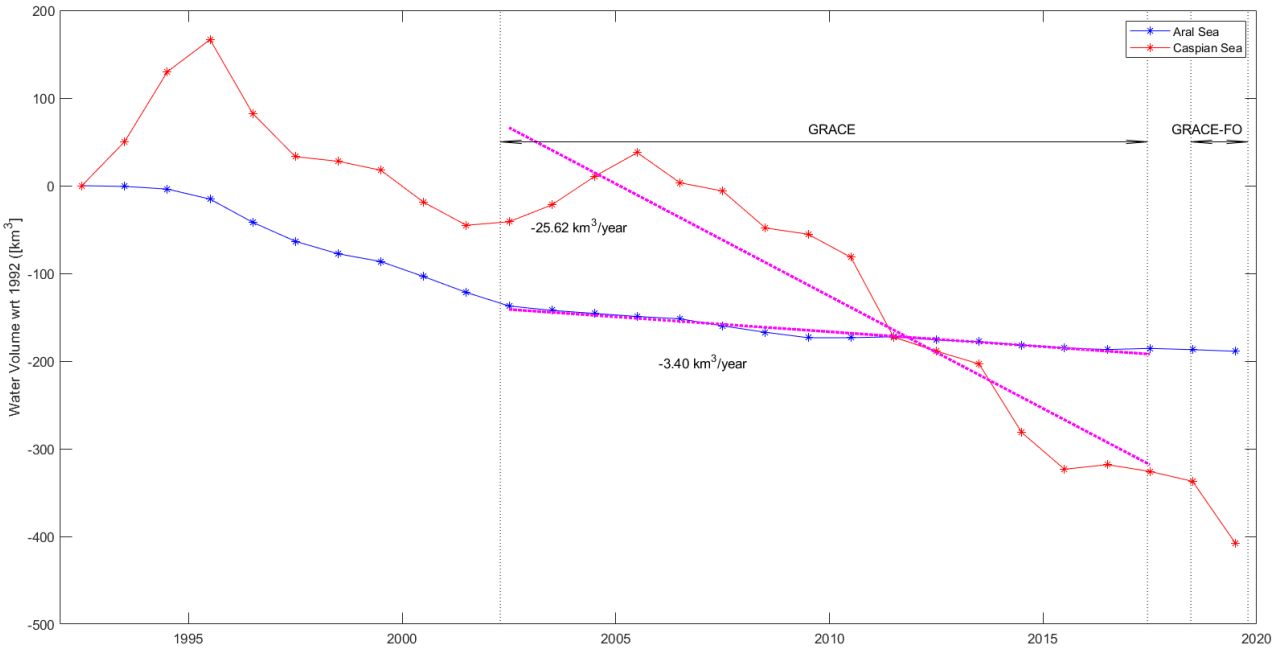


Fig. 3. Annual water volume change of the Aral Sea and the Caspian Sea

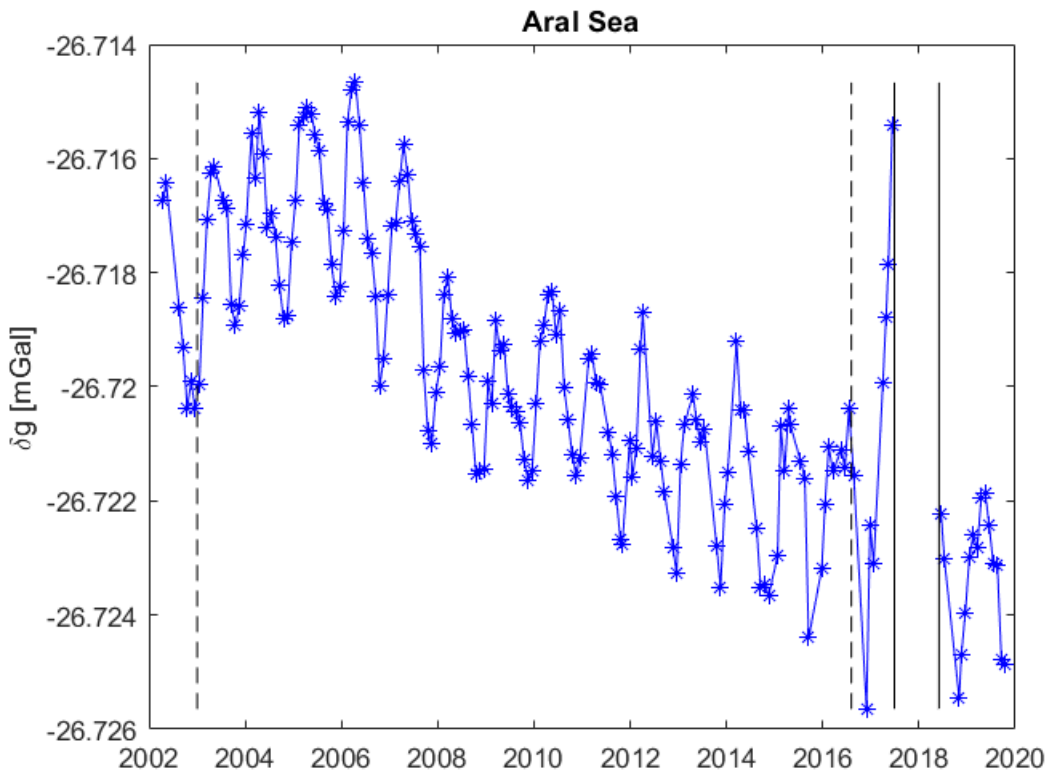


Fig. 4. Time series of gravity anomaly at (60.43 °E, 44.93 °N)

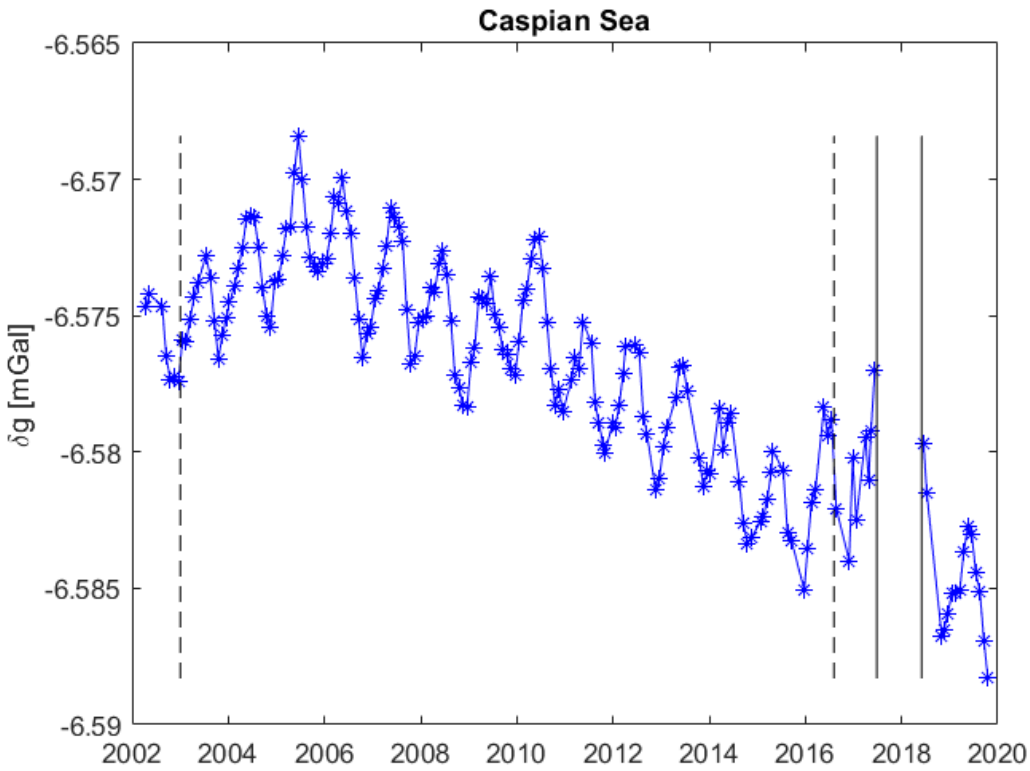


Fig. 5. Time series of gravity anomaly at (50.65 °E, 43.11 °N)

Time series of gravity anomaly at the geometrical centre point of the Aral Sea (at 60.43 °E and 44.93 °N according to the original coastlines [*Lehner, Döll*, 2004]) is shown in fig. 4. Similarly, time series of the gravity anomaly is determined for the Caspian Sea (at 50.65 °E and 43.11 °N) is shown on fig. 5. In both figures the periods of less-reliable GRACE monthly solutions, i.e. in 2002 and from August 2016 until June 2017 (c.f. table 1) is displayed by vertical black dashed lines, while the gap between GRACE and GRACE-FO, i.e. from August 2017 to May 2018 is displayed with vertical black solid lines. Visually it seems that GRACE models for the August 2016 to June 2017 period does not follow the tendencies before, therefore their use is not recommended.

Both fig. 4 and fig. 5 indicate a strong seasonal behavior. In order to see behind the seasonality, an annual signal has been fit and removed, c.f. fig. 6 and fig. 7. These figures should indicate tendencies in the mass variations. In this region relevant mass variations are known to be related to water bodies therefore water volume variations are also visualized (see its y-axis on the right side). Seasonal component of water volume changes has also been removed.

According to fig. 6, in the reservoir of the Aral Sea the correlation between water volume and gravity anomaly was found to be 0.8636, which is particularly strong from 2006. Also is it clear, that water mass variations do not justify the utility of the latest GRACE models (from August 2016 till the end of mission). The correlation with the (radar satellite altimetry derived) water volume change is more convincing than in earlier investigations [*Singh, Seitz*, 2012; *Singh et al.*, 2012], though those studies has been performed for a shorter time span but with a very similar processing method. Note however, that those studies have not observe the differences in the first period of the time series, i.e. until and of 2015. A major difference with these studies is, however, that fig. 7 has been determined point-wisely to the centre of the Aral region, while Singh, Seitz [2012] and Singh et al. [2012] has determined an average areal value for the region bounded by latitudes of 43.5 °N and 47.5 °N and longitudes of 58 °E and 62 °E, thus, such a local deviation may indicate a local phenomenon.

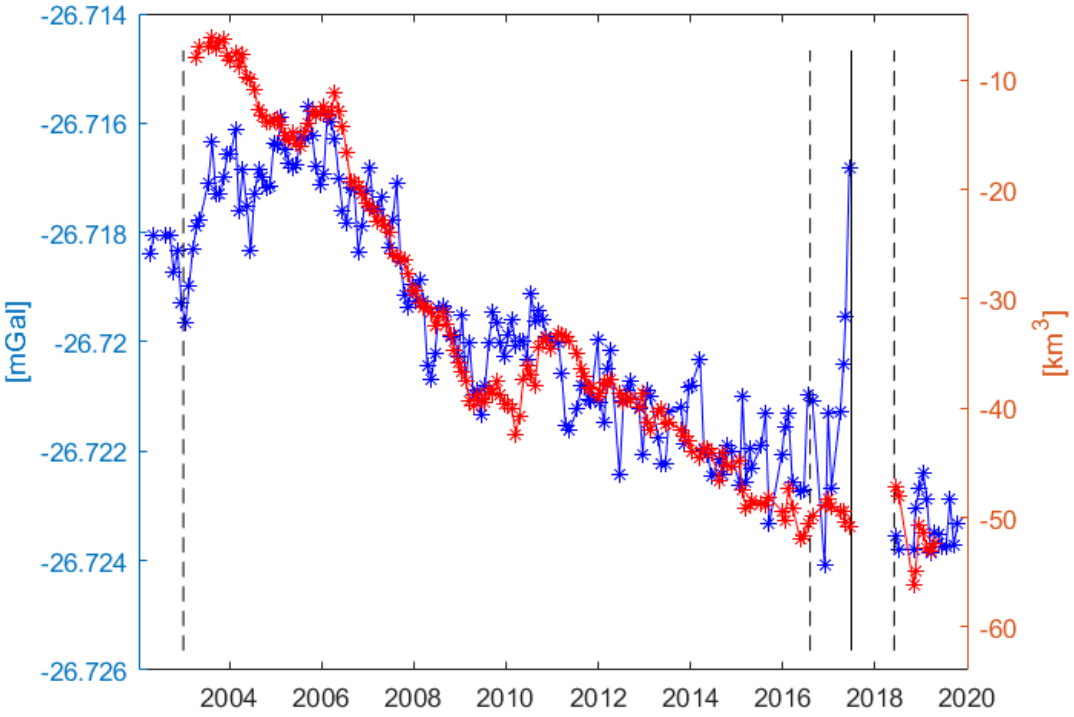


Fig. 6. Time series of gravity anomaly at (60.43 °E, 44.93 °N) vs. water volume change

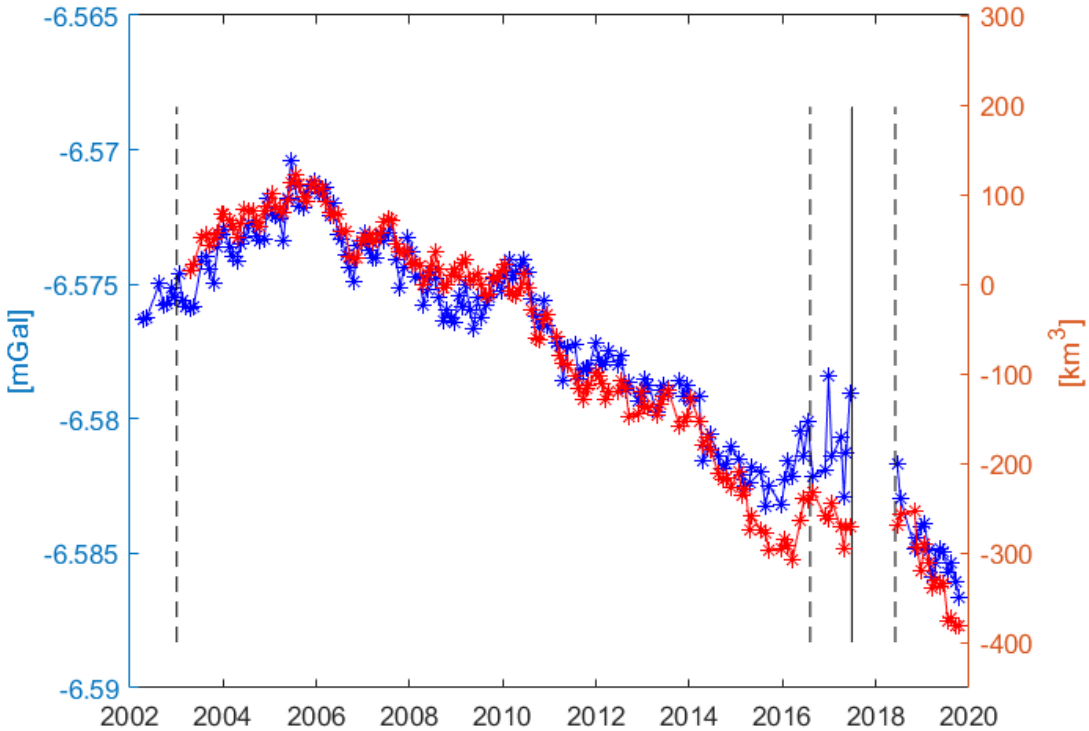


Fig. 7. Time series of gravity anomaly at (50.65 °E, 43.11 °N) vs. water volume change

In case of the Caspian Sea, the tendencies of the water mass variations also properly explain the mass variations (c.f. fig. 7). The correlation for the Caspian Sea is even more convincing: the correlation coefficient was found to be 0.9748.

For both figures, a linear trend has been fit. It is -0.67 μGal/year and -1.15 μGal/year for the Aral Sea and for the Caspian Sea, respectively. So, even though the volume of the water is 7.5 times more in the case of the Caspian Sea, it affects gravity changes only approximately 2 times more for the Caspian Sea than for the Aral Sea.

CONCLUSIONS

This study provides a case-study related consistency investigation of GRACE and GRACE-FO monthly solutions. Indeed, there are obvious inconsistencies of GRACE data, meanwhile the continuation with GRACE-FO should also be smooth, therefore different case studies can contribute on deciding on the joint applicability of the “new” GRACE-FO and the “old” GRACE data. Basically, based on the justified characteristics of the gravity anomaly and of the water volume variations in the case of the Aral Sea, GRACE models for the period March−June 2017 are suggested to be neglected. Also, GRACE-FO models seem to continue the mass variations of the GRACE period properly, therefore their use jointly with GRACE is suggested.

From geophysical aspect, it can be concluded that the main source of mass variation in the Caspian Sea and Aral Sea region is generated by the water mass variations. Also, it became obvious that the mass variations of the Aral Sea cannot be investigated without considering the Caspian Sea as well, since mass variations of the two reservoirs are overlapping.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the DSinGIS project, an Erasmus+ Capacity Building in Higher Education, Key Action 2 project, project No 585718-EPP-1-2017-1-HU-EPPKA2-CBHE-JP.

REFERENCES

1. *Andersen O., Berry P., Freeman J., Lemoine F.G., Luthcke S., Jakobsen K., Butts M.* Satellite altimetry and GRACE gravimetry for studies of annual water storage variations in Bangladesh. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2008. V. 19. P. 47–52. DOI:10.3319/TAO.2008.19.1-2.47(SA).

2. *Bettadpur S.* Gravity recovery and climate experiment level-2 gravity field product user handbook. Center for Space Research at The University of Texas at Austin, 2018. Web resource: https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/grace/docs/L2-UserHandbook_v4.0.pdf (accessed 24.04.2020).

3. *Chambers D.P., Wahr J., Nerem R.S.* Preliminary observations of global ocean mass variations with GRACE. Geophysical Research Letters, 2004. V. 31. L13310. 4 p. DOI:10.1029/2004GL020461.

4. *Chen J.L., Pekker T., Wilson C.R., Tapley B.D., Kostianoy A.G., Cretaux J.-F., Safarov E.S.* Long-term Caspian Sea level change. Geophysical Research Letters, 2017. V. 44. P. 6993–7001. DOI:10.1002/2017GL073958.

5. *Chen J., Tapley B., Seo K.-W., Wilson C., Ries J.* Improved quantification of global mean ocean mass change using GRACE satellite gravimetry measurements. Geophysical Research Letters, 2019. V. 46. P. 13984–13991. DOI: https://doi.org/10.1029/2019GL085519.

6. *Cretaux J-F., Jelinski W., Calmant S., Kouraev A., Vuglinski V., Bergé-Nguyen M., Gennero M.C., Nino F., Abarca Del Rio R., Cazenave A., Maisongrande P.* SOLS: a lake database to monitor in the near real time water level and storage variations from remote sensing data. Advances in Space Research, 2011. V. 47. P. 1497–1507.

7. *Crippa B., Sanso F.* A quick look on the sea surface topography of the Mediterranean from the Geomed geoid and the ERS 1 geodetic mission. Proceedings of the International Centre for

Mechanical Sciences Workshop on Data Acquisition and Analysis for Multimedia GIS. New York: Springer-Verlag, 1996. P. 237–247.
8. *Földváry L.* Mass change acceleration in Antarctica from GRACE monthly gravity field solutions. Geodesy for Planet Earth, Proceedings of IAG Symposium in Buenos Aires. IAG Symposia Series. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. V. 131. P. 591–597.
9. *Földváry L., Kemény M., Huang X.Z.* First results of implementing satellite-borne gravity data to GIS and future perspectives. 10th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas – AIS2015. Székesfehérvár, 2015. Paper P03.
10. *Gaybullaev B., Chen S.C., Gaybullaev D.* Changes in water volume of the Aral Sea after 1960. Applied Water Science, 2012. V. 2. P. 285−291. DOI: https://doi.org/10.1007/s13201-012-0048-z.
11. *Hinze W.J., Aiken C., Brozena J., Coakley B., Dater D., Guy Flanagan G., Forsberg R., Hildenbrand T., Keller R.G., Kellogg J., Kucks R., Lee X., Mainville A., Morin R., Pilkington M., Plouff D., Ravat D., Roman D., Urrutia-Fucugauchi J., Véronneau M., Webring M., Winester D.* New standards for reducing gravity data: the North American gravity database. Geophysics, 2005. V. 70. P. J25 – J32.
12. *Hobbs S.F., Kimbell S.F., Coats J.S., Fortey N.J.* BGS databases for mineral exploration: status in 2000. BGS Research Report RR/00/11. DTI Minerals Programme Publication No 6. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey, 2000. 37 p.
13. *Ilk K.H., Flury J., Rummel R., Schwintzer P., Bosch W., Haas C., Schröter J., Stammer D., Zahel W., Miller H., Dietrich R., Huybrechts P., Schmeling H., Wolf D., Götze H.J., Riegger J., Bardossy A., Günter A., Gruber Th.* Mass transport and mass distribution in the Earth system. Contributions of the new generation of satellite gravity and altimetry missions to the Geosciences. Proposal for a German priority research program, 2nd edition. München, Potsdam: GOCE-Projektbüro Deutschland, Techn. Univ. München, GeoForschungsZentrum Potsdam, München, Potsdam, 2005. 136 p.
14. *Kiss A., Földváry L.* Seasonal hydrologic variations in the La Plata basin from GRACE gravity field models. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 2017 (a). V. 14. No 2. P. 145–152.
15. *Kiss A., Földváry L.* Uncertainty of GRACE-borne long periodic and secular ice mass variations in Antarctica. Acta Geodaetica et Geophysica, 2017 (b). V. 52. No 4. P. 497–510.
16. *Lehner B., Döll P.* Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. Journal of Hydrology, 2004. V. 296. No 1–4. P. 1–22.
17. *Maslov I.A.* The use of gravity for GIS data sets optimization. ISPRS Archives, 1996. V. XXXI. Part B3. P. 511–516.
18. *Shum C.K., Kuo C., Guo J.* Role of Antarctic ice mass balances in present-day sea level change. Polar Science, 2008. No 2. P. 149–161. DOI: 10.1016/j.polar.2008.05.004.
19. *Singh A., Seitz F.* Water storage variations in the Aral Sea from multi-sensor satellite data in comparison with results from GRACE gravimetry. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich: IEEE, 2012. P. 3042–3045. DOI: 10.1109/ IGARSS.2012.6350784.
20. *Singh A., Seitz F., Schwatke C.* Inter-annual water storage changes in the Aral Sea from multimission satellite altimetry, optical remote sensing, and GRACE satellite gravimetry. Remote Sensing of Environment, 2012. V. 123. P. 187−195.
21. *Sun F., Ma R.* Hydrologic changes of Aral Sea: a reveal by the combination of radar altimeter data and optical images. Annals of GIS, 2019. V. 25. No 3. P. 247–261. DOI: 10.1080/ 19475683.2019.1626909.
22. *Swenson S., Wahr J.* Post-processing removal of correlated errors in GRACE data. Geophysical Research Letters, 2006. V. 33. Iss. 8. L08402. 4 p. DOI: https://doi.org/10.1029/ 2005GL025285.

23. *Swenson S., Wahr J.* Multi-sensor analysis of water storage variations of the Caspian Sea. Geophysical Research Letters, 2007. V. 34. Iss. 16. 5 p. L16401. DOI:10.1029/2007GL030733.
24. *Tracey R., Nakamura A.* Complete Bouguer anomalies for the Australian National Gravity Database. ASEG Extended Abstracts, 2010. V. 1. P. 1–3.
25. *Wahr J., Schubert G.* Treatise on Geophysics. Time-Variable Gravity from Satellites. 1st edition. Oxford, Elsevier Ltd., 2007. P. 213–218.
26. *Wang C.X., Zhang M.H.* Co-development of MapInfo and Surfer in regional gravity information system. Geophysical and Geochemical Exploration, 2008. V. 32. No 4. P. 445–447.
27. *Wang L., Khan S.A., Bevis M., van den Broeke M.R., Kaban M.K., Thomas M., Chen C.* Downscaling GRACE predictions of the crustal response to the present-day mass changes in Greenland. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2019. V. 124. P. 5134–5152. DOI: https://doi.org/10.1029/2018JB016883.
28. *Yuan D.N.* GRACE Follow-On level-2 gravity field product user handbook. Jet Propulsion Laboratory. JPL D–103922, 2019. Web resource: https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/gracefo/docs/GRACE-FO_L2-UserHandbook_v1.0.pdf (accessed 24.04.2020).
29. *Zhang M.H., He H., Wang C.X.* The launch of a large regional gravity information system in China. Applied Geophysics, 2011. V. 8. No 2. P. 170–175.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Пьянков С.В., Абдуллин Р.К., Шихов А.Н., Семакина А.В.
Картографический веб-сервис мониторинга снежного покрова и опасных гидрологических явлений в бассейне р. Камы: особенности создания и информационного наполнения 5

Вендина О.И., Панин А.Н.
Контактность и конфликтность города: геоинформационный мониторинг и управление этнокультурным разнообразием 20

Ивлиева Н.Г., Манухов В.Ф., Алферина А.В.
Картографо-геоинформационное обеспечение почвенных и агрохимических исследований (на примере отдельного сельскохозяйственного предприятия) 41

Нарожняя А.Г., Чендев Ю.Г.
Изучение современного экологического состояния лесных полос с использованием ГИС и ДДЗ 54

Ахметова Г.В., Токарев П.Н.
Использование ГИС-технологий для идентификации болотных почв при обновлении электронной почвенной карты Карелии 66

Панин А.Н., Эшроков В.М., Махмудов Р.К., Верозуб Н.В.
Геоинформационный анализ агломерации Кавказских Минеральных Вод: градостроительные и функционально-планировочные аспекты 79

Табунщик В.А.
Глубина расчленения рельефа на территории Крымского полуострова 95

Супрунчук И.П., Чихичин В.В., Полян П.М.
Полимасштабный анализ миграционных процессов на юге России с помощью средств геоинформационного мониторинга 106

Маммедов А.А., Мусаев Ш.Д., Пошивайло Я.Г., Федотов Г.С.
Геоинформационное обеспечение геологоразведки месторождений руд цветных металлов 120

Осипов А.Г., Осипов Г.К., Ковязин В.Ф.
Методика геоинформационного моделирования выноса биогенных веществ в Финский залив из лесного растительного покрова 137

Добрякова В.А., Москвина Н.Н., Добряков А.Б., Жегалина Л.Ф., Идрисов И.Р.
Статистика Getis-Ord Gi* для анализа содержания углеводородов в бассейне реки Тромъёган 151

Стогний В.В., Стогний Г.А.
Возможный механизм формирования макрорельефа Верхояно-Колымской орогенной области (на основе анализа геофизических полей) 161

Автаева Т.А., Скрипчинский А.В., Иванов Д.В., Суходольская Р.А.
Моделирование пространственного распределения маркерных видов жужелиц на основе ГИС-технологий 189

Бондаренко Н.А., Любимова Т.В., Стогний В.В.
Интегральная оценка потенциальных геологических рисков Краснодарского края 158

Максимович Н.Г., Березина О.А., Мещерякова О.Ю., Деменев А.Д.
Изучение миграции техногенных донных отложений с применением современных геоинформационных систем 201

Зелепукина Е.С., Гаврилкина С.А., Пряхина Г.В.
Применение ГИС-технологий для выявления потенциальных очагов возникновения опасных гидрологических явлений (на примере гор Южной Сибири) 212

Ткачёва Т.А.
Географический анализ репрезентации образа Северного Кавказа в социальных медиа 224

Akhralov Sh.S., Yusupov R.A., Egamberdiev Kh.M., Jumanov J.J.
Geoinformation technologies and methods of mathematical modeling in hydrogeological research 240

Скрипка Г.И., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А., Филатов А.А., Сапрыгин В.В.
Мониториг опасных береговых процессов Цимлянского водохранилища с использованием ГИС-технологий 253

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Воскресенская Е.В., Воскресенский И.С., Сократов С.А., Сучилин А.А., Шныпарков А.Л., Ушакова Л.А.
Геоморфологические условия формирования опасных оползневых процессов на Западном Кавказе и методы их мониторинга 264

Китов А.Д., Денисенко И.А., Лунина О.В., Гладков А.С., Плюснин В.М., Иванов Е.Н.
Дистанционное и георадарное исследование ледника Радде хребта Мунку-Сардык (Восточный Саян) 275

Рыльский И.А., Ерёмченко Е.Н., Котова Т.В.
Устранение теней от облаков на материалах авиационных съёмок в видимом диапазоне 286

Грищенко М.Ю., Сарычев Е.Ю., Варенцов М.И., Самсонов Т.Е.
Опыт определения площади городской застройки по космическим снимкам для задач метеорологического моделирования (на примере Москвы) 298

Arifjanov A.M., Akmalov Sh.B., Apakhodjaeva T.U., Tojikhodjaeva D.S.
Comparison of pixel to pixel and object-based image analysis with using WorldView-2 satellite images of Yangiobod village of Syrdarya province 313

Исаев В.С., Игнатов Е.И., Новиков А.А., Каширина Е.С., Аманжуров Р.М., Горшков Е.И., Вербовский В.В.
Использование лазерного сканирования для оценки динамики абразионно-оползневых процессов в прибрежной зоне Севастополя 322

Лагута А.А., Погорелов А.В.
Анализ заиления и гидродинамических процессов в деградирующем пойменно-долинном водохранилище (на примере Краснодарского водохранилища) 335

Чымыров А.У., Чонтоев Д.Т., Жакеев Б.М.
Создание цифровых моделей рельефа на основе открытых данных дистанционного зондирования Земли при уточнении границ бассейнов рек в котловине озера Иссык-Куль 349

Алиев Р.Г., Медведков А.А.
Анализ климатогенной динамики Батагайского термоденудационного «кратера» с использованием данных дистанционного зондирования 366

Mukhamedjanov I.D., Konstantinova A.M., Uvarov I.A.
Capabilities of the “IKI-Monitoring” Center for collective use in organizing the satellite monitoring of the Central Asian Region 376

Мишвелов Е.Г., Кривошеев А.Н., Бакуменко И.А.
Эволюция геоэкологического состояния Отказненского водохранилища Ставропольского края 384

Литинский П.Ю.
Анализ динамики антропогенных изменений экосистем водосбора р. Кемь (бассейн Белого моря) с использованием данных Global Forest Change 396

Антонов С.А.
Анализ пространственного положения защитных лесных насаждений на основе геоинформационных технологий и данных дистанционного зондирования Земли 408

Gonuguntla H., Abdivaitov Kh.A., Mahalingam B., Rakhmataliev M.E.
A comparison of Sentinel-1 and Sentinel-2 in assessing flooded area and built-up land use: A case study of selected coastal districts in Andra Pradesh, India 421

Sichugova L.V., Fazilova D.Sh.
Structural interpretation of lineaments using satellite image processing: A case study in the vicinity of the Charvak reservoir 436

Földváry L., Statov V., Mamutov N.
Applicability of GRACE and GRACE-FO for monitoring water mass changes of the Aral Sea and the Caspian Sea 443

CONTENTS[1]

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

Pyankov S.V., Abdullin R.K., Shikhov A.N., Semakina A.V.
Circular economy and sustainable development in the EU — some aspects and trends
Online web map service for monitoring of snow cover and hazardous hydrological events in the Kama river basin: the features of development and content — 5 (6)

Vendina O.I., Panin A.N.
Urban contacts and conflicts: the GIS-monitoring and management of ethnocultural diversity — 20 (21)

Ivlieva N.G., Manukhov V.F., Alferina A.V.
Cartography-geoinformation support of soil and agrochemical researches (on the example of a separate agricultural enterprise) — 41 (42)

Narozhnyaya A.G., Chendev Yu.G.
The study of the modern ecological state of shelterbelts using GIS and remote sensing data — 54 (55)

Akhmetova G.V., Tokarev P.N.
GIS technology application for identification of peat bog soils for updating the digital soil map of Karelia — 66 (67)

Panin A.N., Eshrokov V.M., Makhmudov R.K., Verozub N.V.
Geoinformation analysis of agglomeration of the Caucasian Mineral Waters: architectural and functional planning aspects — 79 (80)

Tabunshchik V.A.
Depth of the relief dissection on the territory of the Crimean Peninsula — 95

Suprunchuk I.P., Chikhichin V.V., Polyan P.M.
Multi-scale analysis of migration processes in the South of Russia using geoinformation monitoring tools — 106 (107)

[1] The page number in brackets corresponds to the English text

Mammedov A.A., Musaev Sh.D., Poshivaylo Ya.G., Fedotov G.S.
GI support of geological exploration of non-ferrous metal ore deposits 120 (121)

Osipov A.G., Osipov G.K., Kovyazin V.F.
Methods of GI modeling of biogenic substances removal to the Gulf of Finland from forest vegetation cover 137 (138)

Dobryakova V.A., Moskvina N.N., Dobryakov A.B., Zhegalina L.F., Idrisov I.R.
Getis-Ord Gi* statistics for hydrocarbons content analysis in the Tromjegan river basin 151 (152)

Stogny V.V., Stogny G.A.
Possible mechanism for forming microrelief of Verkhoyansk-Kolyma orogenic region (based on the analysis of geophysical fields) 161

Avtaeva T.A., Skripchinsky A.V., Ivanov D.V., Sukhodolskaya R.A.
Modeling the spatial distribution of marker species of ground beetles based on GIS technologies 172 (173)

Bondarenko N.A., Lyubimova T.V., Stogny V.V.
Integrated assessment of potential geological risks in the Krasnodar region 189 (190)

Maksimovich N.G., Berezina O.A., Meshcheriakova O.Yu., Demenev A.D.
Research of migration of technogenic bottom sediments with application of modern geoinformation systems 201 (202)

Zelepukina E.S., Gavrilkina S.A., Pryakhina G.V.
An application of GIS technologies for identifying the potential foci of occurrence of hazardous hydrological phenomena (by the example of mountains of Southern Siberia) 212 (213)

Tkacheva T.A.
Geographical analysis of the representation of the image of the North Caucasus in social media 224

Akhralov Sh.S., Yusupov R.A., Egamberdiev Kh.M., Jumanov J.J.
Geoinformation technologies and methods of mathematical modeling in hydrogeological research 240

Skripka G.I., Ivlieva O.V., Bespalova L.A., Filatov A.A., Saprygin V.V.
Monitoring of dangerous shore processes of Tsimlyansk Reservoir using GIS-technologies 253 (254)

REMOTE METHODS IN EARTH RESEARCH

Voskresenskaya E.V., Voskresensky I.S., Sokratov S.A., Suchilin A.A., Shnyparkov A.L., Ushakova L.A.
Geomorphological conditions of formation of landslides hazards in the Western Caucasus and methods of their monitoring 264 (265)

Kitov A.D., Denisenko I.A., Lunina O.V., Gladkov A.S., Plyusnin V.M., Ivanov E.N.
Remote sensing and GPR study of the Raddle glacier of the Ridge Munku-Sardyk (the East Sayan) 275 (276)

Rylskiy I.A., Eremchenko E.N., Kotova T.V.
Elimination of cloud shadows on materials of aviation shooting in the visible range 286 (287)

Grischenko M.Yu., Sarychev E.Yu., Varentsov M.I., Samsonov T.E.
Experience in the determining the building area using satellite images for the purposes of meteorological modeling (case of Moscow city) 298 (299)

Arifjanov A.M., Akmalov Sh.B., Apakhodjaeva T.U., Tojikhodjaeva D.S.
Comparison of pixel to pixel and object-based image analysis with using WorldView-2 satellite images of Yangiobod village of Syrdarya province 313

Isaev V.S., Ignatov E.I., Novikov A.A., Kashirina E.S., Amanzhurov R.M., Gorshkov E.I., Verbovsky V.V.
Use of laser scanning to estimate dynamics of abrasive-landslide processes in coastal zone of Sevastopol 322 (323)

Laguta A.A., Pogorelov A.V.
Analysis of silting and hydrodynamic processes in the degrading floodplain-valley reservoir (on the example of the Krasnodar Reservoir) 335 (336)

Chymyrov A.U., Chontoev D.T., Zhakeev B.M.
Creation of the digital relief models based on open remote sensing data for improvement the borders of river basins in the Issyk-Kul Lake cavity 349 (350)

Aliev R.G., Medvedkov A.A.
Analysis of the climatogenic dynamics of the Batagay thermodenudation “crater” using remote sensing data 366 (367)

Mukhamedjanov I.D., Konstantinova A.M., Uvarov I.A.
Capabilities of the “IKI-Monitoring” Center for collective use in organizing the satellite monitoring of the Central Asian Region 376

Mishvelov Eu.G., Krivosheev A.N., Bakumenko I.A.
Evolution of the geoecological state of the Otkaznensky Reservoir in the Stavropol Territory 384 (385)

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 396

Antonov S.A.
Spatial analysis of protective forest plantations based on geographic information technologies and remote sensing data 408 (409)

Gonuguntla H., Abdivaitov Kh.A., Mahalingam B., Rakhmataliev M.E.
A comparison of Sentinel-1 and Sentinel-2 in assessing flooded area and built-up land use: A case study of selected coastal districts in Andra Pradesh, India 421

Sichugova L.V., Fazilova D.Sh.
Structural interpretation of lineaments using satellite image processing: A case study in the vicinity of the Charvak reservoir 436

Földváry L., Statov V., Mamutov N.
Applicability of GRACE and GRACE-FO for monitoring water mass changes of the Aral Sea and the Caspian Sea 443

СЕРИЯ КОНФЕРЕНЦИЙ ИНТЕРКАРТО. ИНТЕРГИС

ИнтерКарто 1 — Москва, 23–25 мая 1994 г.
ИнтерКарто 2 — Иркутск, 26–29 июня 1996 г.
ИнтерКарто 3 — Новосибирск, 27–31 января 1997 г.
ИнтерКарто 4 — Барнаул, 1–4 июля 1998 г.
ИнтерКарто 5 — Якутск, 17–19 июня 1999 г.
ИнтерКарто 6 — Апатиты, Мурманской обл., 22–24 августа 2000 г.
ИнтерКарто 7 — Петропавловск-Камчатский, 30 июля – 1 августа 2001 г.
ИнтерКарто 8 — Хельсинки (Финляндия), Санкт-Петербург, 28 мая – 1 июня 2002 г.
ИнтерКарто 9 — Новороссийск, Севастополь (Украина), 25–29 июня 2003 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 10 — Владивосток, Чанчунь (Китай), 12–19 июля 2004 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 11 — Ставрополь, Домбай, Будапешт (Венгрия), 25 сентября – 3 октября 2005 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 12 — Калининград, Берлин (Германия), 25–31 августа 2006 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 13 — Ханты-Мансийск, Йеллоунайф (Канада), 12–24 августа 2007 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 14 — Саратов, Урумчи (Китай), 24 июня – 1 июля 2008 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 15 — Пермь, Гент (Бельгия), 29 июня – 5 июля 2009 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 16 — Ростов-на-Дону, Зальцбург (Австрия), 3–8 июля 2010 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 17 — Белокуриха, Алтайский край, Денпасар (Индонезия), 14–19 декабря 2011 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 18 — Смоленск, Сен-Дье-де-Вож (Франция), 26 июня – 4 июля 2012 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 19 — Курск, Богота (Колумбия), 2–7 февраля 2013 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 20 — Белгород, Харьков (Украина), Кигали (Руанда), Найроби (Кения), 23 июля – 6 августа 2014 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 21 — Краснодар, Сочи, Сува (Фиджи), 12–19 ноября 2015 г.,
ИнтерКарто. ИнтерГИС 22 — Веллингтон (Новая Зеландия), Мельбурн (Австралия), Протвино (Московская обл.), 31 августа – 14 сентября 2016 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 23 — Южно-Сахалинск, Сеул (Республика Корея), Вашингтон (США), 26 июня – 7 июля 2017 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 24 — Петрозаводск (Республика Карелия), 19–22 июля, Бонн (Германия), 24–28 июля, Анкоридж (США), 30 июля – 1 августа 2018 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 25 — Мурманск, 30 января – 2 февраля, Токио (Япония), 20 июля 2019 г.
ИнтерКарто. ИнтерГИС 26 — Ташкент (Узбекистан), 1–2 июня, Пятигорск, Тбилиси (Грузия), 24–29 сентября 2020 г.

INTERCARTO. INTERGIS CONFERENCE SERIES

InterCarto 1 — Moscow, May 23–25, 1994
InterCarto 2 — Irkutsk, June 26–29, 1996
InterCarto 3 — Novosibirsk, January 27–31, 1997
InterCarto 4 — Barnaul, July 1–4, 1998
InterCarto 5 — Yakutsk, June 17–19, 1999
InterCarto 6 — Apatity, Murmansk Province, August 22–24, 2000
InterCarto 7 — Petropavlovsk-Kamchatsky, July 30 – August 1, 2001
InterCarto 8 — Helsinki (Finland), St.-Petersburg, May 28 – June 1, 2002
InterCarto 9 — Novorossijsk, Sevastopol (Ukraine), June 25–29, 2003
InterCarto. InterGIS 10 — Vladivostok, Changchun (China), July 12–19, 2004
InterCarto. InterGIS 11 — Stavropol, Dombai, Budapest (Hungary), September 25 – October 3, 2005
InterCarto. InterGIS 12 — Kaliningrad, Berlin (Germany), August 25–31, 2006
InterCarto. InterGIS 13 — Khanty-Mansiysk, Yellowknife (Canada), August 12–24, 2007
InterCarto. InterGIS 14 — Saratov, Urumqi (China), June 24 – July 1, 2008
InterCarto. InterGIS 15 — Perm, Ghent (Belgium), June 29 – July 5, 2009
InterCarto. InterGIS 16 — Rostov-on-Don, Salzburg (Austria), July 3–8, 2010
InterCarto. InterGIS 17 — Belokurikha, Altaysky Kray, Denpasar (Indonesia), December 14–19, 2011
InterCarto. InterGIS 18 — Smolensk, St. Die des Vosges (France), June 26 – July 4, 2012
InterCarto. InterGIS 19 — Kursk, Bogota (Colombia), February 2–8, 2013
InterCarto. InterGIS 20 — Belgorod, Kharkov (Ukraine), Kigali (Rwanda), Nairobi (Kenya), July 23 – August 6, 2014
InterCarto. InterGIS 21 — Krasnodar, Sochi, Suva (Fiji), November 12–19, 2015
InterCarto. InterGIS 22 — Wellington (New Zealand), Melbourne (Australia), Protvino, Moscow Region, August 31 – September 14, 2016
InterCarto. InterGIS 23 — Yuzhno-Sakhalinsk, Seoul (Republic of Korea), Washington DC (USA), June 26 – July 7, 2017
InterCarto. InterGIS 24 — Petrozavodsk (Republic of Karelia), July 19–22, Bonn (Germany), July 24–28, Anchorage (USA), July 30 – August 1, 2018
InterCarto. InterGIS 25 — Murmansk, January 30 – February 2, Tokyo (Japan), July 20, 2019
InterCarto. InterGIS 26 — Tashkent (Uzbekistan), 1–2 June, Pyatigorsk, Tbilisi (Georgia), September 24–29, 2020

ИнтерКарто. ИнтерГИС

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ

Материалы Международной конференции
Ташкент (Узбекистан),
1–2 июня,
Пятигорск (Россия),
24–26 сентября,
Тбилиси (Грузия),
28–29 сентября 2020 г.

ТОМ 26

ЧАСТЬ 2

Руководитель проекта *О.В. Гаврилов*
Оформление обложки *К.В. Саутенков*
Корректоры *В.Ю. Баловнев, О.И. Маркова*
Компьютерная вёрстка *О.И. Маркова*

Подписано в печать 27.07.2020. Формат 60x90/8.
Усл. печ. л. 58,0. Уч.-изд. л. 51,0. Изд. № 11625

Издательство Московского университета
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 15 (ул. Академика Хохлова, 11)
Тел.: (495) 939-32-91; e-mail: secretary@msupress.com
Отдел реализации. Тел.: (495) 939-33-23; e-mail: zakaz@msupress.com
Сайт Издательства Московского университета: http://msupress.com