



БелГУ
Белгородский
государственный
национальный
исследовательский
университет

ISSN 2712-7443 (online)



РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОСИСТЕМЫ

REGIONAL GEOSYSTEMS

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

2026. Том 50, № 3



РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОСИСТЕМЫ

2026. Том 50, № 3

До 2020 г. журнал издавался под названием «Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки».

Основан в 1995 г.

Журнал включен в Перечень ВАК рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (25.00.00 – науки о Земле). Журнал зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет».

Издатель: НИУ «БелГУ».

Адрес издателя: 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор

Лисецкий Ф.Н., доктор географических наук, профессор кафедры природопользования и земельного кадастра института наук о Земле (НИУ «БелГУ», Белгород, Россия)

Ведущий редактор

Голеусов П.В., доктор географических наук, профессор кафедры природопользования и земельного кадастра института наук о Земле (НИУ «БелГУ», Белгород, Россия)

Ответственный секретарь

Зеленская Е.Я., кандидат географических наук, инженер Федерально-регионального центра аэрокосмического и наземного мониторинга объектов и природных ресурсов (НИУ «БелГУ», Белгород, Россия)

Редактор англоязычных текстов

Данилова Е.С., кандидат филологических наук, доцент, доцент кафедры английской филологии и межкультурной коммуникации (НИУ «БелГУ», Белгород, Россия)

Члены редколлегии:

Витченко А.Н., доктор географических наук, профессор Белорусского государственного университета (Минск, Республика Беларусь)

Геннадиев А.Н., доктор географических наук, профессор МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия)

Тишков А.А., чл.-корр. РАН, доктор географических наук, профессор Института географии РАН (Москва, Россия)

Ермолаев О.П., доктор географических наук, профессор Казанского федерального университета (Казань, Россия)
(по согласованию)

Куrolap C.A., доктор географических наук, профессор Воронежского государственного университета (Воронеж, Россия)

Луто Э.Р., доктор, профессор Университета Миссури (Колумбия, США)

Ямашкин А.А., доктор географических наук, профессор, директор Института геоинформационных технологий и географии национального исследовательского Мордовского государственного университета (Саранск, Россия)

Хаустов В.В., доктор геолого-минералогических наук, профессор Юго-Западного государственного университета (Курск, Россия)

Хуббарт Дж. А., доктор, профессор Университета Западной Вирджинии (Моргантаун, США)

Чантурия Е.Л., доктор технических наук, профессор НИТУ «МИСиС» (Москва, Россия)

Чендев Ю.Г., доктор географических наук, профессор кафедры природопользования и земельного кадастра института наук о Земле НИУ «БелГУ» (Белгород, Россия)

ISSN 2712-7443 (online)

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77-77841 от 31.01.2020. Выходит 4 раза в год. Дата выхода 30.09.2026.

СОДЕРЖАНИЕ

Структура и функционирование региональных геосистем

- 468 **Ильина А.А., Никонорова И.В.**
Суффозия и подтопления как пример экзодинамических процессов в пределах Чебоксарского городского округа
- 478 **Плотников И.В., Максимова Д.А., Титов А.С., Сторожук В.Б.**
Определение пространственной структуры обилия копытных национального парка «Земля леопарда» по данным фотомониторинга
- 494 **Архипов Е.А., Зотов С.И., Королева Ю.В., Яковчук Т.А.**
Оценка гидрохимического загрязнения малых водотоков урбанизированных территорий Калининградской области
- 507 **Вендина Т.Н., Белоусова Л.И., Киреева-Гененко И.А., Юдина Ю.В.**
Комплексная оценка рисков природопользования в Белгородской области с учётом ведущих экзогенных процессов
- 527 **Прождорина Т.И., Клепиков О.В., Куролап С.А., Суханов П.А., Боева А.С.**
Оценка экологического состояния Воронежского водохранилища по результатам мониторинга индекса загрязнённости воды
- 538 **Полякова А.Р., Мухарамова С.С., Ермолаев О.П., Савельев А.А.**
Оценка эрозионного потенциала осадков для азиатской части России
- 555 **Чендев Ю.Г., Геннадиев А.Н., Смирнова М.А., Талджеббини А., Юй С.**
Параметры ареалов и карбонатных профилей эталонно-значимых чернозёмов выщелоченных и типичных на юге Среднерусской возвышенности
- 573 **Украинский П.А., Нарожня А.Г., Хомутовская А.Г.**
Геоморфометрические факторы размещения истоков рек Белгородской области

Методология исследования геосистем

- 591 **Гусев А.П.**
Целевой эколого-геофизический комплекс диагностики загрязнения геологической среды в техногенных ландшафтах
- 604 **Блануца В.И.**
Телекоммуникационная связанность российских регионов: оценка с помощью геопространственного искусственного интеллекта
- 619 **Попова Д.Н., Левина С.Н., Пестрякова Л.А., Рудая Н.А.**
Лимнологические исследования озёр Республики Алтай с использованием диатомового метода
- 634 **Рахуба А.В., Шмакова М.В.**
Моделирование вторичного загрязнения марганцем Куйбышевского водохранилища
- 646 **Терехин Э.А.**
Распознавание лесного покрова залежных земель Среднерусской лесостепи на основе различных видов спутниковых данных

Социально-экономические компоненты геосистем

- 659 **Шульгина О.В., Ямамура Д.Н.**
Аспекты исследования территории Москвы в контексте образовательной геоурбанистики
- 681 **Калихман Т.П., Калихман А.Д.**
Усолье-Сибирское: экологические проблемы и пути развития
- 694 **Сарафанов А.А., Сарафанова А.Г.**
Ювелирный туризм: дестинации России и мира
- 707 **Мафратоглу М.**
Пространственная логистика в системе общественной географии: теоретические основания

REGIONAL GEOSYSTEMS

2026. Volume 50, No. 3

Until 2020, the journal was published with the name "Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences".

Founded in 1995

The journal is included into the List of Higher Attestation Commission of peer-reviewed scientific publications where the main scientific results of dissertations for obtaining scientific degrees of a Candidate and Doctor of Science should be published (25.00.00 – Earth Sciences). The journal is included into Russian Science Citation Index (PIHL).

Founder: Federal state autonomous educational institution of higher education "Belgorod State National Research University".

Publisher: Belgorod State National Research University "BelSU".

Address of publisher: 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia.

EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL

Editor-in-Chief

Fedor N. Lisetskii, Doctor of Geographical Sciences, Professor (Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia)

Commissioning Editor

Pavel V. Goleusov, Doctor of Geographical Sciences, Professor (Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia)

Executive Secretary

Evgeniya Ya. Zelenskaya, Candidate of Geographical Sciences (Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia)

English text editor

Elena S. Danilova, Candidate of Philological Sciences, Associate Professor (Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia)

Members of the Editorial Board:

Aleksandr N. Vitchanka, Doctor of Geographical Sciences, Professor (Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus)

Aleksandr N. Gennadiyev, Doctor of Geographical Sciences, Professor (Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia)

Arkadiy A. Tishkov, Member corr. RAS, Doctor of Geographical Sciences, Professor (Institute of Geography RAS, Moscow, Russia)

Oleg P. Ermolaev, Doctor of Geographical Sciences, Professor (Kazan Federal University, Kazan, Russia)

Semyon A. Kurolap, Doctor of Geographical Sciences, Professor (Voronezh State University, Voronezh, Russia)

Anthony R. Lupo, Doctor, Professor (University of Missouri-Columbia, Columbia, USA)

Anatoliy A. Yamashkin, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Director of the Institute of Geoinformation Technologies and Geography (National Research Mordovian State University, Saransk, Russia)

Vladimir V. Khaustov, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor (Southwestern State University, Kursk, Russia)

Jason A. Hubbart, Doctor (Ph. D), Professor (West Virginia University, Morgantown, USA)

Elena L. Chanturia, Doctor of Technical Sciences, Professor (NUST "MISiS", Moscow, Russia)

Yuriy G. Chendev, Doctor of Geographical Sciences, Professor (Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia)

ISSN 2712-7443 (online)

The journal has been registered at the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor). Mass media registration certificate ЭЛ № ФС 77-77841 dd 31.01.2020. Publication frequency: 4 times per year. Date of publishing 30.09.2026.



CONTENTS

Structure and Functioning of Regional Geosystems

- 468 **Ilyina A.A., Nikonorova I.V.**
Suffusion and Flooding as Examples of Exodynamic Processes in the City of Cheboksary
- 478 **Plotnikov I.V., Maksimova D.A., Titov A.S., Storozhuk V.B.**
Spatial Structure of Ungulates in the *Land of the Leopard* National Park Based on Photomonitoring Data
- 494 **Arkipov E.A., Zotov S.I., Koroleva Yu.V., Yakovchuk T.A.**
Assessing Hydrochemical Pollution of Small Watercourses in Urbanized Areas of the Kaliningrad Region
- 507 **Vendina T.N., Belousova L.I., Kireeva-Genenko I.A., Yudina Yu.V.**
Comprehensive Assessment of Environmental Management Risks in the Belgorod Region Taking into Account Major Exogenous Processes
- 527 **Prozhorina T.I., Klepikov O.V., Kurolap S.A., Sukhanov P.A., Boeva A.S.**
Assessing the Ecological Status of the Voronezh Reservoir Based on the Monitoring of the Water Pollution Index
- 538 **Polyakova A.R., Mukharamova S.S., Yermolaev O.P., Saveliev A.A.**
Estimation of the R-Factor for the Asian Part of Russia
- 555 **Chendev Yu.G., Gennadiev A.N., Smirnova M.A., Taljebbini A., Xiaoyu Yu.**
Parameters of Areas and Carbonate Profiles of Benchmark Leached and Typical Chernozems in the South of the Central Russian Upland
- 573 **Ukrainskiy P.A., Narozhnyaya A.G., Khomutovskaya A.G.**
Geomorphometric Factors of the Location of River Sources in the Belgorod Region

Methodology of Geosystems Research

- 591 **Gusev A.P.**
Task-Specific Ecological-Geophysical Complex for Diagnosing Pollution of the Geological Environment in Technogenic Landscapes
- 604 **Blanutsa V.I.**
Telecommunications Connectivity of Russian Regions: Assessment Using Geospatial Artificial Intelligence
- 619 **Popova D.N., Levina S.N., Pestryakova L.A., Rudaya N.A.**
Limnological Studies of Lakes in the Altai Republic Using the Diatom Method
- 634 **Rakhuba A.V., Shmakova M.V.**
Modeling of Secondary Manganese Pollution in the Kuibyshev Reservoir
- 646 **Terekhin E.A.**
Identifying the Forest Cover of Abandoned Agricultural Lands in the Central Russian Forest-Steppe Using Various Types of Satellite Data

Socio-Economic Components of Geosystems

- 659 **Shulgina O.V., Yamamura D.N.**
Aspects of Research into the Territory of Moscow in the Context of Educational Geourbanistics
- 681 **Kalikhman T.P., Kalikhman A.D.**
Usolye-Sibirskoye: Environmental Issues and Development Paths
- 694 **Sarafanov A.A., Sarafanova A.G.**
Jewelry Tourism: Destinations in Russia and Worldwide
- 707 **Mafratoglu M.**
Spatial Logistics in the System of Human Geography: Theoretical Foundations



ОТ РЕДАКТОРА

Уважаемые читатели и авторы журнала!

В 2026 году Белгородский государственный национальный исследовательский университет (НИУ «БелГУ») отмечает юбилей под девизом «От учительского института к национальному исследовательскому университету. 150 лет развития, открытий и созидания».

Среди 20 научных журналов, учредителем которых выступил НИУ «БелГУ», журнал «Региональные геосистемы» седьмой год демонстрирует динамичное развитие – при поддержке университета, наших авторов и читателей.

В своей предыстории под названием «Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки» (на протяжении 24 лет, вплоть до 2020 г.) журнал был мультидисциплинарным, охватывая в рамках естествознания такие дисциплины, как биология, химия, науки о Земле, хотя некоторые специальные выпуски выходили отдельно по профилю «Экология». За весь период общее число выпусков журнала составило 80, а распределение публикаций по организациям показывает, что 42 % статей (из 1699) представляли авторы Белгородского государственного университета, причем на долю трех дисциплин (география, геология, экология) приходилось 21 % статей.

Новый этап в развитии журнала был связан с его обособлением по одному разделу номенклатуры специальностей ВАК: «Естественные науки / Науки о Земле и окружающей среде» с новым названием «Региональные геосистемы». В настоящее время журнал относится к категории рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук по 9 научным специальностям указанного профиля. По данным РИНЦ с 2020 г. по 2025 г. в журнале опубликовано 289 статей, а двухлетний импакт-фактор РИНЦ за этот период поднялся с 0,37 до 0,98. Процентиль журнала в рейтинге Science Index повысился с 24 до 18 (2026 г.). С 2024 года журнал включен в реферативную базу данных Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science (ядро РИНЦ); журнал относится к изданиям, включенных в актуальную версию Единого государственного перечня научных изданий – «Белого списка» научных журналов (уровень – K2), а в Перечне ВАК имеет категорию 2.

По трем основным разделам тематического рубрикатора ГРНТИ: «Геодезия. Картография», «География», «Охрана окружающей среды. Экология человека» журнал «Региональные геосистемы» занимает места в рейтинге: 7, 16 и 20 соответственно. При тематическом разнообразии опубликованных в 2020–2025 гг. статей в топе находятся такие направления: геоинформационные системы, биогеохимия, дистанционное зондирование Земли, изменения климата, геоинформационное картографирование, экосети. При большой представленности в журнале организаций РФ и зарубежья (в том числе с публикациями на английском языке) авторы из НИУ «БелГУ» опубликовали 53 статьи. Эти работы отражали широкий спектр исследований, среди которых можно отметить результаты финансируемых грантов и проектов по гидроэкологическому мониторингу, реализации регионального варианта концепции бассейнового природопользования, оценке потенциала депонирования органического углерода в почвах агроландшафтов, функционированию карбонового полигона НИУ «БелГУ». Интегративный эффект этих научных разработок оформился институционально в проекте «Научные основы и технологии депонирования и секвестрации углерода в почвах агроландшафтов и в водоохранных зонах рек (научная школа)» (2024 г.) при реализации НИУ «БелГУ» государственной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

Редколлегия и редакция журнала «Региональные геосистемы» присоединяются к поздравлениям НИУ «БелГУ» с юбилеем и намерены сделать все возможное для успешного развития нашего издания как площадки для представления актуальных и наиболее значимых результатов научных исследований в Науках о Земле и окружающей среде.

Главный редактор д-р геогр. н. Ф.Н. Лисецкий

Структура и функционирование региональных геосистем Structure and Functioning of Regional Geosystems

УДК 551.43

DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-3-468-477

EDN ATDSBG

Суффозия и подтопления как пример экзодинамических процессов в пределах Чебоксарского городского округа

Ильина А.А., Никонорова И.В.

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,
Россия, 428003, г. Чебоксары, пр. Московский, 15
nastya67.q@mail.ru, niko-inna@yandex.ru

Аннотация. Важную роль при территориальном планировании городских территорий занимают экзодинамические процессы. К ним относятся суффозия и подтопление, которые широко представлены в пределах Чебоксарского городского округа. Актуальность исследования заключается в том, что данный вопрос изучен недостаточно хорошо. Данные по комплексной оценке влияния экзодинамических процессов на территориальное планирование и городскую планировку отсутствуют, в виду того, что разные авторы исследовали отдельные аспекты данной тематики. Целью данного исследования является изучение экзодинамических процессов в пределах Чебоксарского городского округа. В качестве экзодинамических процессов в данном исследовании выступают суффозия и подтопления. Исследование проводилось на основе дешифрирования спутниковых снимков в программных комплексах *SASPlanet* и *GoogleEarth*, и осуществлялось в ходе полевых выходов. Картографический материал был составлен в ГИС Аксиома. Выявлено, что наибольший процент подтопления наблюдается на территории Заволжья, и по долинам рек города Чебоксары. Наибольшее развитие потенциальных случаев развития суффозии прослеживается на территории Московского района. Выявлено, что степень благоустроенности родников уменьшает вероятность возникновения суффозии. При сопоставлении картографического материала по распространению суффозии и подтопления установлено, что наибольшее количество исследуемых ключевых участков расположено на территории Московского района Чебоксарского городского округа. Московский район характеризуется большой концентрацией многоэтажных зданий и сооружений, в связи с чем, застраиваются территории малопригодные для строительства. Поэтому мероприятия по инженерной защите территории от экзодинамических процессов нужно начинать именно здесь. Результаты исследования могут быть использованы при дальнейшей планировке территории Чебоксарского городского округа.

Ключевые слова: экзогенные процессы, суффозионные процессы, зона подтопления, родники, благоустроенность родников, долины рек, городская застройка, г. Чебоксары

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского Научного Фонда (проект № 24-27-20133) и Чувашской Республики, <https://rscf.ru/project/24-27-20133/>

Для цитирования: Ильина А.А., Никонорова И.В. 2026. Суффозия и подтопления как пример экзодинамических процессов в пределах Чебоксарского городского округа. Региональные геосистемы, 50(3): 468–477. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-468-477 EDN: ATDSBG

Suffusion and Flooding as Examples of Exodynamic Processes in the City of Cheboksary

Anastasiya A. Ilyina, Inna V. Nikonorova

I.N. Ulyanov Chuvash State University,
15 Moscow Ave., Cheboksary 428003, Russia
nastya67.q@mail.ru, niko-inna@yandex.ru

© Ильина А.А., Никонорова И.В., 2026

Abstract. Exodynamic processes play an important role in the territorial planning of urban areas. These include suffusion and flooding, which are widely present in Cheboksary. Data on the comprehensive assessment of the impact of exodynamic processes on territorial planning and urban design are lacking, as various authors have studied individual aspects of this topic. This explains the relevance of the study. The purpose of our research is to explore exodynamic processes within the city. The study was conducted during field visits to key sites and based on the interpretation of satellite images using the SASPlanet and GoogleEarth software packages. The cartographic material was prepared in GIS Axiom. A significant spread of flooding zones was found in the Trans-Volga region, as well as in the valleys of small rivers in Cheboksary. The highest number of potential cases of suffusion was identified in the Moscovsky district of Cheboksary. In places where the springs are in good condition, the suffusion is less pronounced. When comparing the cartographic data on the distribution of suffusion and flooding, it was found that the largest number of the studied key sites are located in the Moscovsky district of the Cheboksary. This is where measures for engineering protection against exodynamic processes should be primarily carried out due to a large concentration of multi-storey buildings and structures. The results of the study can be useful in urban planning of Cheboksary.

Keywords: exogenous processes, suffusion processes, flooding zone, springs, landscaping of springs, river valleys, urban development, Cheboksary

Acknowledgements: The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 24-27-20133) and the Chuvash Republic, <https://rscf.ru/project/24-27-20133/>

For citation: Ilyina A.A., Nikonorova I.V. 2026. Suffusion and Flooding as Examples of Exodynamic Processes in the City of Cheboksary. *Regional Geosystems*, 50(3): 468–477 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-468-477 EDN: ATDSBG

Введение

Родники и питающие их подземные воды во многом определяют несущие способности (градостроительные свойства) грунтов. При непрофессиональном подходе проявляют себя в формировании и протекании опасных для подземных и наземных сооружений экзогенных геологических процессов (подтопления, переувлажнения, заболачивания, мерзлотного пучения, неравномерной просадки грунтов, суффозии, оползневых явлений, коррозии) [Еремина, 2016]. Город Чебоксары и территория формирующейся Чебоксарской агломерации характеризуются активным градостроительным, транспортным и хозяйственным освоением. Исследование экзодинамических процессов города является актуальным для его пространственного планирования и устойчивого развития. В Чувашской столице наблюдается положительная динамика численности населения, которая приводит к дефициту городских земельных ресурсов. В оборот вовлекаются не очень удобные для строительства территории: прибрежные части склонов малых рек, а также коренной склон р. Волги [Ильина, Ильин, 2023]. Это увеличивает нагрузку, нарушает естественный дренаж и часто провоцирует подвижки склонов. Изучение перечисленных явлений в настоящее время находится на недостаточном уровне ввиду того, что отдельные фрагменты этого вопроса отражались различными авторами при решении частных задач на отдельных участках и отсутствие обобщающих данных весьма осложняет проведение общей оценки всей проблемы. Территория Чебоксарского городского округа представлена отложениями татарского яруса пермской системы, которые относятся к отложениям, наиболее подверженным экзодинамическим процессам. Без детального понимания и картирования экзодинамических опасностей рациональное городское планирование невозможно [Ильина и др., 2023]. Установлено, что наибольшую интенсивность, связанную с тем, что в экзодинамике земной коры ведущую роль играет вода, имеют следующие процессы: водная эрозия, загрязнение природных вод, суффозия, прямое перемещение почвогрунтов и др. [Горшков, 1982]. Наиболее распространенными на территории Чебоксарского городского округа являются следующие экзодинамические процессы: суффозионные ниши и подтопления территорий. В статье рассмотрены особенности их территориального размещения и условия формирования.

Объекты и методы исследования

Целью данного исследования является изучение экзодинамических процессов, протекающих на территории Чебоксарского городского округа. Объектом исследования выступают процессы подтопления и суффозионные процессы Чебоксарского городского округа (ЧГО).

Изучением суффозионных процессов в пределах городских территорий занимались как советские, так и зарубежные исследователи. Отдельно можно выделить работы таких ученых как М.И. Кучин, Л.А. Рождественская, Т.Я. Емельянова, Н.В. Крепша. Вопросы классификации суффозии достаточно детально рассмотрены в работах: В.П. Хоменко – выделил виды по характеру разрушения грунтов механической и химической суффозией; А.Г. Лыкошкин – рассматривал механизмы суффозионного выноса, условия его возникновения; И.А. Печеркин – трактовал суффозию сложным физико-химическим процессом, включающим в себя растворение, вынос и эрозию; Ю.В. Архидьяконских – выделил типы суффозии; В.Д. Ломтдазе – предложил рассматривать критические градиенты и давление воды как определяющие показатели интенсивности механической суффозии, указывая на них как на условия, при которых возникает данный процесс; А.В. Павлов – утверждал, что к основным факторами развития суффозии относятся дренаж подземных вод, химическое и механическое разрушение горных пород [Димухаметов и др., 2015; Строкова, Леонова, 2021; Кашперюк и др., 2023]. Среди зарубежных исследователей можно отметить работы С.А. Гарсия-Крусато, Н.Л. Рамирес-Серрато, Г.С. Эррера-Самаррон, М.А. Эрнандес-Эрнандес, Ф.Д. Йепес-Ринкон, Дж. Прасомсри, Е. Ян, А. Такахаша, Дж. Вон, и др. [García-Cruzado et al., 2025; Prasomsri et al., 2025; Yang et al., 2025].

Подтопление в долинах рек на территории города освещено в работах Е.М. Сергеева, С.Г. Добровольского, М.Н. Истоминой, К.И. Кузевановым [Олтян и др., 2023], а также в работах зарубежных исследователей: Я. Брезник, К. Оштир, Г. Рак, Дж.Л. Невес, Э. Арока-Хименес, С.Л. Каттер, Х.М. Бодок, Х.А. Гарсия, М.М. Рахман, М. Деб Л. Камруззаман, Х.М.Т. Ислам, Д.Солла, и др. [Pacetti et al., 2022; Neves, 2024; Solla et al., 2024; Aroca-Jiménez et al., 2025; Breznik et al., 2025].

Суффозия наблюдается на территориях распространения лессов и лессовидных суглинков, в нижних частях склонов речных долин. Одним из необходимых условий суффозии является наличие в породе как крупных частиц, образующих природный каркас, так и вымывающихся мелких. Вынос начинается лишь с определенных значений напора воды, ниже которых происходит только фильтрация. Суффозионные провалы имеют как природное, так и техногенное происхождение. Большое значение имеет антропогенное воздействие, а именно – сброс сточных вод, что усиливает развитие данного процесса. Техногенная суффозия встречается в местах утечек из водопроводных и канализационных сетей, баражного эффекта [Строкова, Леонова, 2021]. Наличие суффозии на активной фазе развития карста в определенных условиях приводит к формированию депрессионной воронки в верхнем водоносном горизонте и уровень грунтовых вод принимает V-образную форму. В основании нерастворимых пород создаются подземные полости за счет просачивающейся сверху воды, и движущаяся по трещинам вода растворяет по пути движения сульфатные, карбонатные и другие породы, что приводит к нарушению устойчивости свода и его обрушению. Форма, размеры воронок и частота их образования тесно связаны с геологическим строением, геоморфологическими и гидрогеологическими условиями, режимом подземных вод [Едемский и др., 2021].

Нами предполагается, что исследуемые родники являются потенциальными источниками суффозионных процессов. Изучение суффозионных процессов было проведено в ходе полевых выходов и включает: определение координат, описание интенсивности протекания процессов, зон негативного воздействия, степени благоустроенности родников, характера разгрузки подземных вод.

Подтопление в городах может иметь не только региональный и локальный, но и объектный (точечный) характер [Зими́на, 2020; Solla et al., 2024; Aroca-Jiménez et al., 2025]. Процессы подтопления были изучены по результатам дешифрования спутниковых снимков. Дешифрование заключалось в сравнении спутниковых снимков различных лет (2015–2025 гг.) в программных комплексах *GoogleEarth*, *SASplanet* [Breznik et al., 2025; Rahman et al., 2025]. Данные были уточнены в ходе полевых выходов. Описание подтапливаемых территорий включало территориальную приуроченность к отдельным районам и микрорайонам Чебоксарского городского округа, долинам рек, площадным показателям. По материалам исследований был составлен картографический материал в ГИС Аксиома.

Результаты и их обсуждение

На территории ЧГО было выделено 37 ключевых участков, на которых наблюдаются ежегодные активизации экзогенных процессов – подтопление территории.

Подтопления в долинах рек Чебоксарского округа представлены породами аллювиальных отложений пойменных террас: пески, суглинки, гравий, глины современного звена. Общая площадь подтопляемых территорий составляет 58,4 га, а от общей площади ЧГО занимает 0,23 % (рис. 1).

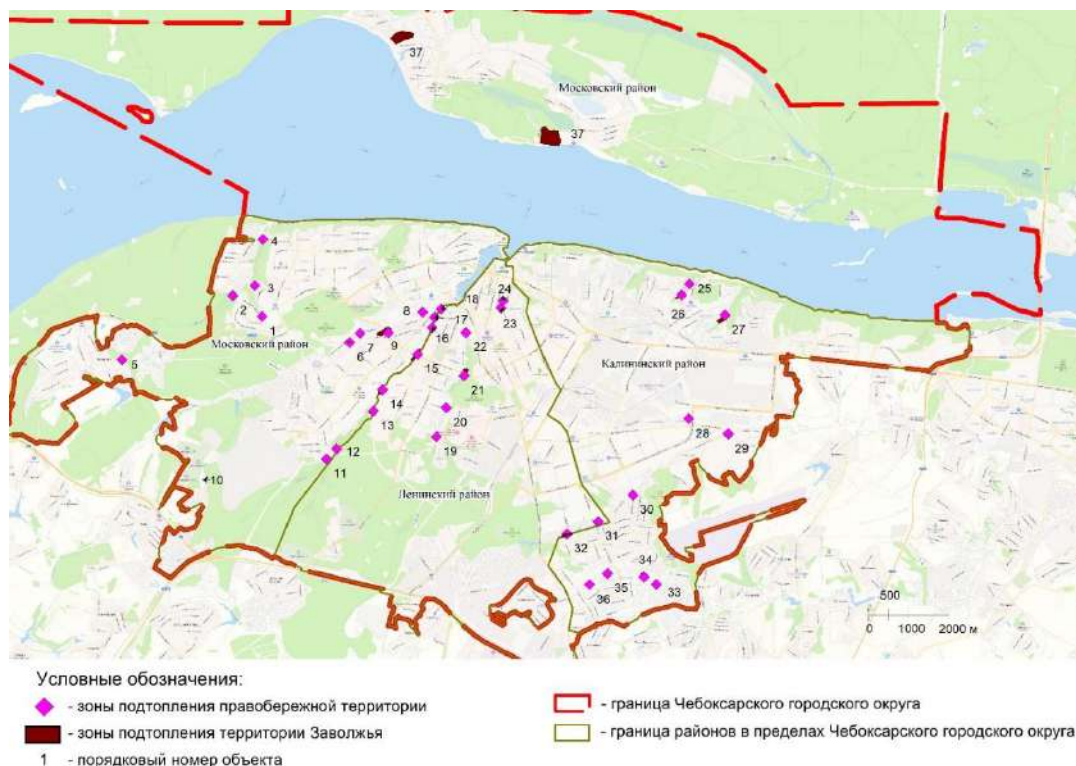


Рис. 1. Карта распространения процессов подтопления в Чебоксарском городском округе
Fig. 1. Map of flooding processes distribution in the city of Cheboksary

Подтопления встречаются в большинстве случаев по долинам рек, протекающих в черте города Чебоксары. К ним можно отнести реки Чебоксарска, Сугутка, Кайбулка, Кукшум (см. таблицу). Расположенные вдоль этих рек территории затапливаются чаще всего в весеннее время года, во время таяния снега. Анализ спутниковых снимков показал, наибольший процент подтопления приходится на Заволжский участок ЧГО (58 %), а также на долины рек города Чебоксары: Сугутка (9 %), Чебоксарка (8 %), которые относятся к Московскому и Ленинскому району г. Чебоксары. Наименьший процент имеют территории долины рек Малая Кувшинка (2 %) и Шупашкарка (1 %).

Перечень подтопляемых территорий в пределах Чебоксарского городского округа
List of flooded areas within the city of Cheboksary

№ п/п	Река	Площадь затапливаемой территории (га)	Микрорайоны, попадающие в зону подтопления
1	Исток правого притока реки Шупашкарка	0,17	Мкр. Университет
2	Исток левого притока реки Шупашкарка	0,11	Садовое товарищество «Заовражное»
3	Исток правого притока реки Шупашкарка	0,47	Территория в северо-западном районе, по ул. Надежды
4	Долина реки Шупашкарка	0,46	Территория по ул. Заовражная
5	Исток реки Чебоксарка	0,21	д. Чандрово
6	Долина реки Чебоксарка	0,20	Юго-западный район, территория вдоль ул. Красногорская
7	Долина реки Чебоксарка	0,11	Юго-западный район, территория вдоль ул. Красногорская
8	Долина реки Чебоксарка	0,24	СНТ «Дружба»
9	Долина реки Чебоксарка	3,72	СНТ «Рассвет»
10	Исток правого притока реки Чебоксарка	0,1	Территория кладбища №12
11	Устье левого притока реки Сугутка	0,43	Садовое товарищество «Энергетик»
12	Долина реки Сугутка	0,37	Садовое товарищество «Энергетик»,
13	Долина реки Сугутка	0,62	5-й мкрн. Садовый, ГК на бульваре Миттова
14	Долина реки Сугутка	1,19	Байконур, 4-й мкрн. Садовый
15	Долина реки Сугутка	1,91	Юго-западный район, территория вдоль ул. Спартак, поселок имени Кирова
16	Долина реки Сугутка	0,34	Поселок имени Кирова, территория ул. Короленко
17	Долина реки Сугутка	0,1	Поселок имени Кирова
18	Долина реки Сугутка	0,45	Территория вдоль ул. 2-я Коммунальная Слобода
19	Левый приток реки Трусиха	0,39	Территория по ул. 2-я Заречная
20	Долина реки Трусиха	0,31	Садоводческое товарищество Коммунальник-1
21	Долина реки Трусиха	1,65	Территория вдоль Яблоневоу ул.
22	Долина реки Трусиха	0,2	Территория вдоль Яблоневоу ул.
23	Долина реки Кайбулка	0,45	Мкр «Благовещенский»
24	Долина реки Кайбулка	0,27	Мкр «Благовещенский»
25	Водоток между Соляное и Гремячево	0,6	Мкр. Соляное
26	Водоток между Соляное и Гремячево	0,63	Мкр. Соляное
27	Ручей возле Гремячево	3,06	Гремячево
28	Долина реки Малая Кувшинка	0,79	Квартал Пятино
29	Долина реки Малая Кувшинка	0,19	14-й мкрн.
30	Долина реки Кукшум	0,78	Поселок Южный
31	Долина реки Кукшум	0,12	Поселок Южный
32	Долина реки Кукшум	1,26	Поселок Южный
33	Долина реки Шалмас	0,67	СНТ «Мичуринец», садовое товарищество «Питомник-2»
34	Долина реки Шалмас	0,82	Деревня Вачалкасы, садовое товарищество «Питомник-1», СНТ «Коммунальник-3»
35	Долина реки Шалмас	0,49	Поселок Южный, СНТ «Южный»
36	Долина реки Шалмас	0,22	Поселок Южный
37	Река Волга	34,3	Заволжский участок (п. Сосновка и п. Октябрьский)

Суффозионные процессы на территории ЧГО развиты в местах высачивания мелкоземистого материала из родников. Здесь происходит изменение рельефа, его понижение в виде траншеи, образуется так называемая суффозионная или циркообразная ниша [Nikopogova et al., 2024]. Пространственное распределение суффозионных процессов представлено на рис. 2.



Рис. 2. Карта распространения суффозионных процессов в пределах Чебоксарского городского округа

Fig. 2. Map of suffusion processes distribution within the city of Cheboksary

Наибольшее количество родников и, соответственно, потенциальных случаев проявления суффозионных процессов наблюдается в Московском районе (17 родников), далее идет Ленинский район (11 родников), и меньше всего зафиксировано в Калининском районе (8 родников). Благоустроенность родников влияет на интенсивность развития суффозионных процессов. В местах, где родники являются благоустроенными проявление суффозии – наименьшее. Наибольшую потенциальную опасность представляют неблагоустроенные родники. Территориально они приурочены к окраинам и пригородным частям г. Чебоксары, садовым товариществам. Именно здесь наблюдается максимальное отступление склонов – ниш, из которых вытекают родники. Отдельно следует упомянуть строительство купелей, святых источников на родниках, которых на территории ЧГО насчитывается не менее 7 единиц. С одной стороны, благоустройство родников снижает вероятность развития суффозионных процессов. С другой, приводит к дополнительной антропогенной нагрузке на прилегающую к родникам территорию.

Сопоставление карты распространения подтопления и карты распространения суффозии показало, что сосредоточение наибольшего количества проявлений экзодинамических процессов, наблюдается в Московском районе (рис. 3).

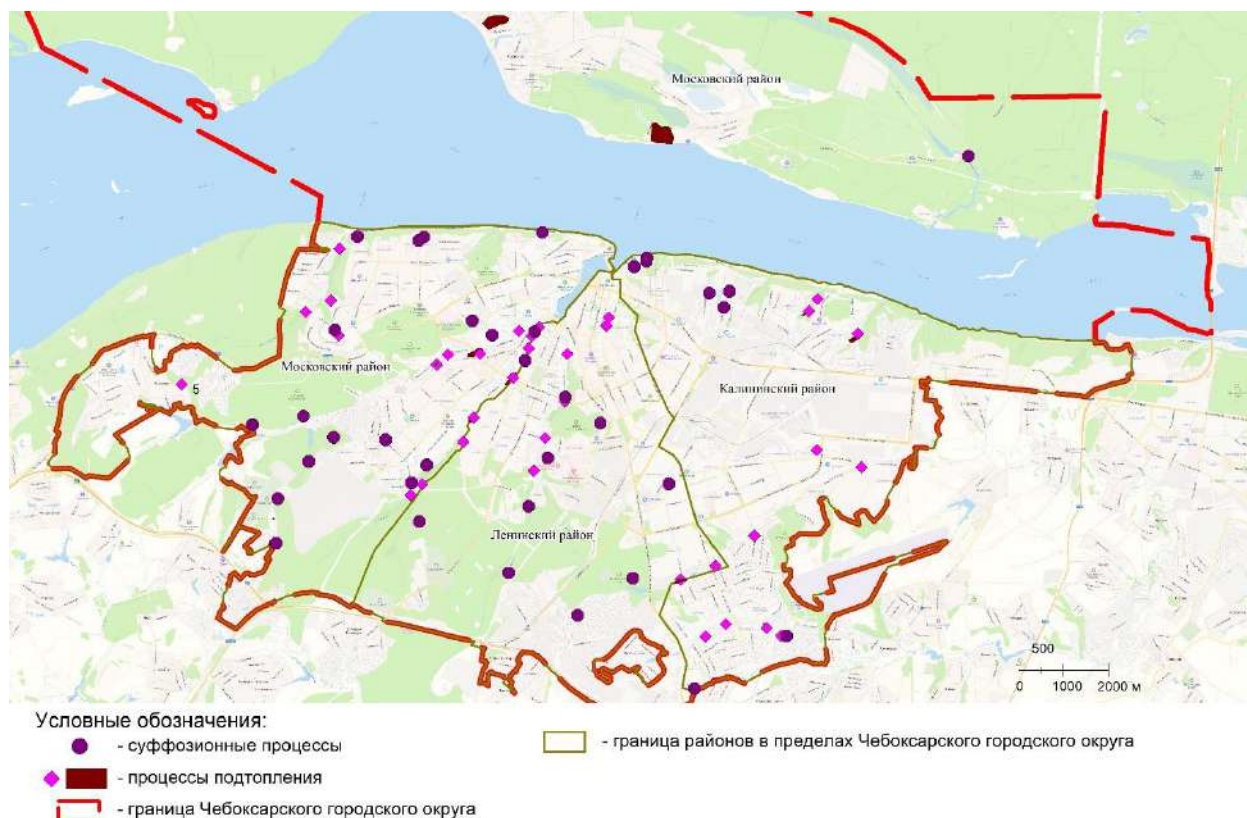


Рис. 3. Карта распространения экзодинамических процессов в пределах Чебоксарского городского округа

Fig. 3. Map of exodynamic processes distribution within the city of Cheboksary

Данный район характеризуется максимальной плотностью застройки, высокоэтажным строительством. «Престижность» Московского района привела к застраиванию малопригодных с геолого-геоморфологической точки зрения участков. Именно поэтому мероприятия по инженерной защите территории от экзодинамических процессов нужно начинать именно здесь.

Закключение

Территория Чебоксарского городского округа характеризуется интенсивным развитием экзодинамических процессов, что связано с разноплановым хозяйственным освоением городских территорий. Гидрологический режим, измененный в результате заполнения Чебоксарского водохранилища и подъема уровня грунтовых вод, обусловил ряд негативных экзогенных процессов, включая гидроморфные (подтопление, заболачивание), береговую эрозию, активизацию склоновых процессов (оползни) и плоскостной эрозии (оврагообразование), а также инфильтрационное загрязнение подземных вод. Значительная доля подтопления приходится на Заволжский участок Чебоксарского городского округа и на долины рек Сугутка, Чебоксарка, находящихся на территории Московского района, и Кукшум. Наибольшее количество случаев проявления суффозии наблюдается в Московском районе. Отмечено снижение интенсивности суффозии на благоустроенных родниках. Анализ карт распространения подтопления и суффозии, показал, что Московский район испытывает существенное воздействие экзодинамических процессов, которые необходимо учитывать при территориальном планировании.

Список литературы

- Горшков С.П. 1982. Экзодинамические процессы освоенных территорий. М., Недра, 286 с.
- Димухаметов Д.М., Новопоселенских Л.А., Бахарева Н.С. 2015. Суффозионные процессы на территориях городов. Современные проблемы науки и образования, 2–2: 890.
- Едемский Д.Е., Петров Н.Ф., Прокопович И.В. 2021. Применение низкочастотных георадаров для изучения и контроля экзогенных геологических процессов. Разведка и охрана недр, 9: 14–23.
- Еремина А.В. 2016. Университетские родники г. Томска: состав и особенности обустройства. В кн.: Проблемы геологии и освоения недр. Труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета, Томск, 04–08 апреля 2016. Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Т. 1: 648–650.
- Зими́на А.А. 2020. Факторы, влияющие на подтопление городских территорий. В кн.: Достижения и перспективы научно-инновационного развития АПК. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием, Курган, 27 февраля 2020. Курган, Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева: 305–308.
- Ильина А.А., Ильин В.Н. 2023. Долины рек г. Чебоксары: возможности и риски при строительном освоении территории. В кн.: Эрозионные, русловые и устьевые процессы (исследования молодых ученых университетов). Материалы XIII семинара молодых ученых вузов, объединяемых Межвузовским советом по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов, Набережные Челны, 25–29 апреля 2022. М., Набережночелнинский государственный педагогический университет: 36–41.
- Ильина А.А., Никонорова И.В., Ильин В.Н. 2023. Геологические условия Чебоксарского городского округа Чувашской Республики. Естественнонаучные исследования в Чувашии, 9: 72–77.
- Кашперюк П.И., Москалев Д.С., Хоменко В.П. 2023. Водопонижение как ведущий фактор развития суффозии при строительстве фундаментов глубокого заложения. Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 4: 18–28. <https://doi.org/10.31857/S0869780923030049>.
- Олтян И.Ю., Арефьева Е.В., Болгов М.В., Жданенко И.В., Сергеев Е.Б., Котосонов А.С. 2023. Моделирование и оценка длительности затопления местности при наводнении редкой повторяемости. Ч. 1. Технологии гражданской безопасности, 20 (3(77)): 39–49.
- Строкова Л.А., Леонова А.В. 2021. Оценка суффозионной опасности на территории г. Томска. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 332(5): 49–59. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/5/3185>
- Aroca-Jiménez E., Cutter S.L., Bodoque J.M., García J.A. 2025. Enhancing Understanding of Vulnerability and Resilience to Flash Floods Through Comparative Analysis of Multidimensional Indices. International Journal of Disaster Risk Reduction, 125: 105540. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105540>.
- Breznik J., Oštir K., Rak G. 2025. The Potential of Sentinel-1 Imagery for Flood Event Detection: A Satellite Vs. Hydraulic Model Comparison. Journal of Hydrology, 651: 132587. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132587>.
- García-Cruzado S.A., Ramírez-Serrato N.L., Herrera-Zamarrón G.S., Hernandez-Hernandez M.A., Yépez-Rincón F.D., ... Olea-Olea S. 2025. Mapping Sinkhole Susceptibility in Mexico City Using the Weight of Evidence Method. Journal of South American Earth Sciences, 153: 105368. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105368>.
- Nikonorova I.V., Ilyin V.N., Ilyina A.A., Nikitin A.A. 2024 Increasing the Ecological and Recreational Importance of the Springs of the Chuvash Republic. BIO Web of Conferences, 16: 03013. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202411600001>
- Neves J.L. 2024. Urban Planning for Flood Resilience Under Technical and Financial Constraints: The Role of Planners and Competence Development in Building a Flood-Resilient City in Matola, Mozambique. City and Environment Interactions, 22: 100147. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2024.100147>
- Pacetti T., Cioli S., Castelli G., Bresci E., Pampaloni M., ... Caporali E. 2022. Planning Nature Based Solutions Against Urban Pluvial Flooding in Heritage Cities: A Spatial Multi Criteria Approach for

- the City of Florence (Italy). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41: 101081. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101081>.
- Prasomsri J., Nuntasarn R., Likitlersuang S., Takahashi A. 2025. Effect of Suffusion and Self-Filtration on Mechanical Behavior of Well-Graded Sands. *Soils and Foundations*, 65(3): 101622. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2025.101622>.
- Rahman Md.M., Kamruzzaman M., Deb L., Islam H.M.T.. 2025. Flood Mapping, Damage Assessment, and Susceptibility Zonation in Northeastern Bangladesh in 2022 Using Geospatial Datasets. *Progress in Disaster Science*, 25: 100402. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2024.100402>.
- Solla D., Acuña-Alonso C., Peco-Costas C., Álvarez X. 2024. Flooding Study of the Loira River (Galicia, Spain): Importance of Pre-Evaluation in Land Management. *Cleaner Engineering and Technology*, 21: 100769. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100769>.
- Yang Y., Choi H., Lee J., Choe Y., Won J. 2025. Impact of Flow Direction on Suffusion of Sand-Clay Mixtures Under Variably Saturated Conditions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 17(4): 2511–2525. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.05.038>.

References

- Gorshkov S.P. 1982. *Ekzodinamicheskiye protsessy osvoyennykh territoriy* [Exodynamic Processes of the Developed Territories]. Moscow, Publ. Nedra, 286 p.
- Dimukhametov D.M., Novoposelenskikh L.A., Bakhareva N.S. 2015. Suffosion Processes in the Cities. Modern problems of science and education, 2–2: 890 (in Russian).
- Edemskiy D.E., Petrov N.F., Prokopovich I.V. 2021. Application of Low-Frequency Ground-Penetrating Radars for the Study and Control of Exogenous Geological Processes. *Prospect and protection of mineral resources*, 9: 14–23 (in Russian).
- Eremina A.V. 2016. *Universitetskiye rodniki g. Tomska: sostav i osobennosti obustroystva* [University Springs of Tomsk: Composition and Features of the Arrangement]. In: *Problemy geologii i osvoyeniya nedr* [Problems of Geology and Development of the Subsoil]. Proceedings of the XX International Symposium named after Academician M.A. Usov for Students and Young Scientists, dedicated to the 120th anniversary of the founding of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 04–08 April 2016. Tomsk, Publ. National Research Tomsk Polytechnic University, Vol. 1: 648–650.
- Zimina A.A. 2020. Factors, Influencing on the Flooding of Urban Areas. In: *Achievements and Prospects of Scientific and Innovative Development of the Agro-Industrial Complex*. Proceedings of the All-Russian (national) Scientific and Practical Conference with international participation, Kurgan, 27 February 2020. Kurgan, Publ. Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltsev: 305–308 (in Russian).
- Ilyina A.A., Ilyin V.N. 2023. Doliny rek g. Cheboksary: vozmozhnosti i riski pri stroitel'nom osvoyenii territorii [Cheboksary River Valleys: Opportunities and Risks in the Construction Development of the Territory]. In: *Erozionnyye, ruslovyye i ustyevyye protsessy (issledovaniya molodykh uchenykh universitetov)* [Erosion, Riverbed and Estuarine Processes (Research by Young University Scientists)]. Materials of the XIII seminar of young university scientists, united by the Interuniversity Council on the problem of erosion, riverbed and estuarine processes, Naberezhnye Chelny, 25–29 April 2022. Moscow, Publ. Naberezhnye Chelny State Pedagogical University: 36–41.
- Ilyina A.A., Nikonorova I.V., Ilyin V.N. 2023. Geological Conditions of Cheboksary City District of the Chuvash Republic. *Natural Science Research in Chuvashia*, 9: 72–77 (in Russian).
- Kashperuk P.I., Moskalev D.S., Khomenko V.P. 2023. Dewatering as a Leading Factor in the Development of Suffusion Upon the Construction of Deep Foundations. *Environmental Geoscience*, 4: 18–28 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0869780923030049>.
- Oltyan I.Yu., Arefyeva E.V., Bolgov M.V., Zhdanenko I.V., Sergeev E.B., Kotosonov A.S. 2023. Modeling and Estimation of the Flooding Area Duration in Event of Floods of Rare Occurrence. Part 1. Technologies of civil safety, 20(3(77)): 39–49 (in Russian).
- Stroкова L.A., Leonova A.V. 2021. Assessment of Suffosion Hazard on the Territory of Tomsk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 332(5): 49–59 (in Russian). <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/5/3185>
- Aroca-Jiménez E., Cutter S.L., Bodoque J.M., García J.A. 2025. Enhancing Understanding of Vulnerability and Resilience to Flash Floods Through Comparative Analysis of Multidimensional

- Indices. International Journal of Disaster Risk Reduction, 125: 105540. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2025.105540>.
- Breznik J., Oštir K., Rak G. 2025. The Potential of Sentinel-1 Imagery for Flood Event Detection: A Satellite Vs. Hydraulic Model Comparison. Journal of Hydrology, 651: 132587. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132587>.
- García-Cruzado S.A., Ramírez-Serrato N.L., Herrera-Zamarrón G.S., Hernandez-Hernandez M.A., Yépez-Rincón F.D., ... Olea-Olea S. 2025. Mapping Sinkhole Susceptibility in Mexico City Using the Weight of Evidence Method. Journal of South American Earth Sciences, 153: 105368. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105368>.
- Nikonorova I.V., Ilyin V.N., Ilyina A.A., Nikitin A.A. 2024 Increasing the Ecological and Recreational Importance of the Springs of the Chuvash Republic. BIO Web of Conferences, 16: 03013. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202411600001>
- Neves J.L. 2024. Urban Planning for Flood Resilience Under Technical and Financial Constraints: The Role of Planners and Competence Development in Building a Flood-Resilient City in Matola, Mozambique. City and Environment Interactions, 22: 100147. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2024.100147>
- Pacetti T., Cioli S., Castelli G., Bresci E., Pampaloni M., ... Caporali E. 2022. Planning Nature Based Solutions Against Urban Pluvial Flooding in Heritage Cities: A Spatial Multi Criteria Approach for the City of Florence (Italy). Journal of Hydrology: Regional Studies, 41: 101081. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101081>.
- Prasomsri J., Nuntasarn R., Likitlersuang S., Takahashi A. 2025. Effect of Suffusion and Self-Filtration on Mechanical Behavior of Well-Graded Sands. Soils and Foundations, 65(3): 101622. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2025.101622>.
- Rahman Md.M., Kamruzzaman M., Deb L., Islam H.M.T.. 2025. Flood Mapping, Damage Assessment, and Susceptibility Zonation in Northeastern Bangladesh in 2022 Using Geospatial Datasets. Progress in Disaster Science, 25: 100402. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2024.100402>.
- Solla D., Acuña-Alonso C., Peco-Costas C., Álvarez X. 2024. Flooding Study of the Loira River (Galicia, Spain): Importance of Pre-Evaluation in Land Management. Cleaner Engineering and Technology, 21: 100769. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100769>.
- Yang Y., Choi H., Lee J., Choe Y., Won J. 2025. Impact of Flow Direction on Suffusion of Sand-Clay Mixtures Under Variably Saturated Conditions. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 17(4): 2511–2525. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.05.038>.

*Поступила в редакцию 28.10.2025;
поступила после рецензирования 03.12.2025;
принята к публикации 11.02.2026*

*Received October 28, 2025;
Revised December 03, 2025;
Accepted February 11, 2026*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ильина Анастасия Андреевна, ассистент кафедры физической географии и геоморфологии, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Никонорова Инна Витальевна, кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой физической географии и геоморфологии, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anastasiya A. Ilyina, Teaching Assistant at the Department of Physical Geography and Geomorphology, I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia

Inna V. Nikonorova, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Physical Geography and Geomorphology, I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia

УДК 591.9

DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-3-478-493

EDN AVHLSF

Определение пространственной структуры обилия копытных национального парка «Земля леопарда» по данным фотомониторинга

Плотников И.В., Максимова Д.А., Титов А.С., Сторожук В.Б.

ФГБУ «Объединенная дирекция государственного природного биосферного заповедника
«Кедровая падь» и национального парка «Земля леопарда» им. Н.Н. Воронцова,
Россия, 690001, г. Владивосток, ул. Дальзаводская, 2, стр. лит. 38-А
iv-44@bk.ru, dmaksimova.tig@yandex.ru, titoff19_88@mail.ru, storozhuk@leopard-land.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования, проведенного на основе данных мониторинга за 2023 год в национальном парке «Земля леопарда». Изучались общие особенности пространственной структуры обилия населения 4 видов копытных (пятнистый олень, кабан, косуля, кабарга). Проведен анализ пространственной структуры и распределения показателей относительного индекса обилия (RAI) по основным типам леса и диапазонам высот над уровнем моря. По результатам определено, что в целом для копытных в национальном парке характерно наличие нескольких локальных центров концентрации. Для кабана, косули и пятнистого оленя наибольшее обилие отмечено в лесах с преобладанием дуба монгольского, для кабана – сосны корейской. По диапазонам высот наибольшее обилие для кабана и косули отмечено на высотах менее 100 м, для кабарги 600–700 м, для пятнистого оленя выше 700.

Ключевые слова: национальный парк, копытные, Земля леопарда, индекс относительного обилия, пространственная структура популяции, коэффициент концентрации животных

Для цитирования: Плотников И.В., Максимова Д.А., Титов А.С., Сторожук В.Б. 2026. Определение пространственной структуры обилия копытных национального парка «Земля леопарда» по данным фотомониторинга. Региональные геосистемы, 50 (3): 478–493. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-478-493 EDN: AVHLSF

Spatial Structure of Ungulates in the *Land of the Leopard* National Park Based on Photomonitoring Data

Ilya V. Plotnikov, Daria A. Maksimova, Alexey S. Titov, Viktor B. Storozhuk

Federal State Budgetary Institution Joint Directorate of Kedrovaya Pad State Biosphere Nature
Reserve and Land of the Leopard National Park
38-A lit. 2 Dalzavodskaya St, Vladivostok 690068, Russia

iv-44@bk.ru, dmaksimova.tig@yandex.ru, titoff19_88@mail.ru, storozhuk@leopard-land.ru

Abstract. The paper presents the results of a study based on the 2023 data of camera trap monitoring in the *Land of the Leopard* National Park. General features of the spatial structure of population abundance were examined for the four most common ungulate species in the national park: sika deer, wild boar, roe deer, and musk deer. The relative abundance index (RAI) was used as the primary indicator. Schematic maps of the local distribution of ungulates across the territory were constructed. We analyzed the abundance distribution of each species by forest type and altitude. Our findings have shown that the spatial dynamics of the abundance index are associated with both plant communities and absolute altitude. In general, the populations are

characterized by the presence of several local centers of concentration. Numerous species (such as sika deer) form multiple centers of concentration, while rare species (such as musk deer) have fragmented ranges limited to specific biotopes. Wild boar, roe deer, and sika deer are most abundant in forests dominated by Mongolian oak, while musk deer are most abundant in forests dominated by Korean pine. Wild boar and roe deer are most often observed in lowlands at elevations less than 100 meters above sea level, while musk deer and sika deer, on the other hand, tend to be more abundant at higher elevations, being most abundant at elevations of 600–700 meters and above 700 meters, respectively.

Keywords: national park, ungulates, Land of the Leopard, relative abundance index, spatial structure of the population, animal concentration coefficient

For citation: Plotnikov I.V., Maksimova D.A., Titov A.S., Storozhuk V.B. 2026. Spatial Structure of Ungulates in the *Land of the Leopard* National Park Based on Photomonitoring Data. *Regional Geosystems*, 50(3): 478–493 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-478-493 EDN: AVHLSF

Введение

Копытные являются важной частью биоценоза, это то звено, которое в значительной мере влияет на растительные сообщества, изменяя и формируя их. На юго-западе Приморья копытные – это важный кормовой объект для таких крупных хищников, как амурский тигр и дальневосточный леопард, которые включены в Красную книгу РФ и международную Красную книгу. Аномально высокая численность растительноядных животных, может приводить к нарушениям растительного покрова, из-за поедания травянистой растительности, повреждения подроста деревьев, а также вытаптывания. Это приводит к изменениям в структуре лесной растительности и деградации почв, что отмечается как в Приморском крае, так и на других территориях [Присяжнюк В.Е., Присяжнюк Н.П., 1974; Маковкин, 1999; Диреганов и др., 2012; Булахов и др., 2015; Коньков, 2015; 2017; Панкова и др., 2020; Шакурин и др., 2020; Царалунга и др., 2020; Ramirez, 2021; Ueno et al., 2025]. Растительная кормовая база является одной из основных причин локализации копытных, именно поэтому важным аспектом их изучения является пространственная привязка популяций к растительным сообществам [Машкин и др., 2013; Аргунов и др., 2015; Панченко и др., 2019; Панкова и др., 2020]. Среди внешних факторов, значительно влияющих на численность копытных в Приморском крае, выделяется охотничий пресс (вне особо охраняемых природных территорий), распространение инфекционных заболеваний, таких как африканская чума свиней [Петров и др., 2024].

В ходе исследования было определено распределение по территории и лесным растительным сообществам национального парка «Земля леопарда» четырех видов копытных – пятнистого оленя (*Cervus nippon*), кабана (*Sus scrofa*), косули (*Capreolus pygargus*) и кабарги (*Moschus moschiferus*).

Целью данной работы является изучение особенностей пространственной структуры населения копытных на территории национального парка «Земля леопарда», распределения копытных животных по лесным сообществам различного типа и по профилю абсолютных высот.

Объекты и методы исследования

В 2012 году была создана Федеральная государственная бюджетная организация «Земля леопарда», территория которой расположена на юго-востоке Приморского края. В ее состав входит национальный парк «Земля леопарда» и Государственный природный заповедник «Кедровая падь». С 2013 года на территории национального парка «Земля леопарда» действует постоянная сеть станций фотомониторинга,

созданная для изучения и сохранения дальневосточного леопарда. Ежегодный фотомониторинг проводится на всей территории Государственного природного биосферного заповедника «Кедровая падь» и национального парка «Земля леопарда» и его охранной зоны. Национальный парк «Земля леопарда» располагается в приграничной с Китайской Народной Республики (КНР) зоне. Вдоль российско-китайской государственной границы проходит линия пограничных инженерно-технических сооружений (ИТС), которая расположена в 2,5–12 км от границы с КНР. Линия ИТС условно делит всю территорию исследования на две части – до линии ИТС и за линией ИТС, что связано с различным охранном режимом и доступностью. В силу этого фотоловушки за линией ИТС работают круглогодично. На всей остальной территории национального парка фотоловушки устанавливаются на время проведения учета. Фотоловушки на территории располагаются в квадрате 5 на 5 км (25 км²) и расстояние между фотоловушками не более 2,5 км [Matiukhina et al., 2016; Марченкова, 2021; Виткалова и др., 2022; Блидченко и др., 2023].

Всего в рамках исследования были задействованы данные 153 мониторинговых точек, распределенных по территории площадью 2799 км². Исследования затрагивают годовой период наблюдений с ноября 2022 по октябрь 2023 года. Индекс обилия определялся из количества проходов животного на 100 суток работы каждой фотоловушки [Петров и др., 2022; Блидченко и др., 2023; Кришук и др., 2023].

Исходя из наблюдений был подсчитан индекс относительного обилия – Relative abundance index (RAI) в каждой мониторинговой точке в течение года. RAI рассчитывался по формуле:

$$RAI = TE / TN \times 100$$

где, *TE* – *trap event* (число регистраций/проходов животного на станции с учетом веса регистрации); *TN* – *trap nights* (число фотоловушко-суток на локации) [Kelly, Holub, 2008; Botts et al., 2020].

Преимущество использования данного индекса состоит в том, что учитывается перемещения животных по территории в течение года, а не их одномоментное распределение [Palmer et al., 2018].

Показатели RAI были переведены в относительный коэффициент концентрации (*K_к*), рассчитанный по формуле:

$$K_k = \frac{RAI_x}{RAI_{cp}}$$

где *RAI_{cp}* – средний показатель относительного обилия для каждого из видов по всей территории национального парка, а *RAI_x* – показатель в конкретной точке, таким образом, при *K_к* < 1 обилие ниже средних значений, *K_к* > 1 – выше средних, *K_к* > 2 – высокий показатель обилия [Русанов, Сорокина, 1984; Козорез, 2009]. Расчет модели площадных значений обилия копытных производился с помощью площадного интерполяционного анализа в программе QGIS 3.28.4 методом обратно-взвешенных расстояний Inverse Distance Weighted (*IDW*) [Interpolating Surfaces ..., 2004; Types of Interpolation ..., 2016]. Данный метод интерполяции позволяет получить поверхность с большим количеством вариантов значений на основе точечных данных, в том числе *IDW*-интерполяция успешно применялась в работах оценки пространственных структур популяций [Ербулеков и др., 2021; Асатрян и др., 2022; Бараков, 2025].

Преобладающие площади территории национального парка покрыты лесами с преобладанием дуба монгольского (*Quercus mongolica*) – 59 %. Значительные доли занимают леса с сосной корейской (*Pinus koraiensis*) – 6 %, дубом зубчатым (*Quercus dentata*) – 6 % и ясенем (*Fraxinus*) – 5% в качестве главенствующей породы. Площади каждого из данных типов леса, в пределах исследуемой территории составляют более

100 км². В качестве программы для обработки геоинформационных данных использовалась QGIS 3.28.4. На основе оцифрованных поквартальных данных лесоустройства, был создан векторный полигональный слой, где в виде отдельных полигонов были выделены лесоустроительные кварталы. Тип леса выделялся по главной породе и вносился в атрибуты полигонов [Лесохозяйственный регламент ..., 2018]. На рис. 1 представлена карта национального парка с обозначением типов леса разделенных по преобладающим лесным породам.



Рис. 1. Типы лесов национального парка «Земля леопарда» по преобладающим лесным породам
Fig. 1. Forest types of the Land of the Leopard National Park, by predominant forest species

С помощью модуля зональной полигональной статистики в программе QGIS 3.28.4, был произведен расчет средних значений обилия копытных каждого вида в лесных сообществах различного типа. Рассчитаны средние значения коэффициента концентрации копытных (K_k) на векторных полигонах, дифференцированных по типам главенствующих пород.

Высотная поясность влияет на распределение растительных сообществ и кормовой базы, микроклиматических условий, в том числе снежного покрова, тем самым действуя на пространственное распределение копытных [Иванов и др., 2015; Прокопенко, Нестерова, 2019]. На рис. 2 представлена карта национального парка с обозначением высот над уровнем моря.

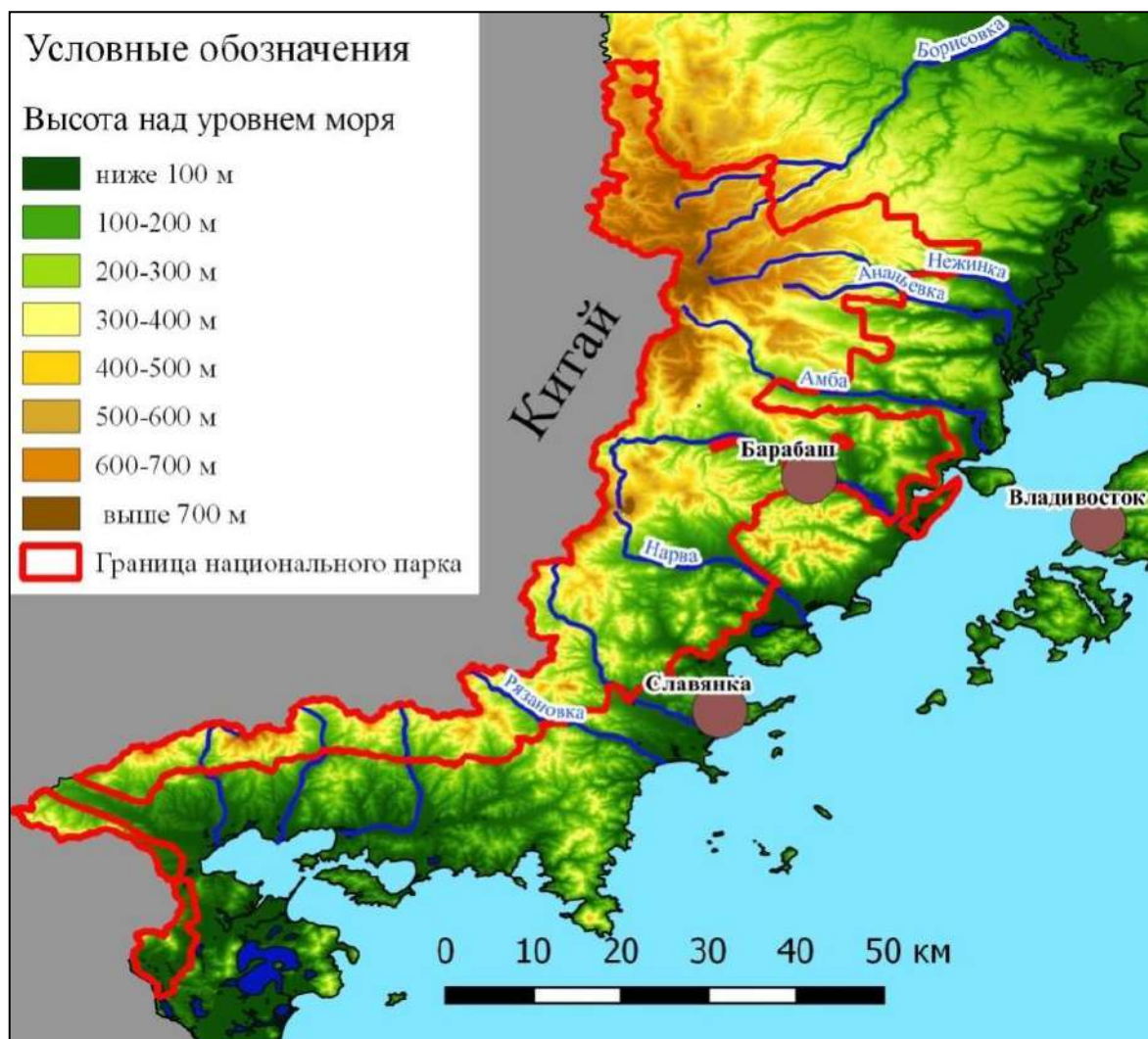


Рис. 2. Карта высот национального парка «Земля леопарда»

Fig. 2. Elevation map of the Land of the Leopard National Park

Растровая карта высот была создана на основе данных цифровой модели рельефа *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* [Shuttle Radar ..., 2025]. Расчет коэффициентов концентрации (K_k) копытных был произведен в программе *QGIS 3.28.4* с помощью выборки регулярных точек с регулярным интервалом в 3" (соответствует разрешению растрового слоя абсолютных высот) и плагина *Point sampling tool*, собирающего значения растровых слоев в таблицу атрибутов точечного слоя. Полученные в точках значения сортировались по диапазонам абсолютных высот с шагом 100 м, затем определялись средние значения *RAI* и коэффициенты по каждому из диапазонов.

Результаты и их обсуждение

На основе полученных значений коэффициентов концентрации копытных, были составлены карты-схемы относительного пространственного распределения обилия кабана, косули, пятнистого оленя и кабарги по территории национального парка «Земля леопарда». Области с высокими показателями обилия, включающие как минимум 2 мониторинговые точки, рассматривались как ядра концентрации населения копытных. Полученные результаты представлены на рис. 3.

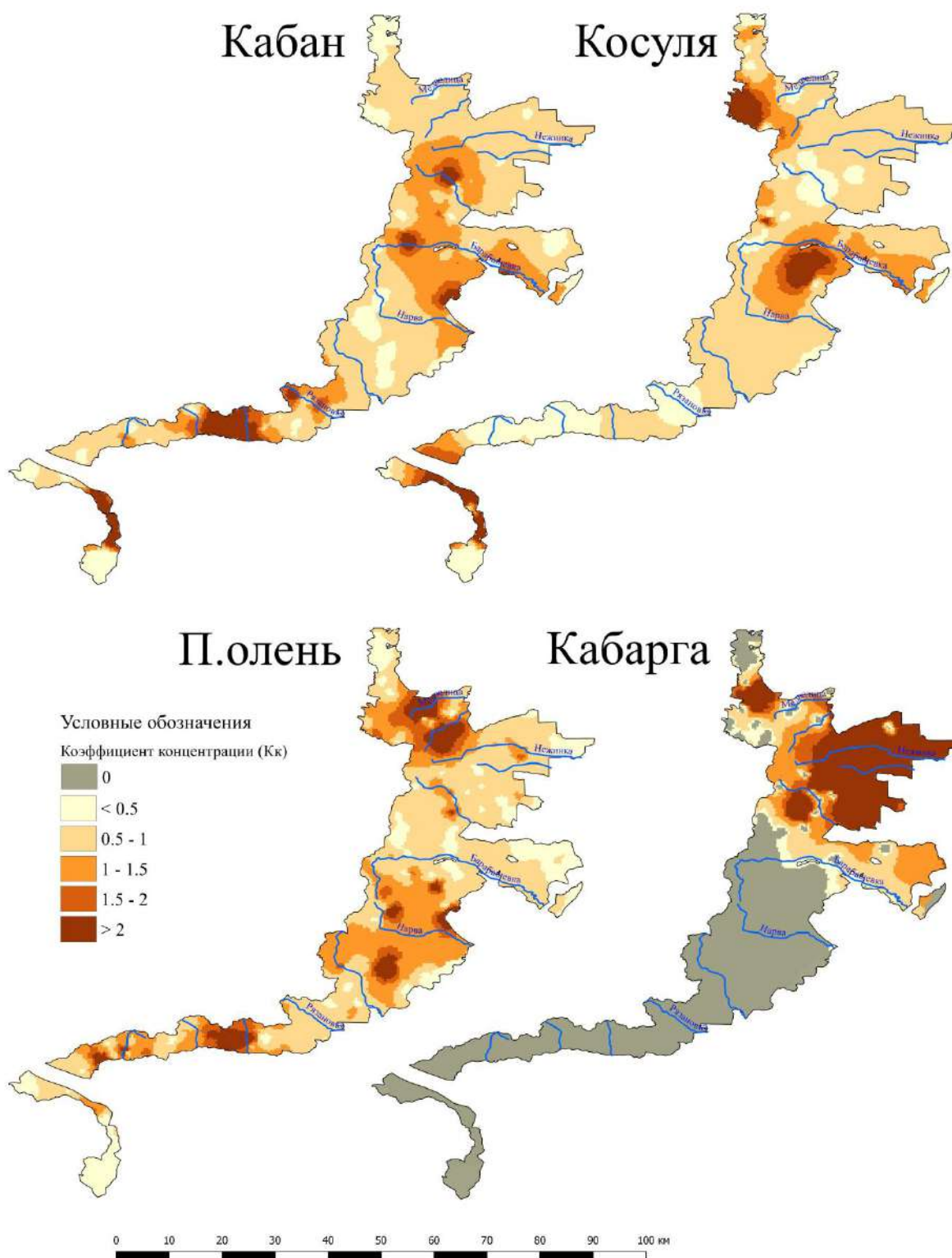


Рис. 3. Относительное распределение населения копытных животных на территории национального парка «Земля леопарда» на основе данных фотомониторинга
Fig. 3. Relative distribution of the population of ungulates in the Land of the Leopard National Park based on photomonitoring data

Среди изученных видов копытных наиболее равномерное распределение по территории национального парка «Земля леопарда» имеет пятнистый олень, образуя несколько центров с высокими значениями концентрации (значения K_k выше 2). Наименьшее обилие пятнистых оленей на самых южных территориях, наибольшее обилие – на северном участке национального парка в долинах рек Медведица и Борисовка.

Структура населения кабана более фрагментирована и образует минимум 5 ядер высокой концентрации (значения K_k выше 2). Ядра расположены на самом южном участке национального парка, а также в верховьях реки Барабашевки, долинах рек Амба, Рязановка, Виноградная. Наиболее обширный по территории кластер с высокой концентрацией населения кабана в долине р. Виноградной.

Распределение косули имеет 3 локальных ядра с высокой концентрацией населения в северо-западной (долина реки Гранитной), центральной (территория между р. Барабашевка и р. Нарва) и южной частей национального парка.

Кабарга живет только в северной части национального парка с максимальной концентрацией особей в верховьях рек Нежинка и Ананьевка.

Важным естественным фактором распределения копытных является растительная кормовая база, определяемая растительными сообществами [Машкин и др., 2013; Аргунов и др., 2015; Панченко и др., 2019; Панкова и др., 2020]. Для определения обилия копытных по лесным насаждениям различного типа на территории национального парка были подсчитаны средние K_k по кластерам с различным типом главенствующих пород деревьев. На рис. 4 представлен график распределения копытных по лесам 4 наиболее распространенных типов.

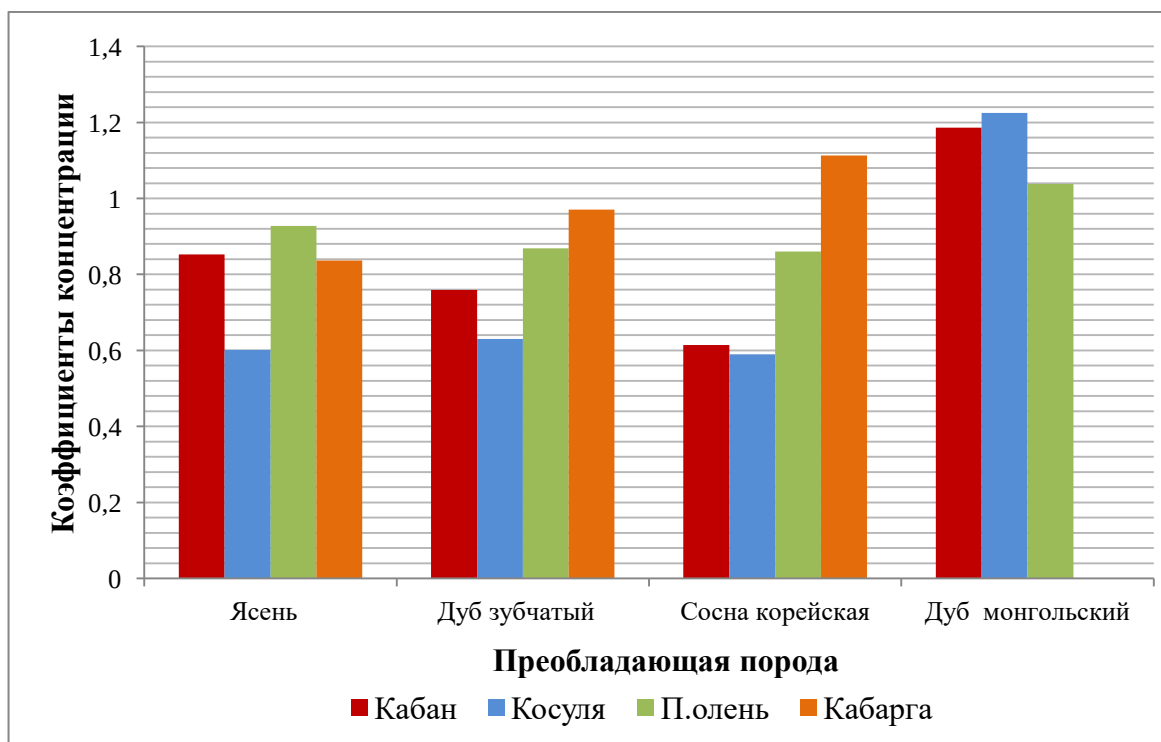


Рис. 4. Коэффициенты концентрации копытных в лесах с различной преобладающей породой, по данным фотомониторинга
Fig. 4. Coefficient of concentration of ungulate populations in forests with different dominant species, according to photomonitoring data

Кабан в большей степени предпочитает леса с преобладанием дуба монгольского ($K_k = 1,19$). Значительно снижается обилие вида в лесах с сосной корейской ($K_k = 0,61$), чуть выше обилие в лесах с преобладанием ясеня ($K_k = 0,94$) и дуба зубчатого ($K_k = 0,76$). Косуля также в первую очередь концентрируется в лесах с преобладанием дуба монгольского ($K_k = 1,22$). В лесах с преобладанием других пород деревьев их обилие ниже практически в 2 раза ($K_k = 0,59–0,62$). Пятнистый олень имеет относительно равномерное распределение по лесам различного типа, K_k разнится от 0,86 до 1,04. Для кабарги наибольшее значения имеют леса с преобладанием сосны корейской ($K_k = 1,11$), при этом в зонах преобладания дуба монгольского данный вид практически не встречается (значения K_k незначительно выше 0).

Таким образом, для кабана и косули в насаждениях дуба монгольского, вероятней всего, складываются благоприятные условия по обеспечению кормовой базы и поддержанию высоких плотностей населения. Большее обилие кабанов на участках с дубом отмечалось так же в работах других авторов [Kim et al., 2019]. Пятнистый олень менее избирателен и способен поддерживать высокую плотность почти на всей территории национального парка «Земля леопарда» вне зависимости от преобладающей породы лесных сообществ. Для кабарги стоит отметить, что распределение обусловлено высокими запасами в лесах сосны корейской эпифитных лишайников, которые являются значительным компонентом ее зимнего питания (около 60 %). Наличие лишайникового корма в значительной степени определяет распределение кабарги, согласно выводам, представленным в работах других авторов [Устинов, 1969; Приходько, 2003; Зайцев, 2006; Кривошапкин, 2008; Доманов, 2013].

Также в ходе исследования производился расчет коэффициентов концентраций для копытных по диапазонам абсолютных высот в национальном парке «Земля леопарда». Полученные результаты представлены в виде диаграммы на рис. 5.

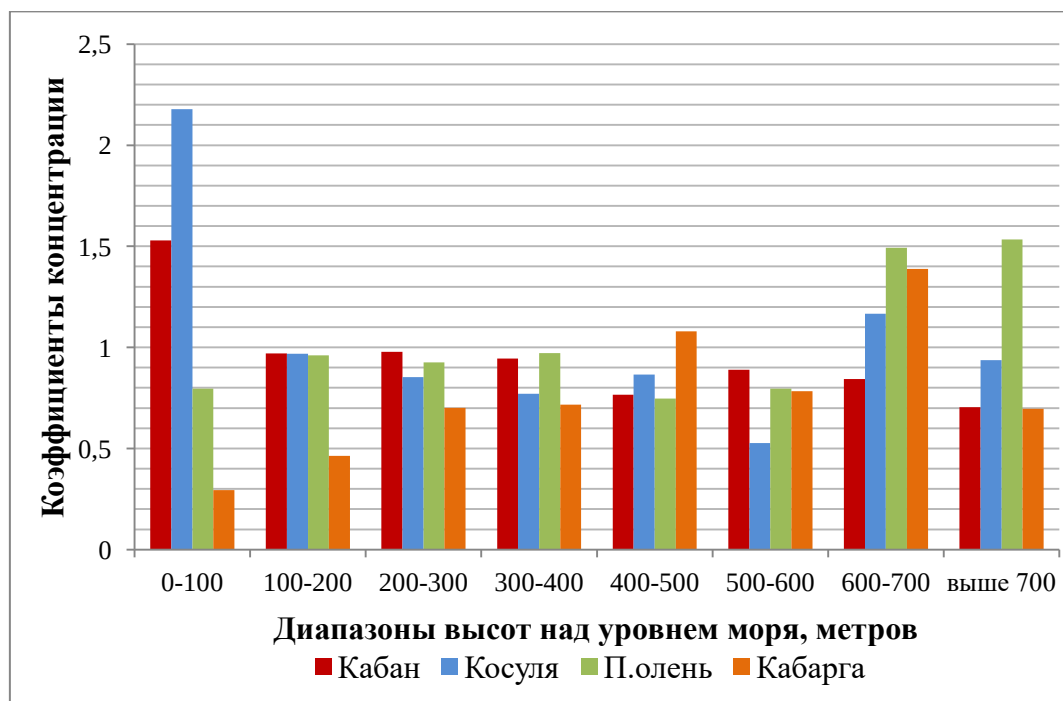


Рис. 5. Коэффициенты концентраций для копытных по диапазонам высот на территории национального парка «Земля леопарда» на основе данных фотомониторинга

Fig. 5. Concentration coefficients of the ungulate population by altitude ranges in the Land of the Leopard National Park, based on photomonitoring data

По результатам можно сделать выводы, что кабан тяготеет к нижним диапазонам высот, с максимальными значениями обилия в диапазоне ниже 100 м над уровнем моря ($K_k = 1,52$). С увеличением значений высот обилие снижается, достигая минимальных показателей на высотах выше 700 м над уровнем моря ($K_k = 0,70$). Распределение косули по диапазонам высот имеет два пиковых значения: на высотах ниже 100 м ($K_k = 2,18$) и в диапазоне 600–700 м ($K_k = 1,17$). Указанные особенности могут быть связаны как с двумя отдельными локальными группами особей, так и с внутригодовым перемещением животных между высотными и низкими участками [Danilkin et al., 1992; Ramanzin et al., 2007; Igota et al., 2009; Martin et al., 2018], так как значения K_k основывается на значениях относительного обилия, одни и те же животные будут фиксироваться на разных участках в течение года. В схожих исследованиях на сопредельной территории Китая [Wang et al., 2023], косуля, напротив, имеет большее обилие на горных участках, что может быть связано как с различной степенью действия антропогенных факторов в долинах, так и с природными различиями в растительности на восточных и западных частях хребта Черных гор. Пятнистый олень предпочитает возвышенности, достигая максимальных значений K_k на высотах более 700 м над уровнем моря ($K_k = 1,53$). В низинах обилие пятнистого оленя значительно ниже, на высотах ниже 100 м пятнистые олени имеют K_k около 0,8, что ниже концентраций кабана и косули. Распределение пятнистых оленей по высотам расходится с данными других авторов [Aramilev et al., 2009], где говорится об основном местообитании пятнистого оленя в Приморском крае на высотах ниже 500 м. Однако на других территориях местообитания пятнистого оленя могут располагаться на еще более высоких частях вертикального профиля, что в большей степени определяется растительностью [Takeuch et al., 2011; Nata et al., 2021]. Для кабарги наибольшая концентрация характерна для высотного диапазона 600–700 м ($K_k = 1,40$), на высотах менее 100 м кабарга встречается гораздо реже, значение K_k для данного диапазона высот составляют 0,30. Абсолютная высота является значащим фактором обуславливающим распределение населения копытных как на территории национального парка «Земля леопарда», так и для иных территориях [Батхиев, 2010; Sun et al., 2022; Середкин, Петруненко, 2023].

Заключение

Распределение копытных на территории национального парка «Земля леопарда» имеет различные особенности. Пространственная динамика показателя обилия связана как с растительными сообществами, так и абсолютными высотами над уровнем моря. В целом для структуры распределения копытных характерно наличие нескольких локальных центров концентрации.

Результаты показали, что численность вида напрямую влияет на структуру его пространственного распределения: у многочисленных видов (пятнистый олень) формируется множество ядер концентрации, тогда как у малочисленных (кабарга) ареал фрагментирован и ограничен специфичными биотопами.

Кабан на территории распределен не равномерно. Наибольшее обилие отмечено в лесных сообществах с преобладанием дуба монгольского, наименьшее – с сосной корейской. В высотном распределении предпочитают участки ниже 100 м над уровнем моря. Это говорит о том, что наиболее благоприятные кормовые условия для кабана формируются на низинных насаждениях дуба монгольского.

Распределение косули имеет фрагментарный характер, образуя три локальных центра высокой степени обилия. Предпочтение косули отдают лесам с преобладанием дуба монгольского, что схоже с распределением кабана. При этом предпочтение косулей лесов с преобладанием дуба монгольского значительно более выражено, значения K_k в

2 раза превышают K_k для лесов других пород. В высотном отношении для косули было выявлено два пика концентрации на участках с абсолютной высотой менее 100 м и 600–700 м над уровнем моря.

Пятнистый олень имеет практически равномерное распространение на территории национального парка, образуя всего несколько центров повышенной концентрации, где $K_k > 2$. Наименьшие значения K_k отмечены в центральной части парка. Изменения в распространении пятнистого оленя от растительных сообществ с преобладанием разных пород деревьев нами выявлено не было. Но отмечено, что пятнистый олень выбирает для обитания участки с высотами 500–700 м над уровнем моря и выше.

Кабарга распространена на северо-востоке территории, в лесах с преобладанием сосны корейской, в первую очередь на абсолютных высотах 500–700 м над уровнем моря.

Авторы статьи благодарят всех сотрудников отдела науки и экологического мониторинга Федерального государственного бюджетного учреждения «Объединенная дирекция государственного природного биосферного заповедника «Кедровая падь» и национального парка «Земля леопарда» им. Н.Н. Воронцова, принимавшим участие в организации работы сети фотомониторинга, сортировке и обработке данных.

Список источников

- Лесохозяйственный регламент лесничества «национальный парк «Земля леопарда» Приморского края. 2018. Владивосток, Дальневосточный филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Рослесинфорг», 88 с.
- Interpolating Surfaces in ArcGIS Special Analyst. ESRI Education Service. 2004. Electronic resource. URL: <https://www.esri.com/news/arcuser/0704/files/interpolating.pdf> (date of access 15.08.2025)
- Shuttle Radar Topography Mission Data Coverage. Electronic resource. URL: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/coverage.html> (date of access 12.07.2025)
- Types of Interpolation Methods. GIS Resources, 2016. Electronic resource. URL: http://www.gisresources.com/types-interpolation-methods_3 (date of access 12.08.2025)

Список литературы

- Аргунов А.В., Кривошапкин А.А., Боесков Г.Г. 2015. Косуля Центральной Якутии. Новосибирск, Издательство Сибирского отделения РАН, 123 с.
- Асатрян В.Л., Гамбарян Л.Р., Гукасян Э.Х. 2022. Горизонтальное распределение биомассы фитопланктона озера Севан: метод подсчета с использованием ГИС-технологий. В кн.: Научные основы сохранения и восстановления природных ресурсов озера Севан. Ростов-на-Дону, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук: 323–332.
- Бараков Р.Т. 2025. Изучение биологических особенностей различных популяций сазана (*Cyprinus carpio*) в основных водоемах Юго-Восточного Казахстана. Дис. ... док. филос. наук. Алматы, 187 с.
- Батхиев А.М. 2010. Животное население видов Чеченской Республики и его распределение по высотным поясам. Известия Чеченского государственного педагогического института, 3: 204–209.
- Блидченко Е.Ю., Сырица М.В., Марченкова Т.В. 2023. Некоторые данные об экологии азиатского барсука (*Meles leucurus amurensis*), полученные в ходе фотомониторинга ФГБУ «Земля леопарда». В кн.: Охрана и рациональное использование животных и растительных ресурсов. Материалы международной научно-практической конференции, приуроченной к 120-летию со дня рождения профессора В.Н. Скалона, Молодежный, 24–28 мая 2023. Молодежный, Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского: 29–37.
- Булахов В.Л., Пахомов А.Е., Пилипко Е.Н. 2015. Влияние роющей деятельности кабана (*Sus scrofa* Linnaeus, 1758) на компоненты различных биогеоценозов. Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология, 13: 16–26.
- Виткалова А.В., Дарман Ю.А., Марченкова Т.В. 2022. Фотомониторинг дальневосточного леопарда на территории юго-запада Приморья (2014–2020 гг.). Владивосток, Апельсин, 116 с.

- Диреганов Е.В., Лысенко И.О., Емельянов А.В. 2012. Оценка влияния оленя благородного (*Cervus elaphus*) на лесные фитоценозы при его вольерном содержании. Вестник АПК Ставрополя, 3(7): 100–103.
- Доманов Т.А. 2013. Питание и суточная активность кабарги (*Moschus moschiferus* L. 1758) в зимний период на хребте Тукурингра. Вестник ИРГСХА, 58: 35–42.
- Ербулеков С.Т., Куанышев Е.К., Климов Ф.В., Сарсенгалиев С.М., Ухов С.В., Мищенко В.П. 2021. Каспийский тюлень в казахстанской части Каспийского моря (2006–2016). Зоологический ежегодник Казахстана и Центральной Азии ОО «Союз охраны птиц Казахстана», 29: 57–88.
- Зайцев В.А. 2006. Кабарга: экология, динамика численности, перспективы сохранения. М., Центр охраны дикой природы, 119 с.
- Иванов А.Л., Молчанов Э.Н., Маремуков А.А., Сохроков А.Х., Чочаев М.М., ... Малкандуев Х.А. 2015. Особенности адаптивно-ландшафтной системы земледелия Кабардино-Балкарской республики. Нальчик, Принт-Центр, 541 с.
- Козорез А.И. 2009. Зимнее распределение копытных в лесных охотничьих угодьях северо-восточной части Налибокской пуши. В кн.: Проблемы сохранения биологического разнообразия и использования биологических ресурсов. Международная научно-практическая конференция и X зоологическая конференция, Минск, 18–20 ноября 2009. Минск, Мэджик, Ч. 2: 438–441.
- Коньков А.Ю. 2015. Пастбищная дигрессия чёрнопихтово-широколиственных лесов при длительном перевыпасе оленей в Южном Приморье. В кн.: Форум устойчивого развития сельских территорий и поселений Сибири и Дальнего Востока «Сибирский земельный конгресс». Сборник материалов, Иркутск, 10–13 ноября 2015. Иркутск, Издательство Оттиск: 67–70.
- Коньков А.Ю. 2017. Пастбищная дигрессия лесов Лазовского заповедника. В кн.: XII дальневосточная конференция по заповедному делу. Материалы научной конференции, Биробиджан, 10–13 октября 2017. Биробиджан, Институт комплексного анализа региональных проблем Дальневосточного отделения РАН: 130–132.
- Кривошапкин А.А. 2008. Кабарга (*Moschus moschiferus* Linnaeus, 1758) Якутии. Вестник Якутского государственного университета, 5(3): 5–9.
- Кришук И.А., Шакур В.В., Кришук И.А., Соловей И.А., Велигуров П.А., Ларченко А.И., Машков Е.И. 2023. Дистанционное наблюдение с помощью фотоловушек в фаунистических исследованиях. В кн.: Зоологические чтения. Гродно, ГрГУ: 151–153.
- Маковкин Л.И. 1999. Дикий пятнистый олень Лазовского заповедника и сопредельных территорий (Материалы исследований 1981–1996 гг.). Владивосток, Русский остров, 133 с.
- Марченкова Т.В. 2021. Использование современного программного обеспечения для организации и оптимизации работы с базой данных фотомониторинга на примере национального парка «Земля леопарда». Труды Мордовского государственного природного заповедника им. П.Г. Смидовича, 28: 154–159.
- Машкин В.И., Гревцев В.И., Машкин В.И., Колесников В.В. 2013. Емкость среды обитания охотничьих зверей и птиц. Киров, ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, 333 с.
- Панкова Н.Л., Марков Н.И., Васина А.Л. 2020. Влияние роющей деятельности кабана *Sus scrofa* на растительные сообщества средней тайги Западной Сибири. Российский журнал биологических инвазий, 13(3): 77–88.
- Панченко Д.В., Данилов П.И., Тирронен К.Ф., Паасиваара А., Красовский Ю.А. 2019. Особенности распределения копытных млекопитающих в пределах карельской части Зеленого пояса Фенноскандии. Труды КарНЦ РАН, 4: 119–129. <http://dx.doi.org/10.17076/them997>
- Петров Т.А., Максимова Д.А., Марченкова Т.В., Дарман Ю.А. 2022. Оценка состояния популяционных группировок копытных животных заповедника «Кедровая падь» на основании данных фотомониторинга. Экосистемы, 30: 138–150.
- Петров Т.А., Дарман Ю.А., Сторожук В.Б., Титов А.С. 2024. Численность диких копытных животных на территории Уссурийского заповедника и сопредельных охотничьих хозяйств по результатам авиаучета (2023 г.). Амурский зоологический журнал, 16(3): 731–746.
- Присяжнюк В.Е., Присяжнюк Н.П. 1974. Пятнистые олени (*Cervus nippon*) на о. Аскольд. Бюллетень Московского общества испытателей природы, отдел биологический, 79(3): 16–27.

- Приходько В.И. 2003. Кабарга. Происхождение, систематика, экология, поведение и коммуникация. М., ГЕОС, 443 с.
- Прокопенко С.В., Нестерова Н.И. 2019. Растения маньчжурского неморального комплекса на верхнем пределе распространения в горах южной части Сихотэ-Алиня. Ботанический журнал, 104(10): 1541–1560. <https://doi.org/10.1134/S0006813619100107>
- Русанов Я.С., Сорокина Л.И. 1984. Лес и копытные. М., Лесная промышленность, 128 с.
- Середкин И.В., Петруненко Ю.К. 2023. Высотное распределение бурых медведей в четырех регионах Дальнего Востока России. Тихоокеанская география, 3: 90–100. https://doi.org/10.35735/26870509_2023_15_8
- Устинов С.К. 1969. Зимнее питание кабарги (*L. Moschus moschiferus* 1758) на Восточном Саяне. Зоологический журнал, 58(10): 1558–1563.
- Царалунга В.В., Царалунга А.В., Долгих К.К. 2020. Роль копытных в восстановлении хвойных насаждений. Лесотехнический журнал, 1(37): 76–85. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.1/8>
- Шакун В.В., Панченко Д.В., Соловей И.А., Кришук И.А., Велигуров П., ... Ларченко А. 2020. Роль оленьих (*Cervidae*) в формировании сосновых насаждений европейской части южной тайги. Norwegian Journal of Development of the International Science, 42–2: 13–19.
- Aramilev V.V. 2009. Sika Deer in Russia. In: Sika Deer. Ed. by McCullough D.R., Takatsuki S., Kaji K. Tokyo, Springer: 475–499. https://doi.org/10.1007/978-4-431-09429-6_33
- Botts R.T., Eppert A.A., Wiegman T.J., Rodriguez A., Blankenship S.R., ... Mooring M.S. 2020. Circadian Activity Patterns of Mammalian Predators and Prey in Costa Rica. Journal of Mammalogy, 101(5): 1313–1331. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyaa103>
- Danilkin A.A., Darman Yu.A., Minayev A.N. 1992. The Seasonal Migrations of a Siberian Roe Deer Population. Revue d'Écologie, 47(3): 231–243. <https://doi.org/10.3406/revec.1992.2405>
- Hata A., Nakashita R., Fukasawa K., Minami M., Fukue Y., ... Takada M.B. 2021. Occurrence Patterns of Crop-Foraging Sika Deer Distribution in an Agriculture–Forest Landscape Revealed by Nitrogen Stable Isotopes. Ecology and Evolution, 11(21): 15303–15311. <https://doi.org/10.1002/ece3.8216>
- Igota H., Sakuragi M., Uno H. 2009. Seasonal Migration of Sika Deer on Hokkaido Island, Japan. In: Sika Deer. Ed. by McCullough D.R., Takatsuki S., Kaji K. Tokyo, Springer: 251–272. https://doi.org/10.1007/978-4-431-09429-6_19
- Kelly M.J., Holub E.L. 2008. Camera Trapping of Carnivores: Trap Success Among Camera Types and Across Species, and Habitat Selection by Species, on Salt Pond Mountain, Giles County, Virginia. Northeastern naturalist, 15(2): 249–262. [https://doi.org/10.1656/1092-6194\(2008\)15\[249:CTOCTS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1656/1092-6194(2008)15[249:CTOCTS]2.0.CO;2)
- Kim Y., Cho S., Choung Y. 2019. Habitat Preference of Wild Boar (*Sus Scrofa*) for Feeding in Cool-Temperate Forests. Journal of Ecology and Environment, 43(1): 30. <https://doi.org/10.1186/s41610-019-0126-3>
- Martin J., Tolon V., Morellet N., Santin-Janin H., Licoppe A., ... Saïd S. 2018. Common Drivers of Seasonal Movements on the Migration – Residency Behavior Continuum in a Large Herbivore. Scientific Reports, 8(1): 7631. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25777-y>
- Matiukhina D., Vitkalova A., Rybin A., Aramilev V., Shevtsova E., Miquelle D. 2016. Camera-Trap Monitoring of Amur Tiger (*Panthera Tigris Altaica*) in Southwest Primorsky Krai, 2013–2016: Preliminary Results. Nature Conservation Research, 1(3): 36–43. <https://doi.org/10.24189/ncr.2016.025>
- Palmer M.S., Swanson A., Kosmala M., Arnold T., Packer C. 2018. Evaluating Relative Abundance Indices for Terrestrial Herbivores from Large-Scale Camera Trap Surveys. African Journal of Ecology, 56(4): 791–803. <https://doi.org/10.1111/aje.1256>
- Ramanzin M., Sturaro E., Zanon D. 2007. Seasonal Migration and Home Range of Roe Deer (*Capreolus Capreolus*) in the Italian Eastern Alps. Canadian Journal of Zoology, 85(2): 280–289. <https://doi.org/10.1139/Z06-210>
- Ramirez J.I. 2021. Uncovering the Different Scales in Deer-Forest Interactions. Ecology and Evolution, 11(10): 5017–5024. <https://doi.org/10.1002/ece3.7439>
- Sun Y., Hu H., Gong C., Yang D., Su L., ... Zhang H. 2022. Diversity and Vertical Distribution Patterns of Wildlife in Tianzhushan, Shaanxi Province, China. Biodiversity Data Journal, 10(3): e79923. <https://doi.org/10.3897/BDJ.10.e79923>

- Takeuchi T., Kobayashi T., Nashimoto M. 2011. Altitudinal Differences in Bark Stripping by Sika Deer in the Subalpine Coniferous Forest of Mt. Fuji. *Fuel and Energy Abstracts*, 261(11): 2089–2095. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.03.002>
- Ueno M., Iijima H., Inatomi Y., Yamaguchi S., Takafumi H., Uno H. 2025. Spatial Variation in Local Population Dynamics of Sika Deer, *Cervus Nippon*, Through Intensified Management. *Journal of Wildlife Management*, 89: e70069.
- Wang L., Feng J., Mou P., Wang T. 2023. Relative Abundance of Roe Deer (*Capreolus Pygargus*) Related to Overstory Structure and Understory Food Resources in Northeast China. *Global Ecology and Conservation*, 46: e02542. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02542>

References

- Argunov A.V., Krivoschapkin A.A., Boeskorov G.G. 2015. Roe Deer in Central Yakutia. Novosibirsk, Publ. Sibirskogo otdeleniya RAN, 123 p. (in Russian).
- Asatryan V.L., Gambaryan L.R., Gukasyan E.Kh. 2022. Gorizontalkoye raspredeleniye biomassy fitoplanktona ozera Sevan: metod podscheta s ispolzovaniyem GIS-tehnologiy [Horizontal Distribution of Phytoplankton Biomass of Lake Sevan: a Method of Calculation Using GIS Technologies]. In: *Nauchnyye osnovy sokhraneniya i vosstanovleniya prirodnikh resursov ozera Sevan* [Scientific Foundations of Conservation and Restoration of Natural Resources of Lake Sevan]. Rostov-na-Donu, Publ. Federalnyy issledovatel'skiy tsentr Yuzhnyy nauchnyy tsentr Rossiyskoy akademii nauk: 323–332.
- Barakov R.T. 2025. Izucheniye biologicheskikh osobennostey razlichnykh populyatsiy sazana (*Cyprinus carpio*) v osnovnykh vodoyemakh Yugo-Vostochnogo Kazakhstana [Study of Biological Features of Various Populations of Carp (*Cyprinus carpio*) in the Main Reservoirs of Southeastern Kazakhstan]. Dis. ... doc. philos. sciences. Almaty, 187 p.
- Batkhiyev A.M. 2010. Types of Population of Chechen Republic and Its Allocation on Altitudinalbelts. *Proceedings of Chechen State Pedagogical University*, 3: 204–209 (in Russian).
- Blidchenko E.Y., Syritsa M.V., Marchenkova T.V. 2023. Some Data on the Ecology of the Asian Badger (*Meles Leucurus Amurensis*), Obtained During Photomonitoring Fsbu «Land of the Leopard». In: *Conservation and Rational Use of Animal and Plant Resources. Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 120th anniversary of the birth of Professor V.N. Skalon, Molodezhnyy*, 24–28 May 2023. Molodezhnyy, Publ. Irkutskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet im. A.A. Yezhevskogo: 29–37 (in Russian).
- Bulakhov V.L., Pakhomov A.E., Pilipko E.N. 2015. Effect of Wild Boar's (*Sus Scrofa*, L.) Burrowing Activity on Components of Different Biogeocenoses. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series «Biology. Ecology»*, 13: 16–26 (in Russian).
- Vitkalova A.V., Darman Yu.A., Marchenkova T.V. 2022. Fotomonitoring dalnevostochnogo leoparda na territorii yugo-zapada Primoria (2014–2020 gg.) [Photomonitoring of the Far Eastern Leopard in the South-West of Primorye (2014–2020)]. Vladivostok, Publ. Apelsin, 116 p.
- Direganov E.V., Lysenko I.O., Yemelyanov A.V. 2012. The Assessment of the Influence of Red Deer (*Cervus Elaphus*) on Forest Phytosenoze Under Its Enclosure Keeping. *Agrarian Bulletin of Stavropol Region*, 3(7): 100–103 (in Russian).
- Domanov T.A. 2013. Musk Deer *Moschus Moschiferus* L. 1758 Nutrition and Daily Activity in the Tukuringra Mountain Range, Russian far East, During Winter Season. *Vestnik IrGSKHA*, 58: 35–42 (in Russian).
- Yerbulekov S.T., Kuanyshhev E.K., Klimov F.V., Sarsengaliyev S.M., Ukhov S.V., Mishchenko V.P. 2021. Kaspiyskiy tyulen v kazakhstanskoy chasti Kaspiyskogo morya (2006–2016) [Caspian Seal in the Kazakh Part of the Caspian Sea (2006–2016)]. *Zoologicheskyy ezhegodnik Kazakhstana i Tsentralnoy Azii OO «Soyuz okhrany ptits Kazakhstana»*, 29: 57–88.
- Zaytsev V.A. 2006. Kabarga: ekologiya, dinamika chislennosti, perspektivy sokhraneniya [Musk Deer: Ecology, Population Dynamics, Conservation Prospects]. Moscow, Publ. Tsentr okhrany dikoy prirody, 119 p.
- Ivanov A.L., Molchanov E.N., Maremukov A.A., Sokhrokov A.Kh., Chochayev M.M., ... Malkanduyev Kh.A. 2015. Osobennosti adaptivno-landshaftnoy sistemy zemledeliya Kabardino-Balkarskoy

- respubliki [Features of the Adaptive Landscape Farming System of the Kabardino-Balkarian Republic]. Nalchik, Publ. Print-Tsentr, 541 p.
- Kozorez A.I. 2009. Zimneye raspredeleniye kopytnykh v lesnykh okhotnichikh ugodiakh severovostochnoy chasti Nalibokskoy pushchi [Winter Distribution of Ungulates in Forest Hunting Grounds of the North-eastern Part of Nalibokskaya Pushcha]. In: Problemy sokhraneniya biologicheskogo raznoobraziya i ispolzovaniya biologicheskikh resursov [Problems of Conservation of Biological Diversity and Use of Biological Resources]. International scientific and practical conference and X zoological conference, Minsk, 18–20 November 2009. Minsk, Publ. Magic, Vol. 2: 438–441.
- Konkov A.Yu. 2015. Pastbishchnaya digressiya chernopikhtovo-shirokolistvennykh lesov pri dlitelnom perevypase oleney v Yuzhnom Primorye [Pasture Digression of Black Fir and Broadleaf Forests During Long-Term Overgrazing of Deer in Southern Primorye]. In: Forum ustoychivogo razvitiya selskikh territoriy i poseleniy Sibiri i Dalnego Vostoka «Sibirskiy zemelnyy kongress» [Forum for Sustainable Development of Rural Areas and Settlements in Siberia and the Far East "Siberian Land Congress"]. Collection of materials, Irkutsk, 10–13 November 2015. Irkutsk, Publ. Ottisk: 67–70.
- Konkov A.Yu. 2017. Pastbishchnaya digressiya lesov Lazovskogo zapovednika [Pasture Digression of Forests in the Lazovsky Nature Reserve]. In: XII dalnevostochnaya konferentsiya po zapovednomu delu. Materialy nauchnoy konferentsii [XII Far Eastern Conference on Nature Reserve Management]. Proceedings of the scientific conference, Birobidzhan, 10–13 October 2017. Birobidzhan, Publ. Institut kompleksnogo analiza regionalnykh problem Dalnevostochnogo otdeleniya RAN: 130–132.
- Krivoshapkin A.A. 2008. Musk-Deer (*Moschus Moschiferus Linnaeus*, 1758) in Yakutia. Vestnik Yakutskogo gosudarstvennogo universiteta, 5(3): 5–9 (in Russian).
- Krishchuk I.A., Shakun V.V., Krishchuk I.A., Solovey I.A., Veligurov P.A., Larchenko A.I., Mashkov E.I. 2023. Remote Observation with the Help of Camera Traps in Faunal Research. In: Zoological readings. Grodno, Publ. GrGU: 151–153 (in Russian).
- Makovkin L.I. 1999. Dikiy pyatnistyy olen Lazovskogo zapovednika i sopredelnykh territoriy (Materialy issledovaniy 1981–1996 gg.) [Wild Sika Deer of the Lazovsky Nature Reserve and Adjacent Territories (Research Materials from 1981–1996)]. Vladivostok, Publ. Russkiy ostrov, 133 p.
- Marchenkova T.V. 2021. Using Modern Software for Organization and Optimization Work with the Camera Trap Monitoring Database on the Example of «The Land of the Leopard» National Park. 2021. Trudy Mordovskogo gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika im. P.G. Smidovicha, 28: 154–159 (in Russian).
- Mashkin V.I., Grevtsev V.I., Mashkin V.I., Kolesnikov V.V. 2013. Emkost sredy obitaniya okhotnichikh zverey i ptits [Habitat Capacity of Hunting Animals and Birds]. Kirov, Publ. FGBOU VPO Vyatskaya GSKHA, 333 p.
- Pankova N.L., Markov N.I., Vasina A.L. 2020. Effect of Wild Boar (*Sus Scrofa*) Rootings on Plant Communities in Middle Taiga of Western Siberia. Russian Journal of Biological Invasions, 13(3): 77–88 (in Russian).
- Panchenko D.V., Danilov P.I., Tirronen K.F., Paasivaara A., Krasovskiy Yu.A. 2019. Features of Ungulates Distribution in the Karelian Part of the Green Belt of Fennoscandia. Transactions of KarRC RAS, 4: 119–129 (in Russian). <http://dx.doi.org/10.17076/them997>
- Petrov T.A., Maksimova D.A., Marchenkova T.V., Darman Yu.A. 2022. Assessment of Ungulate Populations in Kedrovaya Pad Nature Reserve, Based on Photomonitoring Data. Ekosistemy, 30: 138–150 (in Russian).
- Petrov T.A., Darman Yu.A., Storozhuk V.B., Titov A.S. 2024. Number of Wild Ungulates in the Ussuriyskiy Nature Reserve and Neighboring Hunting Grounds Based on the Results of Aerial Surveys. Amurian Zoological Journal, 16(3): 731–746 (in Russian).
- Prisyazhnyuk V.E., Prisyazhnyuk N.P. 1974. Pyatnistyye oleni (*Cervus nippon*) na o. Askold [Sika deer (*Cervus nippon*) on Askold Island]. Byulleten Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody, otdel biologicheskoy, 79(3): 16–27.
- Prihodko V.I. 2003. Kabarga. Proiskhozhdeniye, sistematika, ekologiya povedeniye i kommunikatsiya [Origin, Systematics, Ecology, Behavior and Communication]. Moscow, Publ. GEOS, 443 p.
- Prokopenko S.V., Nesterova N.I. 2019. Plants of Manchurian Nemoral Complex at the Upper Limit of Distribution in the Mountains of the Southern Part of Sikhote-Alin. Botanical Journal, 104(10): 1541–1560 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0006813619100107>

- Rusanov Ya.S., Sorokina L.I. 1984. Les i kopytnyye [Forest and Ungulates]. Moscow, Publ. Lesnaya promyshlennost, 128 p.
- Seryodkin I.V., Petrunenko Yu.K. 2023. Altitude Distribution of Brown Bears in Four Regions of the Russian Far East. Pacific Geography, 3: 90–100 (in Russian). https://doi.org/10.35735/26870509_2023_15_8
- Ustinov S.K. 1969. Zimneye pitaniye kabargi (*L. Moschus moschiferus* 1758) na Vostochnom Sayane [Winter Feeding of Musk Deer (*L. Moschus moschiferus* 1758) in the Eastern Sayan]. Zoologicheskii zhurnal, 58(10): 1558–1563.
- Tsarlunga V.V., Tsarlunga A.V., Dolgikh K.K. 2020. Role of Ungulates in the Restoration of Coniferous Plantations. Forestry Engineering Journal, 1(37): 76–85 (in Russian). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.1/8>
- Shakun V.V., Panchenko D.V., Solovej I.A., Kryshchuk I.A., Velihurov P., ... Larchenko A. 2020. Influence of the Cervidae on the Southern Taiga Pine Forest Formation. Norwegian Journal of Development of the International Science, 42–2: 13–19 (in Russian).
- Aramilev V.V. 2009. Sika Deer in Russia. In: Sika Deer. Ed. by McCullough D.R., Takatsuki S., Kaji K. Tokyo, Springer: 475–499. https://doi.org/10.1007/978-4-431-09429-6_33
- Botts R.T., Eppert A.A., Wiegman T.J., Rodriguez A., Blankenship S.R., ... Mooring M.S. 2020. Circadian Activity Patterns of Mammalian Predators and Prey in Costa Rica. Journal of Mammalogy, 101(5): 1313–1331. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyaa103>
- Danilkin A.A., Darman Yu.A., Minayev A.N. 1992. The Seasonal Migrations of a Siberian Roe Deer Population. Revue d'Écologie, 47(3): 231–243. <https://doi.org/10.3406/rev.1992.2405>
- Hata A., Nakashita R., Fukasawa K., Minami M., Fukue Y., ... Takada M.B. 2021. Occurrence Patterns of Crop-Foraging Sika Deer Distribution in an Agriculture–Forest Landscape Revealed by Nitrogen Stable Isotopes. Ecology and Evolution, 11(21): 15303–15311. <https://doi.org/10.1002/ece3.8216>
- Igota H., Sakuragi M., Uno H. 2009. Seasonal Migration of Sika Deer on Hokkaido Island, Japan. In: Sika Deer. Ed. by McCullough D.R., Takatsuki S., Kaji K. Tokyo, Springer: 251–272. https://doi.org/10.1007/978-4-431-09429-6_19
- Kelly M.J., Holub E.L. 2008. Camera Trapping of Carnivores: Trap Success Among Camera Types and Across Species, and Habitat Selection by Species, on Salt Pond Mountain, Giles County, Virginia. Northeastern naturalist, 15(2): 249–262. [https://doi.org/10.1656/1092-6194\(2008\)15\[249:CTOCTS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1656/1092-6194(2008)15[249:CTOCTS]2.0.CO;2)
- Kim Y., Cho S., Choung Y. 2019. Habitat Preference of Wild Boar (*Sus Scrofa*) for Feeding in Cool-Temperate Forests. Journal of Ecology and Environment, 43(1): 30. <https://doi.org/10.1186/s41610-019-0126-3>
- Martin J., Tolon V., Morellet N., Santin-Janin H., Licoppe A., ... Saïd S. 2018. Common Drivers of Seasonal Movements on the Migration – Residency Behavior Continuum in a Large Herbivore. Scientific Reports, 8(1): 7631. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25777-y>
- Matiukhina D., Vitkalova A., Rybin A., Aramilev V., Shevtsova E., Miquelle D. 2016. Camera-Trap Monitoring of Amur Tiger (*Panthera Tigris Altaica*) in Southwest Primorsky Krai, 2013–2016: Preliminary Results. Nature Conservation Research, 1(3): 36–43. <https://doi.org/10.24189/ncr.2016.025>
- Palmer M.S., Swanson A., Kosmala M., Arnold T., Packer C. 2018. Evaluating Relative Abundance Indices for Terrestrial Herbivores from Large-Scale Camera Trap Surveys. African Journal of Ecology, 56(4): 791–803. <https://doi.org/10.1111/aje.1256>
- Ramanzin M., Sturaro E., Zanon D. 2007. Seasonal Migration and Home Range of Roe Deer (*Capreolus Capreolus*) in the Italian Eastern Alps. Canadian Journal of Zoology, 85(2): 280–289. <https://doi.org/10.1139/Z06-210>
- Ramirez J.I. 2021. Uncovering the Different Scales in Deer-Forest Interactions. Ecology and Evolution, 11(10): 5017–5024. <https://doi.org/10.1002/ece3.7439>
- Sun Y., Hu H., Gong C., Yang D., Su L., ... Zhang H. 2022. Diversity and Vertical Distribution Patterns of Wildlife in Tianzhushan, Shaanxi Province, China. Biodiversity Data Journal, 10(3): e79923. <https://doi.org/10.3897/BDJ.10.e79923>

- Takeuchi T., Kobayashi T., Nashimoto M. 2011. Altitudinal Differences in Bark Stripping by Sika Deer in the Subalpine Coniferous Forest of Mt. Fuji. Fuel and Energy Abstracts, 261(11): 2089–2095. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.03.002>
- Ueno M., Iijima H., Inatomi Y., Yamaguchi S., Takafumi H., Uno H. 2025. Spatial Variation in Local Population Dynamics of Sika Deer, Cervus Nippon, Through Intensified Management. Journal of Wildlife Management, 89: e70069.
- Wang L., Feng J., Mou P., Wang T. 2023. Relative Abundance of Roe Deer (*Capreolus Pygargus*) Related to Overstory Structure and Understory Food Resources in Northeast China. Global Ecology and Conservation, 46: e02542. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02542>

Поступила в редакцию 11.11.2025;
поступила после рецензирования 17.12.2025;
принята к публикации 11.02.2026

Received November 11, 2025;
Revised December 17, 2025;
Accepted February 11, 2026

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Плотников Илья Викторович, младший научный сотрудник отдела науки и экологического мониторинга, ФГБУ «Объединенная дирекция государственного природного биосферного заповедника «Кедровая падь» и национального парка «Земля леопарда» им. Н.Н. Воронцова (ФГБУ «Земля леопарда»), г. Владивосток, Россия

Максимова Дарья Александровна, младший научный сотрудник отдела науки и экологического мониторинга, ФГБУ «Объединенная дирекция государственного природного биосферного заповедника «Кедровая падь» и национального парка «Земля леопарда» им. Н.Н. Воронцова (ФГБУ «Земля леопарда»), г. Владивосток, Россия

Титов Алексей Сергеевич, инженер-исследователь отдела науки и экологического мониторинга, ФГБУ «Объединенная дирекция государственного природного биосферного заповедника «Кедровая падь» и национального парка «Земля леопарда» им. Н.Н. Воронцова (ФГБУ «Земля леопарда»), г. Владивосток, Россия

Сторожук Виктор Борисович, старший инженер-исследователь отдела науки и экологического мониторинга, ФГБУ «Объединенная дирекция государственного природного биосферного заповедника «Кедровая падь» и национального парка «Земля леопарда» им. Н.Н. Воронцова (ФГБУ «Земля леопарда»), г. Владивосток, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ilya V. Plotnikov, Junior Researcher, Department of Research and Environmental Monitoring, Federal State Budgetary Institution Joint Directorate of Kedrovaya Pad State Biosphere Nature Reserve and Land of the Leopard National Park, Vladivostok, Russia

Daria A. Maksimova, Junior Researcher, Department of Research and Environmental Monitoring, Federal State Budgetary Institution Joint Directorate of Kedrovaya Pad State Biosphere Nature Reserve and Land of the Leopard National Park, Vladivostok, Russia

Alexey S. Titov, Research Engineer, Department of Research and Environmental Monitoring, Federal State Budgetary Institution Joint Directorate of Kedrovaya Pad State Biosphere Nature Reserve and Land of the Leopard National Park, Vladivostok, Russia

Viktor B. Storozhuk, Senior Research Engineer, Junior Researcher Department of Research and Environmental Monitoring, Federal State Budgetary Institution Joint Directorate of Kedrovaya Pad State Biosphere Nature Reserve and Land of the Leopard National Park, Vladivostok, Russia

УДК 504.4.054

DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-3-494-506

EDN AXCWVW

Оценка гидрохимического загрязнения малых водотоков урбанизированных территорий Калининградской области

Архипов Е.А., Зотов С.И., Королева Ю.В., Яковчук Т.А.

Балтийский федеральный университет им. И. Канта
Россия, 236040, Калининград, ул. Университетская, 2
egor.arhipov2000@gmail.com, zotov.prof@gmail.com, yu.koroleff@yandex.ru
tayataya010705@gmail.com

Аннотация. Малые водотоки рассматриваются как ключевой и наиболее уязвимый компонент урбозкосистем, испытывающих интенсивную антропогенную нагрузку. Это актуально для густонаселенных регионов, таких как Калининградская область. Несмотря на существующий массив исследований малых рек региона, комплексные оценки, фокусирующиеся на водотоках ключевых городов с различной структурой антропогенного воздействия, остаются фрагментарными, что создает пробел в системных данных об уровне и пространственной дифференциации загрязнения. Целью данного исследования является комплексная оценка и сравнительный анализ уровня и характера загрязнения малых водотоков городов Светлого и Светлогорска, имеющих соответственно промышленную и рекреационную специализации. В результате исследования выявлено, что воды большинства водотоков не соответствуют нормативам по ключевым показателям. Установлены критические превышения ПДК по биогенным элементам (аммоний-ион, фосфат-ион), органическим загрязнителям (БПК₅, ХПК) и железу, а также сезонная динамика уровня загрязнения, наиболее остро проявляющаяся в летнюю межень. Полученные результаты вносят вклад в развитие методов геоэкологического мониторинга урбанизированных территорий, предоставляя репрезентативные данные о состоянии малых водотоков и имеют практическую значимость для разработки природоохранных мероприятий в Калининградской области.

Ключевые слова: малые водотоки, урбанизированные территории, геоэкологическая оценка, приоритетные загрязнители, индекс загрязнения вод, гидрохимический мониторинг, антропогенная нагрузка

Для цитирования: Архипов Е.А., Зотов С.И., Королева Ю.В., Яковчук Т.А. 2026. Оценка гидрохимического загрязнения малых водотоков урбанизированных территорий Калининградской области. Региональные геосистемы, 50(3): 494–506. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-494-506
EDN: AXCWVW

Assessing Hydrochemical Pollution of Small Watercourses in Urbanized Areas of the Kaliningrad Region

Egor A. Arkhipov, Sergey I. Zotov, Yulia V. Koroleva, Taisiya A. Yakovchuk

Immanuel Kant Baltic Federal University,
2 Universitetskaya St., Kaliningrad 236040, Russia
egor.arhipov2000@gmail.com, zotov.prof@gmail.com, yu.koroleff@yandex.ru
tayataya010705@gmail.com

Abstract. Small watercourses are considered as the key and most vulnerable component of urban ecosystems experiencing an intense anthropogenic stress, which is a pressing issue for densely populated areas such as the Kaliningrad Region. Despite the existing array of studies of small rivers in the region, comprehensive

assessments focusing on the watercourses of key cities with different structures of anthropogenic impact remain fragmented, which creates a gap in the system data on the level and spatial differentiation of pollution. The purpose of this study is a comprehensive assessment and comparative analysis of the level and nature of pollution in small watercourses in the towns of Svetly and Svetlogorsk specializing in industrial and recreational spheres, respectively. The study has revealed that the waters of most watercourses do not meet the standards for key indicators. We have established critical exceedances of MPC for biogenic elements (ammonium ion, phosphate ion), organic pollutants (biological oxygen demand (BOD₅), chemical oxygen demand (COD)) and iron, as well as seasonal dynamics of pollution levels, which are most acute in the summer. The results obtained contribute to the development of methods for geoecological monitoring of urbanized territories, providing representative data on the state of small watercourses and are of practical importance for the development of environmental protection measures in the Kaliningrad region.

Keywords: small watercourses, urbanized territories, geoecological assessment, priority pollutants, water pollution index, hydrochemical monitoring, anthropogenic load

For citation: Arkhipov E.A., Zotov S.I., Koroleva Yu.V., Yakovchuk T.A. 2026. Assessing Hydrochemical Pollution of Small Watercourses in Urbanized Areas of the Kaliningrad Region. *Regional Geosystems*, 50(3): 494–506 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-494-506 EDN: AXCWW

Введение

Малые водотоки в урбанизированных регионах России подвергаются значительной антропогенной нагрузке. Ключевым проявлением этого воздействия является хроническое превышение предельно допустимых концентраций по широкому спектру загрязнителей. В частности, отмечается устойчивое загрязнение вод нефтепродуктами и ионами тяжелых металлов, такими как медь, марганец и железо [Леонтьева и др., 2017; Зотов и др., 2021]. Параллельно фиксируется интенсивное загрязнение биогенными элементами – нитритами, аммонием и фосфатами, что характерно для районов с развитой сельскохозяйственной и промышленной деятельностью [Зотов и др., 2021; Пакулина, Платонова, 2019]. Еще одним критическим следствием антропогенного прессинга является нарушение кислородного режима, выражающееся в снижении содержания растворенного кислорода до критически низких значений в водотоках, принимающих промышленные стоки [Дмитриева, Нефедова, 2016]. Кроме того, для малых рек в урбанизированной среде характерно сильное загрязнение органическими веществами, что подтверждается высокими показателями биологического потребления кислорода (БПК₅) и перманганатной окисляемости [Козлов и др., 2019]

Рекреационная нагрузка служит значимым фактором ухудшения экологического состояния малых водотоков, что подтверждается исследованиями в различных регионах России. Установлено, что она ведет к существенному гидрохимическому загрязнению: рост показателей ХПК и БПК₅, а также концентрации биогенных элементов (азот, фосфор) напрямую коррелирует с интенсивностью посещения береговых зон [Широкова и др., 2017; Севостьянова и др., 2022]. Кроме того, рекреация вызывает прямую физическую деградацию экосистем: разрушение берегов, уничтожение растительности, захламление отходами и активизацию эрозионных процессов, что снижает устойчивость долинно-речных комплексов [Герашенко, 2014]. Даже при формальном соответствии качества воды нормативам, как в случае реки Псёл, методы биоиндикации фиксируют угнетение гидробионтов под воздействием антропогенного пресса [Бузолева и др., 2014; Медведева и др., 2024].

В условиях Калининградской области, обладающей разветвленной гидрографической сетью, большой площадью сельскохозяйственных земель, высокой долей урбанизированных территорий, оценка состояния малых водотоков, как индикаторов антропогенной нагрузки приобретает особую актуальность [Зотов, Спирин 2020]. Высокую значимость эта проблема имеет для водных объектов урбанизированных территорий, имеющих различную экономическую специализацию, к которым относятся

города Светлый (промышленный узел) и Светлогорск (рекреационный центр) в Калининградской области. Согласно данным Государственного доклада о состоянии окружающей среды Калининградской области, водные объекты региона испытывают значительную антропогенную нагрузку, что подтверждается многочисленными случаями высокого и экстремально высокого загрязнения, регистрируемыми в урбанизированных районах [Государственный доклад..., 2025]. Исследования реки Светлогорки и пруда Тихого в г. Светлогорске зафиксировали загрязнение биогенными элементами и органическими веществами [Алферов, Цветкова, 2022]. Работы, посвященные малым рекам Самбийского полуострова, выявили в их экосистемах признаки эвтрофирования и устойчивого «цветения» воды, связав эти процессы с органическим и биогенным загрязнением [Бугранова и др., 2018]. Схожие проблемы, в частности ускоренная эвтрофикация и накопление органики, характерны и для малых городских водоемов, что было показано на примере пруда Поплавок в Калининграде, где даже после проведения очистки наблюдалось быстрое ухудшение качества воды [Цупикова, Севостьянова, 2021]. Однако сравнительные исследования водотоков урбанизированных территорий с различной экономической специализацией (промышленной и рекреационной) остаются фрагментарными, что определяет необходимость проведения настоящего исследования.

Восполнение этого пробела является важной научной задачей, что и определило цель настоящего исследования – провести комплексную оценку уровня гидрохимического загрязнения малых водотоков и сравнительную оценку городов Светлого (промышленный узел) и Светлогорска (рекреационный центр). Для ее достижения предусматривается решение следующих задач: провести сравнительный анализ гидрохимических показателей, выявить приоритетные загрязняющие вещества для каждого типа территорий и оценить степень антропогенной трансформации водных объектов.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились на малых водотоках, расположенных в границах Светловского (промышленная специализация) и Светлогорского (рекреационная специализация) городских округов Калининградской области (рис. 1).

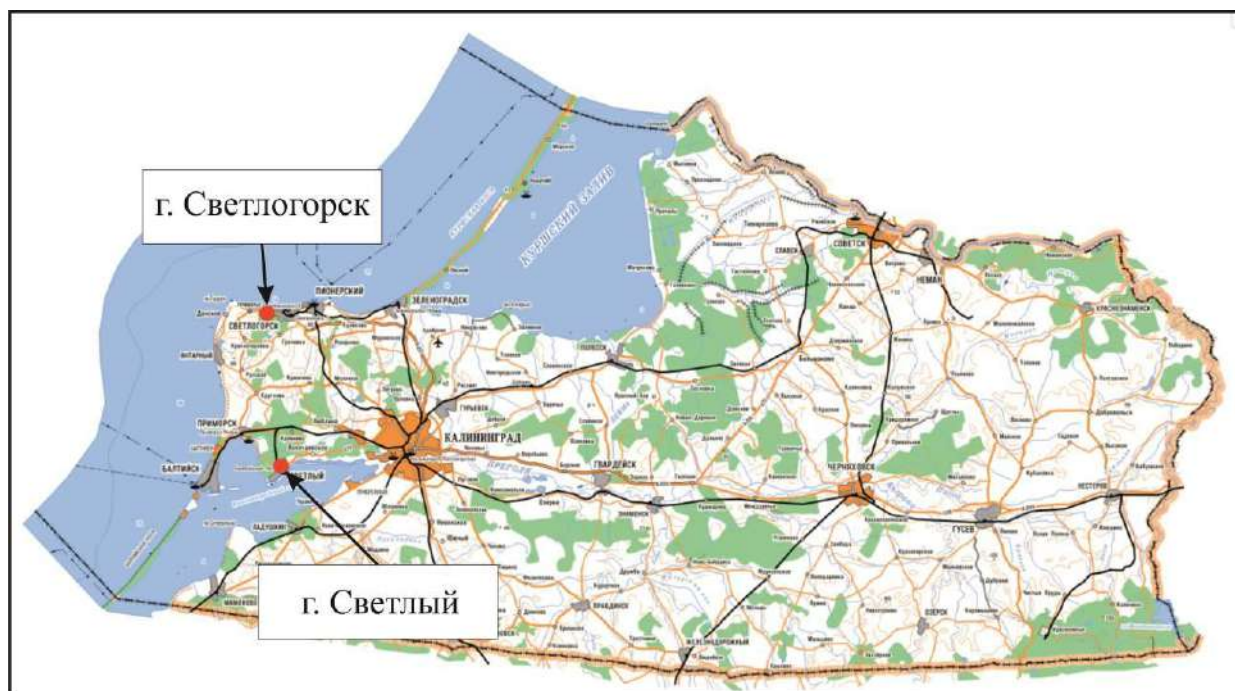


Рис. 1. Исследуемые города на карте Калининградской области
Fig. 1. Towns under study on the map of the Kaliningrad region

Городской округ Светлый представляет собой типичный индустриальный центр приморского типа. Его социально-экономический профиль в основном определяется портово-промышленными функциями, где доминируют предприятия судостроительной и нефтехимической промышленности [Белова, 2017]. Экономике города во многом определяют терминалы, специализирующиеся на перевалке светлых нефтепродуктов. Подобные комплексы, характеризующиеся значительными объемами резервуарного парка и мощностями по отгрузке, являются ключевыми элементами для портовой логистики. Численность населения на 2025 год составляет 21 630 чел. [Инвестиционный паспорт ..., 2025]. Водные объекты – городской ручей без названия (С11), р. Граевка (С12), р. Дие-Видитте (С13).

Город Светлогорск, напротив, характеризуется выраженной рекреационной специализацией, входя в число основных курортных центров Калининградской области [Федоров, 2018]. Территория муниципального образования является курортом федерального значения «Светлогорск – Отрадное». Рекреационная функция здесь как комплекс услуг, связанных с проведением отдыха, восстановлением сил и здоровья людей, использованием свободного времени, формирует основу местной экономики. Большая часть территории отведена под 1 и 2 зону округов санитарной и горно-санитарной охраны лечебно-оздоровительных местностей и курортов федерального значения. На 2025 год численность населения г. Светлогорска – 15 208 чел. [Паспорт муниципального ..., 2025]. Водные объекты – руч. Отрадненка (С14), р. Светлогорка, створ до оз. Тихого (С15), р. Светлогорка, створ после оз. Тихого (С16).

В каждом из округов было заложено по 3 контрольных пункта мониторинга. Полевые исследования выполнялись в течение 2025 года с учетом основных фаз гидрологического режима: вторая декада апреля (весенний сезон), вторая декада июля (летняя межень) и вторая декада октября (осенний период).

Размещение контрольных створов (пунктов мониторинга) определено с учетом расположения потенциальных источников антропогенного воздействия, включая выпуски ливневых стоков, промышленные площадки и жилые зоны, а также особенностей урбанизации водосборных территорий. Отбор проб воды проводили в соответствии с требованиями ГОСТ Р 59024-2020 «Вода. Общие требования к отбору проб».

Гидрохимические исследования выполнены в лаборатории Высшей школы живых систем БФУ им. И. Канта. Аналитический контроль включал определение комплекса показателей по утвержденным методикам: содержание взвешенных веществ (РД 52.24.468-2019), ХПК (ПНД Ф 14.1:2.4.190-2003), БПК₅ (ПНД Ф 14.1:2.3:4.123-97), нитратов (ПНД Ф 14.1:2.4-95), нитритов (ПНД Ф 14.1:2.4.3-95), аммонийного азота (ПНД Ф 14.1:2.1-95), фосфатов (ПНД Ф 14.1:2.1-95), сухого остатка (ПНД Ф 14.1:2.4.261-2010), хлоридов (ГОСТ 4245-72), сульфатов (ПНД Ф 14.1:2.159-2000), общего железа (ПНД Ф 14.1:2.159-2000) и нефтепродуктов (ПНД Ф 14.1:2.4.128-98). Измерения проводили с использованием двухлучевого спектрофотометра UV-1800 Shimadzu и системы капиллярного электрофореза «КАПЕЛЬ-105М».

Оценка степени загрязнения водной среды выполнена путем сопоставления с предельно допустимыми концентрациями (ПДК_в) согласно СанПиН 1.2.3685-21. Для взвешенных веществ использовали нормативы Приказа Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552. Для интегральной оценки качества вод применяли индекс загрязнения вод (ИЗВ), а для анализа условий трансформации и миграции загрязняющих веществ – коэффициент турбулентной диффузии (КТД) [Караушев, 1946].

Статистическую обработку данных проводили с расчетом стандартных параметров выборок в *Microsoft Excel*. Картографическое обеспечение исследований базировалось на материалах *SAS.Planet* и Государственной информационной системы обеспечения градостроительной деятельности (ГИСОГД) Калининградской области.

Результаты и их обсуждение

Детальный анализ гидрохимических показателей по результатам весеннего пробоотбора (табл. 1) позволяет выявить комплексные различия в структуре загрязнения водотоков промышленного г. Светлого и рекреационного г. Светлогорска.

Таблица 1
Table 1

Содержание загрязняющих веществ весной 2025 года в исследуемых створах
Content of pollutants in the studied river sections in the spring 2025

Показатель	Концентрация загрязняющих веществ мг/л						ПДКв
	г. Светлый			г. Светлогорск			
	С11	С12	С13	С14	С15	С16	
рН	6,6	6,44	7,59	7,55	7,62	7,65	6–9
БПК ₅	6,20	3,60	11,80	14,60	1,70	1,70	4
Р. кислород	6,36	5,72	6,15	5,64	5,65	5,08	4
Взвешенные в-ва	0,20	0,17	0,20	0,25	0,31	0,23	0,75
Сухой остаток	323	556	136	476	220	223	1000
Нефтепродукты	0,025	0,022	0,022	0,025	0,03	0,024	0,1
ХПК	39,5	66,8	36,5	77,5	25,8	7,6	30
Нитраты	0,543	0,143	3,323	0,983	0,705	0,130	50
Нитриты	<0,01	<0,01	0,3295	<0,01	<0,01	<0,01	0,1
Аммоний-ион	0,815	2,148	2,613	3,339	2,504	1,414	1,5
Сульфаты	16,59	20,41	45,11	5,401	18,08	25,12	100
Хлориды	15,66	14,13	22,65	11,11	12,9	13,05	300
Фосфат-ион	0,12	0,86	0,97	0,06	0,25	<0,01	1
Железо общее	0.197	<0.01	0.826	0.495	<0.01	<0.01	0.3

В водотоках г. Светлого наблюдается значительное химическое загрязнение, о чем свидетельствуют устойчивые превышения ПДКв по ХПК во всех пунктах мониторинга (1,3–2,2 раза). При этом максимальные значения БПК₅ (11,8 мг/л) зафиксированы в пункте мониторинга С13, что указывает на присутствие легкоокисляемой органики. В г. Светлогорске органическая нагрузка имеет более выраженный характер – БПК₅ достигает 14,6 мг/л (3,65 ПДКв) в пункте мониторинга С14, что свидетельствует о значительном поступлении органических веществ, вероятно, коммунально-бытового происхождения.

Анализ азотсодержащих соединений выявляет различные механизмы загрязнения. В г. Светлом отмечается локальное повышение нитритов до 0,33 мг/л (3,3 ПДКв) в пункте С13 при сохранении фоновых значений в других створах. Концентрации аммоний-иона варьируют от 0,82 до 2,61 мг/л, демонстрируя неравномерное распределение свежего органического загрязнения. В г. Светлогорске наблюдается системное превышение ПДКв по аммоний-иону во всех створах (1,41–3,34 мг/л), что указывает на постоянный источник органического загрязнения, характерный для рекреационных территорий с высокой антропогенной нагрузкой.

Содержание фосфат-иона в г. Светлом достигает 0,97 мг/л, приближаясь к ПДКв, тогда как в г. Светлогорске концентрации не превышают 0,25 мг/л.

Значительное превышение ПДКв по общему железу отмечается в г. Светлом (0,826 мг/л в пункте С13, 2,75 ПДКв), что характерно для промышленных территорий.

Наибольшие превышения ПДКв по отдельным показателям зафиксированы в г. Светлогорске (БПК₅ – 3,65 ПДКв, аммоний-ион – 2,2 ПДКв), однако г. Светлый характеризуется более разнообразным спектром загрязняющих веществ.

Результаты летних исследований (табл. 2) демонстрируют значительное ухудшение экологической ситуации на всех водотоках, особенно в условиях г. Светлого. В период летней межени в пункте мониторинга городского ручья (пункт С11) зафиксированы критические превышения ПДКв по ХПК – 179,2 мг/л (6,0 ПДКв) и БПК₅ – 15,4 мг/л (3,9 ПДКв). Наиболее тревожная ситуация сложилась в р. Дие-Видитте (пункт С13), где концентрация общего железа достигла 4,48 мг/л (14,9 ПДКв), а хлоридов – 482,7 мг/л (1,6 ПДКв), что свидетельствует о техногенном воздействии.

Таблица 2
Table 2

Содержание загрязняющих веществ летом 2025 года в исследуемых створах
Content of pollutants in the studied river sections in the summer of 2025

Показатель	Концентрация загрязняющих веществ мг/л						ПДКв
	г. Светлый			г. Светлогорск			
	С11	С12	С13	С14	С15	С16	
рН	7,79	7,55	7,58	7,36	7,44	7,25	6–9
БПК ₅	15,4	23,1	6,2	6,7	6,5	7	4
Р. кислород	2,11	5,5	5,05	5,45	5,42	4,95	4
Взвешенные в-ва	0,019	0,464	0,23	0,058	0,124	0,119	0,75
Сухой остаток	44,33	17,33	116	33,67	31	8,33	1000
Нефтепродукты	0,053	0,028	0,032	0,031	0,033	0,032	0,1
ХПК	179,2	116	111,3	85,2	42,6	78,1	30
Нитраты	1,114	0,27	<0,01	0,218	0,463	0,695	50
Нитриты	0,2646	<0,01	<0,01	0,1094	<0,01	<0,01	0,1
Аммоний-ион	3,732	1,838	1,772	6,515	8,784	0,548	1,5
Сульфаты	28,36	7,2	79,78	43,76	8,98	15,14	100
Хлориды	78,51	20,36	482,7	86,24	47,37	20,34	300
Фосфат-ион	3,38	0,49	1,52	2,05	2,46	0,88	1
Железо общее	0,576	3,005	4,477	1,505	2,039	0,760	0,3

В Светлогорске также отмечается ухудшение качества воды, характерное для летней межени. В руч. Отрадненке (пункт С14) зарегистрированы высокие концентрации аммоний-иона – 6,52 мг/л (4,3 ПДКв), р. Светлогорке (пункт С15) – 8,78 мг/л (5,9 ПДКв), что может быть связано с пиковой рекреационной нагрузкой в курортный сезон. Значительное увеличение фосфат-иона обнаружено во всех створах Светлогорска (0,88–2,46 мг/л), создавая риски эвтрофикации водоемов.

Сравнительный анализ выявляет различную структуру загрязнения: для г. Светлого характерны сверхнормативные концентрации железа и органических веществ вероятно техногенного происхождения, тогда как в г. Светлогорске доминирует азотно-фосфорное загрязнение, связанное с коммунально-бытовыми стоками. Кислородный режим в Светлом существенно нарушен – содержание растворенного кислорода в пункте мониторинга городского ручья (С11) снизилось до 2,11 мг/л при норме 4 мг/л, что создает риски для водных экосистем.

Результаты осенних исследований (табл. 3) свидетельствуют о сохранении комплексного загрязнения водотоков при некотором улучшении показателей по сравнению с летним периодом. В г. Светлом сохраняются значительные превышения ПДКв по ХПК в р. Дие-Видитте (пункт С13) – 82,9 мг/л (2,8 ПДКв) и р. Граевка (пункт С12) – 98,3 мг/л (3,3 ПДКв). Концентрация общего железа продолжает оставаться критически высокой в р. Дие-Видитте – 1,34 мг/л (4,5 ПДКв), подтверждая устойчивый характер техногенного загрязнения.

Таблица 3
Table 3

Содержание загрязняющих веществ осенью 2025 года в исследуемых створах
Content of pollutants in the studied river sections in the autumn 2025

Показатель	Концентрация загрязняющих веществ мг/л						ПДКв
	г. Светлый			г. Светлогорск			
	C11	C12	C13	C14	C15	C16	
pH	7,26	7,54	7,34	7,43	7,46	7,52	6–9
БПК ₅	10,1	6,7	18,2	5,6	3,4	5,3	4
Р. кислород	3,37	3,06	3,11	2,97	3,03	2,98	4
Взвешенные в-ва	1,26	0,35	0,22	0,85	0,06	0,61	0,75
Сухой остаток	400	473	463	520	466	303	1000
Нефтепродукты	0,027	0,015	0,016	0,004	0,012	0,017	0,1
ХПК	67,6	98,3	82,9	67,6	52,2	61,4	30
Нитраты	2,249	1,713	1,145	7,6	1,366	0,648	50
Нитриты	<0,01	<0,01	0,1696	<0,01	<0,01	<0,01	0,1
Аммоний-ион	0,417	0,817	3,29	2,21	1,54	0,314	1,5
Сульфаты	14,99	23,54	42,13	37,49	18,29	30,19	100
Хлориды	27,83	28,28	29,4	25,22	16,13	18,52	300
Фосфат-ион	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,10	1,12	1
Железо общее	0.513	0.390	1.335	0.112	0.329	0.822	0.3

В г. Светлогорске наблюдается нормализация азотного режима, однако сохраняются повышенные концентрации органических веществ. В руч. Отрадненке (створ C14) содержание взвешенных веществ достигает 0,85 мг/л при ПДКв 0,75 мг/л, что может быть связано с эрозийными процессами в период осенних паводков. Особого внимания заслуживает значительное повышение концентрации фосфат-иона в р. Светлогорке ниже озера Тихого (створ C16) до 1,12 мг/л, что свидетельствует о продолжающемся поступлении моющих средств и бытовых стоков.

Кислородный режим в обоих городах остается напряженным – содержание растворенного кислорода варьирует в пределах 2,97–3,37 мг/л при норме 4 мг/л. Сравнительный анализ показывает, что осенью профиль загрязнения сохраняет свою специфику: в Светлом преобладают техногенное загрязнение, тогда как в г. Светлогорске – органическое и биогенное.

Данные интегральной оценки качества вод (табл. 4) демонстрируют выраженную пространственно-временную динамику антропогенной нагрузки на водотоки исследуемых территорий.

Таблица 4
Table 4

Значения индекса загрязнения вод и коэффициента турбулентной диффузии
Values of the water pollution index and the turbulent diffusion coefficient

Пункт	Водоток	Весна		Лето		Осень	
		ИЗВ	КТД	ИЗВ	КТД	ИЗВ	КТД
г. Светлый							
C11	руч. без названия	0,84	0,00013	3,70	0,00012	1,63	0,00012
C12	р. Граевка	1,11	0,00188	4,02	0,00091	1,43	0,00183
C13	р. Дие-Видитте	2,10	0,00771	2,78	0,00659	2,82	0,00590
г. Светлогорск							
C14	руч. Отрадненка	1,88	0,00012	3,15	0,00031	1,35	0,00040
C15	р. Светлогорка, створ до оз. Тихого	0,73	0,00172	1,49	0,00239	1,08	0,00494
C16	р. Светлогорка, створ после оз. Тихого	0,50	0,00243	1,85	0,00484	1,57	0,00310

Статистический анализ выявил, что в 34 % случаев повышенным значениям ИЗВ соответствуют пониженные показатели коэффициента турбулентной диффузии, что определяет гидродинамические характеристики как один из важных факторов в процессах загрязнения.

Наибольшие значения ИЗВ зафиксированы в летний период: в г. Светлом в р. Граевке (створ С12) – 4,02 («грязные», класс качества вод 5), в г. Светлогорске в руч. Отраденке (створ С14) – 3,15 («загрязненные», класс качества вода 4). Летнее ухудшение качества воды коррелирует с минимальными значениями КТД (0,00012–0,00091), при этом в 83 % летних наблюдений отмечена обратная зависимость между этими показателями.

Особенно выражена эта закономерность в г. Светлом, где в р. Граевке (створ С12) при КТД = 0,00091 отмечаются максимальные значения ИЗВ = 4,02. Осенний период характеризуется некоторым улучшением качества вод, однако в р. Дие-Видитте (створ С13) сохраняется высокий уровень загрязнения (ИЗВ = 2,82) при относительно более высоком КТД (0,00590).

Проведенный анализ подтверждает, что водотоки г. Светлого характеризуются более высокой и устойчивой антропогенной нагрузкой, тогда как для г. Светлогорска характерна сезонная динамика загрязнения. Выявленные закономерности обосновывают необходимость разработки комплексных водоохранных мероприятий с учетом функциональной специализации урбанизированных территорий и гидродинамических особенностей водотоков.

На основе комплексного анализа выделены два наиболее значимых загрязнителя для каждого города, демонстрирующих устойчивое превышение ПДКв и характерных для специфики антропогенной нагрузки.

Для г. Светлого железо общее превышало норматив в 100 % проб со средней кратностью 7,2 ПДКв, а ХПК – в 100 % проб со средней кратностью 3,8 ПДКв. В г. Светлогорске аммоний-ион превышал ПДКв в 100 % проб со средней кратностью 3,1 ПДКв, фосфат-ион – в 83 % проб со средней кратностью 1,8 ПДКв.

Сезонная динамика приоритетных загрязнителей в г. Светлом (рис. 2) характеризуется выраженным летним пиком по обоим показателям. Концентрация железа общего возрастает от 0,34 мг/л весной до 2,69 мг/л летом (9,0 ПДКв) с последующим снижением до 0,75 мг/л осенью. Аналогичная динамика наблюдается для ХПК: весенние значения 47,6 мг/л (1,6 ПДКв) сменяются летним максимумом 135,5 мг/л (4,5 ПДКв) и осенним показателем 82,9 мг/л (2,8 ПДКв), что свидетельствует о сохранении значительной техногенной нагрузки.

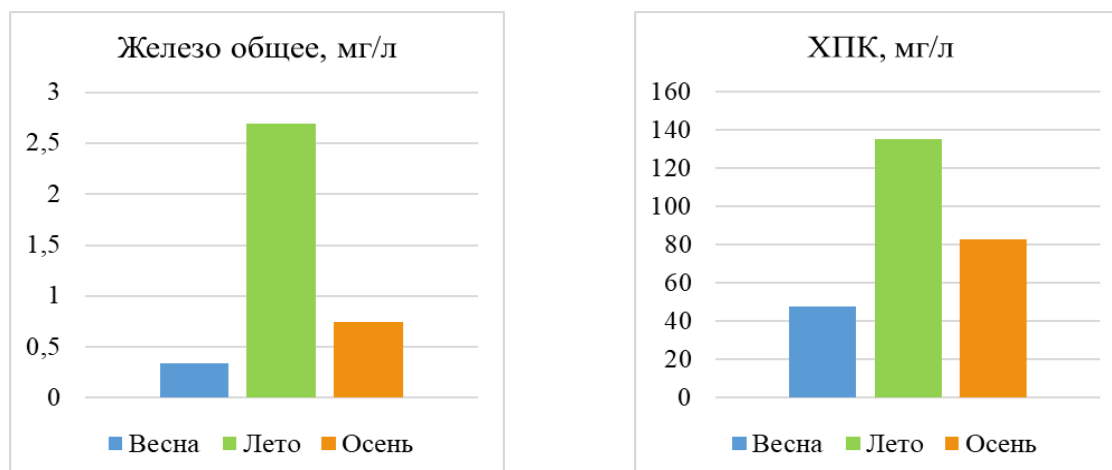


Рис. 2. Сезонная динамика приоритетных загрязнителей в г. Светлом

Fig. 2. Seasonal dynamics of priority pollutants in Svetly

Для г. Светлогорска аналогичная ситуация с летним максимумом (рис. 3). Концентрация аммоний-иона увеличивается с 2,42 мг/л весной до 5,28 мг/л летом (3,5 ПДКв) с последующим снижением до 1,36 мг/л осенью.

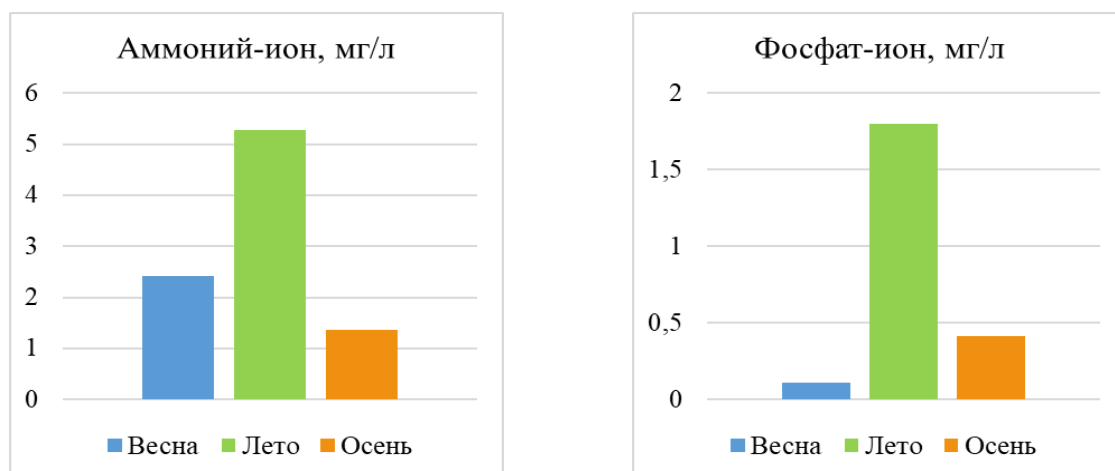


Рис. 3. Сезонная динамика приоритетных загрязнителей в г. Светлогорске
Fig. 3. Seasonal dynamics of priority pollutants in Svetlogorsk

Фосфат-ион демонстрирует наиболее выраженные сезонные колебания: от 0,11 мг/л весной до 1,80 мг/л летом (1,8 ПДКв) и 0,41 мг/л осенью, что отражает прямую зависимость от рекреационной нагрузки и интенсивности использования моющих средств в курортный сезон.

На основе данных мониторинга выявлены пространственные закономерности в распределении загрязнения малых водотоков на территории г. Светлого (рис. 4). Наиболее неблагоприятная геоэкологическая обстановка складывается в северо-восточной, индустриально развитой, части города. Абсолютный максимум загрязнения зафиксирован летом в районе примыкания к промышленной портовой инфраструктуре города (ИЗВ = 4,02).

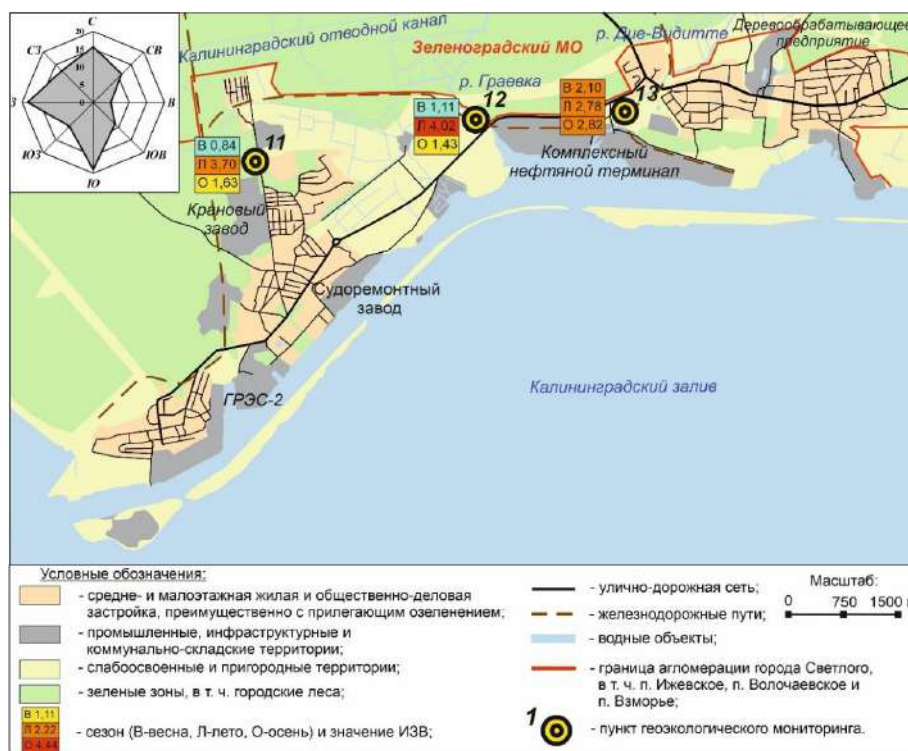


Рис. 4. Пространственно-временная изменчивость качества вод в г. Светлом
Fig. 4. Spatial and temporal variability of water quality in Svetly

В г. Светлогорске пространственная картина загрязнения имеет иную структуру, обусловленную рекреационной специализацией территории (рис. 5). Максимальное значение загрязнения выявлено в среднем течении руч. Отрадненка (створ С14, ИЗВ 1,88–3,15), воздействие на который могут оказывать коммунально-бытовые стоки из зоны интенсивной рекреации и малоэтажной жилой застройки. р. Светлогорка выше озера Тихое (створ С15) характеризуется наилучшими показателями качества вод (ИЗВ 0,73–1,49), тогда как ниже озера (створ С16) наблюдается небольшое ухудшение (ИЗВ 0,50–1,85), связанное с аккумуляцией биогенных элементов в водоеме.

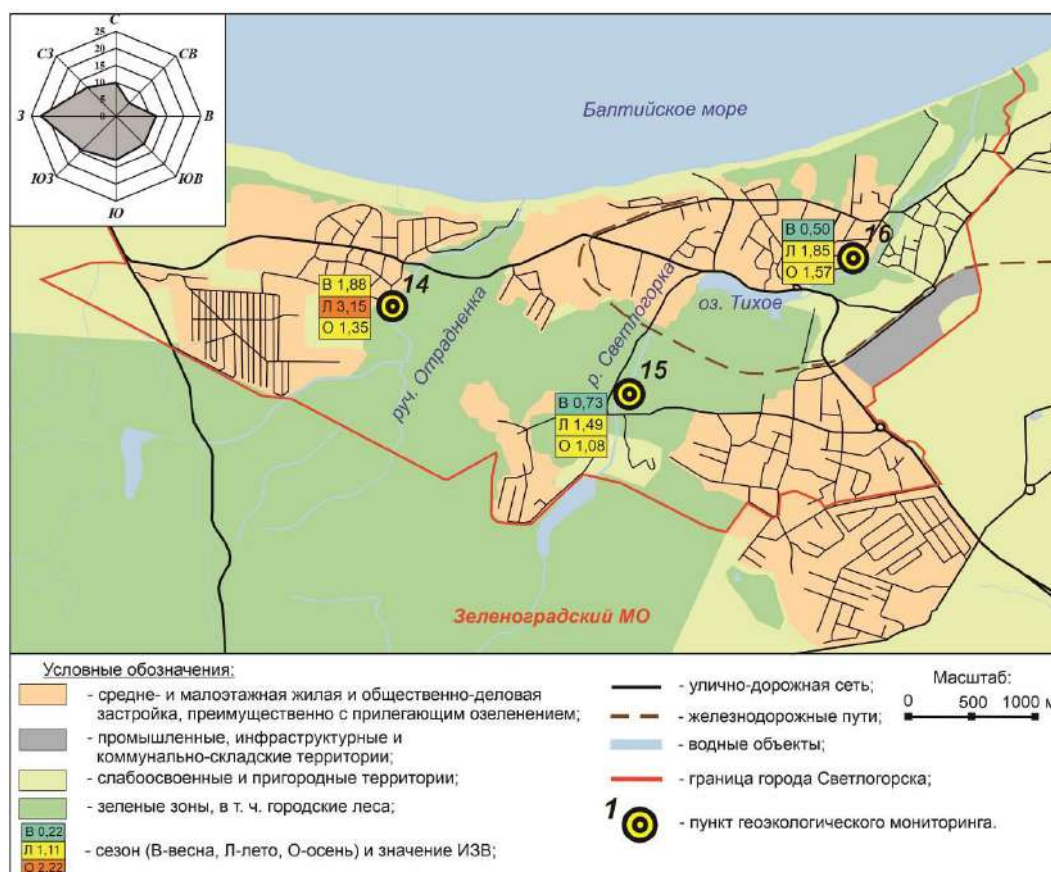


Рис. 5. Пространственно-временная изменчивость качества вод в г. Светлогорске
Fig. 5. Spatial and temporal variability of water quality in Svetlogorsk

Заклучение

Проведенные исследования выявили устойчивое химическое загрязнение малых водотоков урбанизированных территорий Калининградской области с выраженной дифференциацией по функциональной специализации. В промышленном г. Светлом установлено критическое превышение ПДКв по железу общему (до 14,9 ПДКв) и ХПК (до 6,0 ПДКв), тогда как в рекреационном г. Светлогорске доминирует азотно-фосфорное загрязнение с максимальными концентрациями аммоний-иона (5,9 ПДКв) и фосфат-иона (2,5 ПДКв). Пространственное распределение загрязнения демонстрирует четкую приуроченность к источникам антропогенного воздействия – промышленным зонам и рекреационным объектам.

Сезонная динамика характеризуется резким ухудшением качества вод в летний период, когда значения ИЗВ достигают 4,02 в г. Светлый и 3,15 в г. Светлогорск. Установлена статистически значимая обратная зависимость между ИЗВ и коэффициентом турбулентной диффузии, подтверждающая определяющую роль гидродинамических

факторов в процессах загрязнения. Летняя межень с минимальными значениями КТД (0,00012–0,00091) создает условия для кумуляции загрязняющих веществ.

Полученные результаты обосновывают необходимость разработки комплекса природоохранных мероприятий с учетом отраслевой специализации территорий. Для промышленных зон приоритетом должно стать внедрение технологий очистки промышленных стоков, для рекреационных территорий – оптимизация системы водоотведения и нормирование рекреационной нагрузки. Последовательный мониторинг приоритетных загрязнителей с учетом сезонной динамики позволит повысить эффективность управления качеством водных ресурсов.

Список источников

- Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Калининградской области в 2024 году». 2025. Калининград, Правительство Калининградской области, 298 с.
- Инвестиционный паспорт муниципального образования «Светловский городской округ» на 2025 год. Электронный ресурс. URL: <https://светлый.рф/wp-content/uploads/2025/03/investicijonnyj-pasport-2025.pdf> (дата обращения: 17.11.2025).
- Паспорт муниципального образования «Светлогорский городской округ» за 2024 год. Электронный ресурс. URL: <https://светлогорск39.рф/dokumenty/pasport/> (дата обращения: 17.11.2025).

Список литературы

- Алферов В.О., Цветкова Н.Н. 2022. Геоэкологическая характеристика системы река Светлогорка–пруд Тихий по наблюдениям 2019–2021 гг. Природообустройство, 2(34): 10–16. [https://doi.org/10.46845/2541-8254-2022-2\(34\)-10-10](https://doi.org/10.46845/2541-8254-2022-2(34)-10-10).
- Белова А.В. 2017. Роль полусредних городов в развитии эксклавного региона России – Калининградской области. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Калининград, 23 с.
- Бугранова О.С., Цупикова Н.А., Костыря Ю.С. 2018. Оценка состояния экосистем малых рек Самбийского полуострова летом 2018 г. Научные труды Дальрыбвтуза, 46(3): 5–13.
- Бузолева Л.С., Богатыренко Е.А., Голозубова Ю.С., Ким А.В. 2014. Влияние антропогенного загрязнения на качество прибрежных вод рекреационных зон Приморского края. Фундаментальные исследования, 11–11: 2423–2425.
- Герашенко И.Н. 2014. Проблемы рекреационного использования рек Причерноморья Краснодарского края. Наука и современность, 33: 30–34.
- Дмитриева В.А., Нефедова Е.Г. 2016. Кислородный режим малых водотоков в условиях различной антропогенной нагрузки. Бюллетень науки и практики, 4(5): 56–61. <https://doi.org/10.5281/zenodo.53995>
- Зотов С.И., Спирин Ю.А. 2020. История исследования и использования поверхностных вод суши Калининградской области России. Вопросы истории естествознания и техники, 41(3): 576–598. <https://doi.org/10.31857/S020596060010882-2>
- Зотов С.И., Спирин Ю.А., Таран В.С., Королева Ю.В. 2021. Гидрологические особенности и геоэкологическое состояние малых водотоков полейдерных территорий Калининградской области. Географический вестник, 3(58): 92–106. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2021-3-92-106>.
- Караушев А.В. 1946. Турбулентная диффузия и метод смешения. Л., Гидрометеиздат, 79 с.
- Козлов А.В., Клочков Е.А., Бодякина М.А., Береснев А.А., Калининчева З.С., Фирова А.А. 2019. Выявление тенденций в эколого-гидрохимических свойствах малых проточных водотоков в условиях техногенной нагрузки города Нижнего Новгорода. Успехи современного естествознания, 12–2: 280–287.
- Леонтьева С.В., Ягафарова Г.Г., Фатихова Н.И., Габитова И.У., Зиновьева Н.А., ... Ягафарова Д.И. 2017. Мониторинг загрязнения экотоксикантами малых рек (на примере реки Шугуровка). Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика, 1(25): 116–125. <https://doi.org/10.15593/2409-5125/2017.01.10>.

- Медведева И.Е., Алехина М.С., Иванникова М.В., Протасова М.В. 2024. Оценка качества воды в рекреационной зоне реки Псёл. Научное обозрение, 1: 41–45.
- Пакулина А.П., Платонова Т.П. 2019. Эколого-химическая характеристика малых рек в районе эксплуатации нефтеперекачивающей станции. Проблемы региональной экологии, 2: 25–28. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-12025>.
- Севостьянова Е.А., Меньшенин А.С., Никрашевская А.Э., Глинская А.С., Цупикова Н.А. 2022. Современное экологическое состояние водоемов рекреационного назначения Калининграда. В кн.: Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование. XIII Национальная (Всероссийская) научно-практическая конференция, Петропавловск-Камчатский, 29–30 марта 2022. Петропавловск-Камчатский, Камчатский государственный технический университет: 193–197.
- Федоров Г.М. 2018. Калининградская область: приграничное приморское положение как географический фактор развития экономики. Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки, 4: 5–17.
- Цупикова Н.А., Севостьянова Е.А. 2021. Некоторые гидролого-гидрохимические особенности и проблемы малых городских прудов на примере пруда Поплавок. Известия КГТУ, 62: 50–64. <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2021-62-50-64>.
- Широкова В.А., Хуторова А.О., Юрова Ю.Д. 2017. Оценка антропогенного влияния на экологическое состояние рекреационных зон на примере реки Осётр в Московской области. Московский экономический журнал, 4: 1–18.

References

- Alferov V.O., Tsvetkova N.N. 2022. Geoecological Characteristics of the Svetlogorka River and Tikhoe Lake on Observations in 2019–2021. Prirodoobustrojstvo, 2(34): 10–16 (in Russian). [https://doi.org/10.46845/2541-8254-2022-2\(34\)-10-10](https://doi.org/10.46845/2541-8254-2022-2(34)-10-10).
- Belova A.V. 2017. Rol polusrednikh gorodov v razvitii eksklavnogo regiona Rossii – Kaliningradskoy oblasti [The Role of Medium-Sized Cities in the Development of the Exclave Region of Russia – Kaliningrad Region]. Abstract dis. ... cand. geogr. sciences. Kaliningrad, 23 p.
- Bugranova O.S., Tsupikova N.A., Kostyrya Y.S. 2018. Estimation of the Condition of Small Rivers Ecosystems on Sambian Peninsula in Summer 2018. Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University, 46(3): 5–13 (in Russian).
- Buzoleva L.S., Bogatyrenko E.A., Golozubova Y.S., Kim A.V. 2014. The Influence of Anthropogenous Pollution on Quality of Coastal Waters of Recreational Zones of Primorsky Krai. Fundamental research, 11–11: 2423–2425 (in Russian).
- Gerashchenko I.N. 2014. Problemy rekreatsionnogo ispolzovaniya rek Prichernomoria Krasnodarskogo kraya [Problems of Recreational Use of the Rivers of the Black Sea Coast of the Krasnodar Territory]. Nauka i sovremennost, 33: 30–34.
- Dmitrieva V.A., Nefedova E.G. 2016. Regime of Dissolved Oxygen in Small Rivers by Varied Hyman Impact. Bulletin of Science and Practice, 4(5): 56–61 (in Russian). <https://doi.org/10.5281/zenodo.53995>
- Zotov S.I., Spirin Yu.A. 2020. The History of Exploration and Use of Inland Surface Waters of the Kaliningrad Oblast of Russia. Voprosy istorii estestvoznaniya i tehniki, 41(3): 576–598 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S020596060010882-2>
- Zotov S.I., Spirin Yu.A., Taran V.S., Koroleva Yu.V. 2021. Hydrological Features and Geoecological State of Small Rivers in the Polder Territories of the Kaliningrad Region. Geographical Bulletin, 3(58): 92–106 (in Russian). <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2021-3-92-106>.
- Karaushev A.V. 1946. Turbulentnaya diffuziya i metod smesheniya [Turbulent Diffusion and Mixing Method]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 79 p.
- Kozlov A.V., Klochkov E.A., Bodyakshina M.A., Beresnev A.A., Kalinicheva Z.S., Firova A.A. 2019. Identification of Trends in Ecology-Hydrochemical Properties of Small Flow Watercourses Under Man-Made Load of the Nizhny Novgorod City. Advances in current natural sciences, 12–2: 280–287 (in Russian).
- Leontieva S., Yagafarova G., Fatihova N., Gabitova I., Zinovieva N., ... Yagafarova D. 2017. Monitoring of Pollution Ecotoxicants Small Rivers (the Example of River Shugurovka). Bulletin of Perm

- National Research Polytechnic University. Applied Ecology. Urban Development, 1(25): 116–125 (in Russian). <https://doi.org/10.15593/2409-5125/2017.01.10>.
- Medvedeva I.E., Alekhina M.S., Ivannikova M.V., Protasova M.V. 2024. Assessment of Water Quality in the Recreational Area of the Psel River. Scientific Review, 1: 41–45 (in Russian).
- Pakusina A.P., Platonova T.P. 2019. Environmental and Chemical Characteristics of Small Rivers in the Area of Operation of the Oil Pumping Station. Regional Environmental Issues, 2: 25–28 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-12025>
- Sevostianova E.A., Menshenin A.S., Nikrashevskaya A.E., Glinskaya A.S., Tsupikova N.A. 2022. Current Ecological Condition of Recreational Water Bodies in Kaliningrad. In: Natural Resources, Their Current State, Protection, Commercial and Technical Use. XIII National (All-Russian) Scientific and Practical Conference, Petropavlovsk-Kamchatsky, 29–30 March 2022. Petropavlovsk-Kamchatsky, Publ. Kamchatskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet: 193–197 (in Russian).
- Fedorov G.M. 2018. Kaliningrad Region: Coastal Position as a Geographical Factor of Economic Development. IKBFU's Vestnik. Series: Natural and medical sciences, 4: 5–17 (in Russian).
- Tsupikova N.A., Sevostianova E.A. 2021. Some Hydrological and Hydrochemical Peculiarities and Problems of Small Urban Ponds on the Example of the Poplavok Pond. Izvestia KSTU, 62: 50–64 (in Russian). <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2021-62-50-64>
- Shirokova V.A., Khutorova A.O., Yurova Yu.D. 2017. Environmental Assessment of Anthropogenic Effects on Recreational Zones (for Example: Osetr River in the Moscow Region). Moscow Economic Journal, 4: 1–18 (in Russian).

*Поступила в редакцию 19.11.2025;
поступила после рецензирования 19.12.2025;
принята к публикации 11.02.2026*

*Received November 19, 2025;
Revised December 19, 2025;
Accepted February 11, 2026*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Архипов Егор Александрович, аспирант Института естественных наук, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Россия

Зотов Сергей Игоревич, доктор географических наук, профессор Института естественных наук, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Россия

Королева Юлия Владимировна, кандидат географических наук, доцент Института естественных наук, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Россия

Яковчук Таисия Андреевна, студент Института естественных наук, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Egor A. Arkhipov, postgraduate student of the Institute of Natural Sciences, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Sergey I. Zotov, Doctor of Geographical Sciences, Professor of the Institute of Natural Sciences, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Yulia V. Koroleva, Candidate of Geographical sciences, Associate Professor of the Institute of Natural Sciences, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Taisiya A. Yakovchuk, Student of the Institute of Natural Sciences, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia



УДК 502.3:551.435.8(470.325)
DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-3-507-526
EDN DEFTIH

Комплексная оценка рисков природопользования в Белгородской области с учётом ведущих экзогенных процессов

Вендина Т.Н., Белоусова Л.И., Киреева-Гененко И.А., Юдина Ю.В.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

furmanova@bsuedu.ru, belousova_l@bsuedu.ru, genenko@bsuedu.ru, yudina@bsuedu.ru

Аннотация. Значительная антропогенная нагрузка в сочетании с активным проявлением опасных экзогенных геологических процессов на территории Белгородской области формирует комплексные риски природопользования, угрожающие устойчивому развитию региона. Впервые проведена комплексная оценка рисков природопользования в Белгородской области с учётом пространственного развития ведущих экзогенных геологических процессов и социально-экономической уязвимости территории на муниципальном уровне. Ранее существовавшие исследования были сосредоточены либо на отдельных видах экзогенных процессов, либо на общей оценке природных опасностей без их интеграции с социально-экономической уязвимостью и защищённостью территории. Методологическую основу составил адаптированный подход на базе методики С.Б. Кузьмина (2015), включающий расчёт интегрального риска природопользования как соотношение коэффициента природной опасности, скорректированного на демографический фактор, и коэффициента защищённости территории, учитывающего экономический потенциал, инфраструктуру, качество жизни, экологическую напряжённость и демографическую нагрузку. Было установлено, что максимальный интегральный риск природопользования формируется не в районах с наибольшей абсолютной природной опасностью, а в крупнейших урбанизированных агломерациях региона («парадокс мегаполиса»). Город Белгород и Старооскольский городской округ, где проживает свыше 51 % населения, отнесены по результатам исследования к зонам катастрофического риска. Около 65 % населения Белгородской области проживает в зонах катастрофического, очень высокого и высокого риска. Выявлена резкая пространственная дифференциация, требующая адресного подхода к управлению рисками. Полученные результаты вносят вклад в развитие теории и методики пространственной оценки комплексных рисков природопользования на региональном и муниципальном уровне, и формируют научно-практический фундамент для внедрения проактивной системы управления рисками, а также разработки дифференцированных мер территориального планирования в Белгородской области.

Ключевые слова: риск природопользования, устойчивое развитие, оценка рисков, экзогенные геологические процессы, геоморфологический риск, коэффициент защищённости, природная опасность, территориальное планирование, техносферная безопасность

Для цитирования: Вендина Т.Н., Белоусова Л.И., Киреева-Гененко И.А., Юдина Ю.В. 2026. Комплексная оценка рисков природопользования в Белгородской области с учётом ведущих экзогенных процессов. Региональные геосистемы, 50(3): 507–526. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-507-526 EDN: DEFTIH

Comprehensive Assessment of Environmental Management Risks in the Belgorod Region Taking into Account Major Exogenous Processes

Tatyana N. Vendina, Ludmila I. Belousova, Irina A. Kireeva-Genenko, Yulia V. Yudina

Belgorod State National Research University,
85 Pobeda St., Belgorod 308015, Russia

furmanova@bsuedu.ru, belousova_l@bsuedu.ru, genenko@bsuedu.ru, yudina@bsuedu.ru

© Вендина Т.Н., Белоусова Л.И., Киреева-Гененко И.А., Юдина Ю.В., 2026

Abstract Significant anthropogenic pressure combined with the active manifestation of hazardous exogenous geological processes in the Belgorod region forms complex environmental management risks that threaten the region's sustainable development. The purpose of this study is a comprehensive assessment of environmental management risks in the Belgorod region, taking into account the spatial development of leading exogenous geological processes and the socio-economic vulnerability of the territory at the municipal level. This is the first such assessment conducted for the Belgorod region. Previous studies focused on individual types either of exogenous processes or on a general assessment of natural hazards without integrating them with socio-economic vulnerability and territorial protection. The methodological basis was an adapted approach based on S.B. Kuzmin's methodology (2015), which involves calculating the integral environmental management risk as the ratio of the natural hazard coefficient, adjusted for the demographic factor, to the territorial protection coefficient, which considers economic potential, infrastructure, quality of life, environmental stress, and demographic load. We have found that the maximum integral environmental management risk is formed not in areas with the highest absolute natural hazard, but in the largest urban agglomerations of the region (“megacity paradox”). Belgorod and Stary Oskol urban districts, where over 51 % of the population resides, have been classified as catastrophic risk zones according to the study results. About 65 % of the region's population lives in zones of catastrophic, very high, and high risk. A sharp spatial differentiation has been identified, requiring a targeted approach to risk management. The obtained results contribute to the development of the theory and methodology of spatial assessment of complex environmental management risks at the regional and municipal levels and form a scientific and practical foundation for implementing a proactive risk management system, as well as developing differentiated measures for territorial planning in the Belgorod region.

Keywords: environmental risk management, sustainable development, risk assessment, exogenous geological processes, geomorphological risk, protection coefficient, natural hazard, territorial planning, technosphere safety

For citation: Vendina T.N., Belousova L.I., Kireeva-Genenko I.A., Yudina Yu.V. 2026. Comprehensive Assessment of Environmental Management Risks in the Belgorod Region Taking into Account Major Exogenous Processes. *Regional Geosystems*, 50(3): 507–526 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-507-526 EDN: DEFTIH

Введение

Значительная антропогенная нагрузка на территории Белгородской области, обусловленная развитой добывающей промышленностью, интенсивным сельским хозяйством, высокой плотностью населения (более 55 чел./км²) в сочетании с проявлением таких опасных природных процессов как эрозия, оползни, карстово-суффозионные явления, подтопление и др., формирует комплексные риски природопользования. Современные подходы к оценке подобных рисков требуют интеграции экологических и социально-экономических факторов [Белозеров и др., 2025].

Белгородская область является характерным примером региона, где интенсивная хозяйственная деятельность формирует специфический комплекс рисков, угрожающих устойчивому развитию, техносферной безопасности и социально-экономическому благополучию населения. Особую остроту проблема приобретает в городах, где высокая концентрация населения и инфраструктуры требует особых мер по повышению устойчивости к чрезвычайным ситуациям [Маркешина, 2021]. Исторически, в регионе сложился мощный агропромышленный комплекс с одним из самых высоких в России показателей распаханности земель (свыше 50 % от площади муниципальных образований) [О состоянии ..., 2025]. Наряду с этим, в Старооскольско-Губкинском промышленном районе ведётся активная разработка железорудных месторождений, приводящая к кардинальной техногенной трансформации рельефа [Корнилов, 2014; Фурманова и др., 2016]. Благодаря наличию значительных запасов нерудного сырья, широкое распространение в Белгородской

области получили карьеры по добыче общераспространенных полезных ископаемых [Вендина и др., 2019]. Все это создаёт мощные предпосылки для активизации экзогенных геологических процессов и формирования зон экологической напряженности [Хрисанов, Колмыков, 2017].

Согласно исследованиям, в Белгородской области эрозионными процессами поражено около 60 % территории, оползневыми – более 9 %, карстово-суффозионными – свыше 12 % [Саблина и др., 2019; Киреева-Гененко и др., 2021; Саблина, Нарожная, 2023]. Данные процессы представляют прямую угрозу сельскохозяйственным угодьям, объектам инфраструктуры и населённым пунктам, что требует научно обоснованной оценки и управления возникающими рисками.

Проведение комплексной оценки рисков природопользования на территории Белгородской области может стать важным шагом в решении этой проблемы. Такой подход должен интегрировать анализ распространения и интенсивности ведущих опасных экзогенных процессов с оценкой социально-экономической уязвимости и уровня защищённости территории [Кузьмин, 2020; Маркешина, 2021].

Реализация данного подхода позволит достичь двух ключевых результатов. Во-первых, обеспечит получение актуальных данных о пространственной дифференциации комплексного риска в регионе. Во-вторых, результаты исследования позволят сформировать научную основу для разработки дифференцированных мер территориального планирования и обеспечения устойчивого развития Белгородской области [Стратегия..., 2022].

Объекты и методы исследования

Теоретико-методологический аппарат оценки рисков природопользования и опасных природных процессов получил значительное развитие как в отечественной, так и в зарубежной науке [Pelling, 2003; Кузьмин, 2015; Природно-техногенная безопасность..., 2018; Bell, 2019; Тулупов, 2021; Smith, 2021; Москвичев, 2022; Михеева и др., 2024]. В его основе сформировалось понимание риска природопользования как вероятностной меры возникновения негативных последствий (экологических, экономических, социальных) в результате взаимодействия хозяйственной деятельности с окружающей средой, которая находится под влиянием опасных природных и природно-антропогенных процессов [Кузьмин, 2020]. Значительный вклад в развитие теории управления территориальными рисками и анализа уязвимости социально-природно-техногенных систем внесли работы последних лет [Олтян, Жданенко, 2019; Бычков и др., 2024].

В международной практике широкое распространение получили подходы, базирующиеся на таких принципах управления рисками, как «загрязнитель платит» (*Polluter Pays Principle*), комплексные системы экологического страхования и интеграция оценки рисков в корпоративные стратегии и ESG-повестку [CERCLA, 1980; Directive 2004/35/EC, 2004; Sendai Framework..., 2015]. Научные исследования также подчеркивают значимость оценки воздействия природных и техногенных факторов на общественное здоровье [Bell, Davis, 2019], а международные организации разрабатывают специализированные рекомендации по управлению экологическими опасностями в урбанизированных средах [UNISDR Terminology, 2017; UN-Habitat, 2022]. Активно применяются методологии анализа опасностей и работоспособности (*HAZOP*), анализа видов и последствий отказов (*FMEA*) [Failure Mode..., 2019; HAZOP..., 2021], а также разрабатываются научные основы для оценки комплексных рисков, как, например, в деятельности Германского Объединения по исследованию рисков (*GRC*).

В российской науке и практике также накоплен значительный опыт в области оценки рисков. Ключевыми работами в этом направлении являются исследования в сфере природно-техногенной безопасности, анализа и оценки рисков в природопользовании, методические рекомендации по оценке рисков ЧС на региональном уровне [Олтян, Жданенко, 2019; Методические рекомендации..., 2022; ГОСТ Р 22.1.12..., 2023; Бычков и др., 2024; Миканович и др., 2024; Белозеров и др., 2025]. Особый вклад в развитие методологии оценки рисков природопользования, применимой для территориального анализа, внес С.Б. Кузьмин [2015], предложивший оригинальную методику для глобальных и страновых оценок.

Однако многие из существующих методик, особенно разработанные для глобального или общероссийского уровня, оказываются недостаточно подходящими для решения задач регионального и муниципального управления. Зачастую, они не учитывают специфическую комбинацию природных предпосылок и видов хозяйственной деятельности, характерную для конкретного субъекта Российской Федерации [Кузьмин, 2020].

Исследования опасных экзогенных геологических процессов (ЭГП) на территории Белгородской области имеют обширную научную базу. Фундаментальные и прикладные работы таких авторов, как А.Н. Петин, Л.И. Белоусова, В.И. Петина, Н.И. Гайворонская, В.А. Хрисанов, А.В. Сарычев, Т.Н. Фурманова и др., детально характеризуют распространение, интенсивность и факторы развития эрозионных, оползневых, карстово-суффозионных процессов, а также оценивают масштабы техногенной трансформации ландшафтов [Петин и др., 2013; Фурманова и др., 2016; Хрисанов, Колмыков, 2017; Саблина и др. 2019; Михно, 2020; Павлюк, 2022; Саблина, Нарожная, 2023; Красников и др., 2024; Сарычев и др., 2024]. Эти исследования создали подробную фактологическую и картографическую основу для анализа природных опасностей. Однако работ, в которых данные о природных процессах были бы системно интегрированы с социально-экономическими показателями для количественной оценки комплексного риска природопользования, до настоящего времени проведено не было.

Таким образом, объектом настоящего исследования выступает процесс природопользования на территории Белгородской области, рассматриваемый как комплексная система взаимодействия хозяйственной деятельности с природной средой в условиях проявления опасных экзогенных геологических процессов. Предметом исследования является совокупность природных и антропогенных факторов, формирующих пространственно-дифференцированный риск природопользования в регионе.

Методическую основу работы составил адаптированный авторами подход, базирующийся на методике С.Б. Кузьмина [2015] для глобальной оценки риска природопользования. Выбор данной методики обусловлен её концептуальной стройностью, ориентированностью на интегральную оценку (соотношение опасности и защищённости) и возможностью адаптации к различным пространственным уровням. Ключевая адаптация методики заключалась в переходе от странового уровня анализа к муниципальному и в подборе системы показателей, релевантных для условий Белгородской области (для оценки коэффициента природной опасности произведён расчёт с учётом интенсивности поражения территории ведущими ЭГП, с корректировкой на долю населения, подверженного этим угрозам; для оценки защищённости территории рассчитано соотношение позитивных факторов: E – экономический потенциал; I – индекс развития инфраструктуры; L – качество жизни; D – показатель развитости аварийно-спасательных служб и негативных факторов, снижающих устойчивость: En – коэффициент экологической напряжённости; Dp – показатель демографической нагрузки).

Интегральный риск природопользования (Rp) рассчитывался по формуле:

$$Rp = \frac{Hp}{Vp} \quad (1)$$

где Hp – коэффициент природной опасности, а Vp – коэффициент защищённости территории.

Расчёт коэффициента природной опасности (Hp) проводился с учётом ведущих для региона ЭГП. На первом этапе для каждого из 21 муниципального образования был рассчитан суммарный балл природной опасности на основе поражённости территории тремя основными процессами: эрозией (овражной и поверхностной), оползнями и карстом. Весовые коэффициенты для каждого процесса (50 %, 33 % и 17 % соответственно) были определены по правилу Фишберна [1978], исходя из их вклада в общую поражённость региона (62 %, 9,2 % и 12,5 % по данным табл. 1). Количественные характеристики поражённости территории представлены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Количественные характеристики опасных природных и природно-антропогенных процессов на территории Белгородской области [Киреева-Гененко и др., 2021]
Quantitative characteristics of hazardous natural and natural-anthropogenic processes in the Belgorod region [Kireeva-Genenko et al., 2021]

№ п/п	Тип процесса	Площадь территории развития ЭГП, км ²	Поражённость, %
1	Эрозионные процессы (овражная и поверхностная эрозии)	16800	62
2	Суффозионный и карстовый	3400	12,5
3	Оползневый	2500	9,2
4	Эоловая аккумуляция	300	1,1
5	Заболачивание (подтопление)	100	0,4

Полученные баллы были скорректированы на демографический показатель по формуле:

$$Hp = Hpi \times \left(\frac{Wi}{W}\right), \quad (2)$$

где Hpi – показатель природной опасности для i -го муниципального образования; Wi – население i -го муниципального образования; W – население области.

Такой подход позволил учесть не только площадь распространения опасного процесса, но и потенциальное количество подверженного этой опасности населения.

Расчёт коэффициента защищённости (Vp) выполнялся по адаптированной формуле, интегрирующей ключевые аспекты устойчивости территории:

$$Vp = \frac{E+I+L+D}{En+Dp}, \quad (3)$$

где в числителе собраны позитивные факторы: E – экономический потенциал (ВРП на душу населения); I – индекс развития инфраструктуры (транспортная доступность и связь); L – качество жизни (ожидаемая продолжительность жизни); D – показатель развитости аварийно-спасательных служб (косвенно оценённый по бюджетным расходам). В знаменателе – негативные факторы, снижающие устойчивость: En – коэффициент экологической напряжённости; Dp – показатель демографической нагрузки.

Коэффициент En рассчитывался как сумма баллов (от 1 до 3) по трём компонентам: загрязнение атмосферы, загрязнение водных объектов и деградация земель, на основе данных Государственного доклада о состоянии окружающей среды [О состоянии ..., 2025] и тематических карт Географического атласа Белгородской области [2018].

Показатель Dp (демографическая нагрузка) определялся как количество лиц нетрудоспособного возраста на 1000 трудоспособных по данным официальной статистики [Белгородская область в цифрах..., 2024].

Вспомогательными методами, использованными на различных этапах исследования, стали:

1. Системный и сравнительный анализ – при изучении теоретических основ, зарубежного и отечественного опыта управления рисками.

2. Статистические методы – при обработке данных о природных процессах, населении и экономических показателях.

3. Картографический метод и ГИС-технологии – для визуализации пространственного распределения опасных процессов, уровня риска и проведения районирования территории.

4. Метод экспертных оценок – применялся при балльной оценке компонентов экологической напряжённости (En) [Морина и др., 2012].

Использование данного комплекса методов на основе адаптированной методики С.Б. Кузьмина [2015] с опорой на предшествующие региональные исследования ЭГП [Петин и др., 2013; Фурманова и др., 2016; Хрисанов, Колмыков, 2017; Саблина и др. 2019; Павлюк, 2022; Саблина, Нарожная, 2023; Красников и др., 2024; Сарычев и др., 2024] позволило обеспечить комплексность, достоверность и практическую применимость результатов оценки риска природопользования для территории Белгородской области.

Результаты и их обсуждение

Анализ пространственного распределения и интенсивности экзогенных геологических процессов (ЭГП) подтвердил их определяющую роль в формировании природной опасности на территории Белгородской области.

Согласно анализу исходных фондовых материалов, собственных расчётов и данных картографирования, эрозионными процессами различной интенсивности поражено 62 % территории (16800 км²), что является максимальным вкладом в общую геоморфологическую уязвимость региона [Киреева-Гененко и др., 2021]. Наиболее высокая поражённость (свыше 80 %) характерна для Волоконовского (80 %), Ивнянского (81 %), Краснояружского (94 %) и Ракитянского (85 %) муниципальных округов.

Оползневые процессы в Белгородской области получили развитие на площади 2500 км² (9,2 %) и представляют особую опасность в восточных районах (Валуйский, Вейделевский, Волоконовский, Красненский округа), где зафиксированы показатели поражённости от 11,6 % до 14,8 % [Киреева-Гененко и др., 2021; Сарычев и др., 2024].

Карстово-суффозионные процессы охватывают 12,5 % территории Белгородской области, с максимальной активностью в Валуйском и Старооскольском округах (9,8 % и 9,1 % соответственно) [Киреева-Гененко и др., 2021].

Сводные результаты расчёта суммарного балла природной опасности с учётом весовых значений по правилу Фишберна приведены в табл. 2.

Суммарный балл природной опасности (Hpi) рассчитан на основе поражённости территории тремя ведущими ЭГП: эрозией, оползнями и карстом, вносящими наибольший вклад. Различной интенсивности процесса, выраженной в % поражённости, соответствует свой уровень природной опасности (низкий, средний, высокий), которому, в свою очередь, присвоен определённый балл (рассчитанный по правилу Фишберна).

Таблица 2
Table 2

Сводная таблица расчёта суммарного балла природной опасности
с учётом весовых значений по правилу Фишберна (составлено авторами)
Summary table for calculating the total score of natural hazard taking into account weighting values
according to Fishburn's rule (compiled by the authors)

№	Муниципальное образование	Площадь округа, км ²	Поражённость территории с оценкой уровня природной опасности ¹			Суммарный балл природной опасности (Hpi)
			эрозией, %	оползнями, %	карстом, %	
1	Алексеевский	1765,1	65,0 С	10,4 С	6,6 С	66,6
2	Белгородский и г. Белгород	1627,8	61,0 С	10,3 С	2,5 Н	55,6
3	Борисовский	650,4	57,0 С	6,0 С	3,2 Н	55,6
4	Валуйский	1700,6	70,0 В	11,8 В	9,8 В	100,0
5	Вейделевский	1356,3	65,0 С	11,6 В	5,2 С	72,3
6	Волоконовский	1287,7	80,0 В	13,3 В	5,1 С	89,0
7	Грайворонский	853,8	61,0 С	2,9 Н	2,2 Н	50,0
8	Губкинский	1526,6	55,0 С	5,9 С	6,5 С	66,6
9	Ивнянский	871,1	81,0 В	6,0 С	3,4 С	83,3
10	Корочанский	1464,1	44,0 С	8,7 С	6,3 С	66,6
11	Красненский	851,9	76,0 В	14,8 В	4,6 С	89,0
12	Красногвардейский	1762,6	50,0 С	9,0 С	4,2 С	66,6
13	Краснояржский	479,2	94,0 В	4,8 С	4,6 С	83,3
14	Новооскольский	1401,6	50,0 С	7,4 С	4,0 С	66,6
15	Прохоровский	1378,7	66,0 С	8,9 С	6,4 С	66,6
16	Ракитянский	900,9	85,0 В	2,9 Н	5,7 С	77,7
17	Ровеньский	1369,2	50,0 С	13,0 В	5,1 С	72,3
18	Старооскольский	1693,5	55,0 С	5,8 С	9,1 В	77,6
19	Чернянский	1227,5	33,0 Н	8,9 С	4,0 С	50,0
20	Шебекинский	1865,9	56,0 С	12,2 В	8,0 В	83,3
21	Яковлевский	1089,8	33,0 Н	10,4 С	2,3 Н	39,0
Всего по Белгородской области		27133,5	60,0	9,2	5,5	74,7

Примечание: ¹В – высокий уровень природной опасности; С – средний уровень природной опасности; Н – низкий уровень природной опасности.

Распределение баллов критериев природной опасности по уровням (низкий, средний, высокий) представлено в табл. 3.

Таблица 3
Table 3

Распределение баллов критериев природной опасности по уровням
Distribution of natural hazard criteria scores by levels

№ п/п	Критерии	Уровни		
		низкий	средний	высокий
1	Эрозионные процессы (овражная и поверхностная эрозии)	16,7	33,3	50
2	Суффозионный и карстовый	11	22	33
3	Оползневой	5,7	11,3	17
Итого		33,4	66,6	100

Пространственное распределение суммарного балла природной опасности на территории Белгородской области отражено на карте (рис.1).

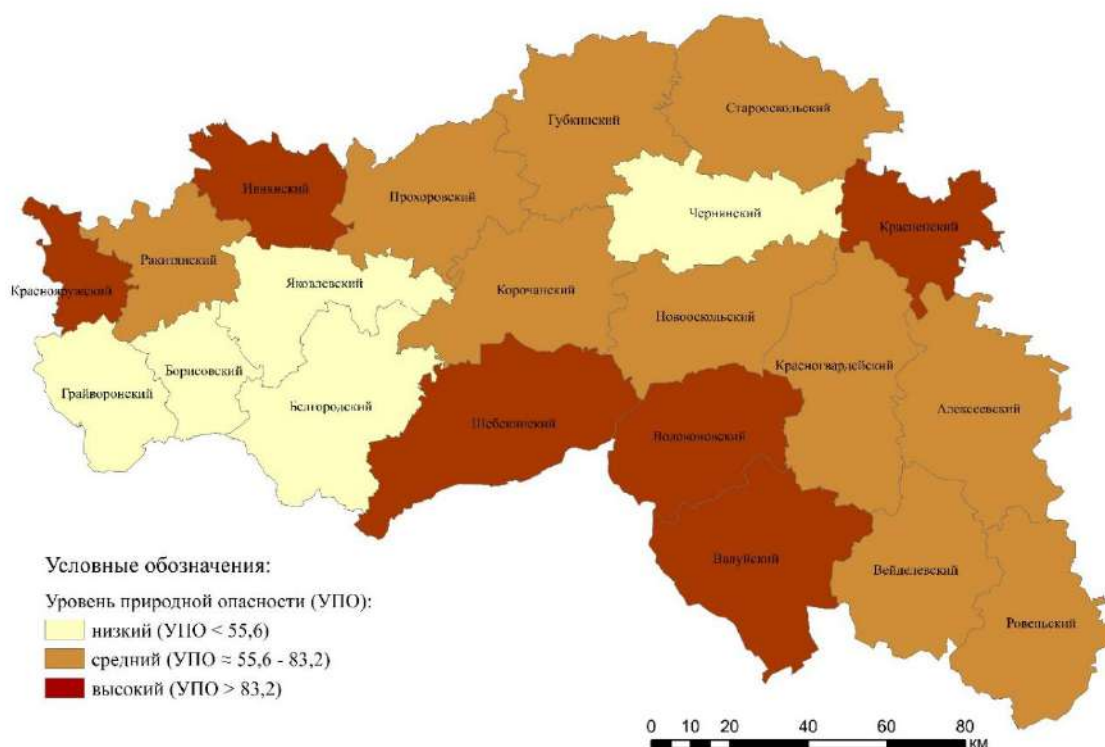


Рис.1. Распределение оценок природной опасности (H_{pi}) на территории Белгородской области
Fig.1. Distribution of natural hazard estimates (H_{pi}) on the territory of the Belgorod region

Территории с низким уровнем природной опасности ($УПО < 55,6$) относительно стабильны. Развитие опасных геоморфологических процессов ограничено. Риск нанесения ущерба хозяйственной инфраструктуре и населению минимален. Планирование хозяйственной деятельности может вестись без существенных ограничений, связанных с геологическими рисками (Яковлевский муниципальный округ – 39,0).

Территории со средним уровнем природной опасности ($УПО \approx 55,6-83,2$) характеризуются умеренной активностью опасных процессов. Наличие одного или двух процессов на уровне «высокий» или комбинации процессов на уровне «средний» создаёт потенциальную угрозу. Требуется проведение профилактических мероприятий и учёт

природных рисков при размещении новых объектов, особенно в зонах с высокой поражённостью (подавляющее большинство округов, включая Белгородский (55,6), Борисовский (55,6), Грайворонский (50,0), Губкинский (66,6), Корочанский (66,6), Красногвардейский (66,6), Новооскольский (66,6), Прохоровский (66,6), Чернянский (50,0) и др.). Высокий уровень природной опасности ($УПО > 83,2$) характерен для территории с интенсивным развитием опасных ЭГП, где наблюдается сочетание нескольких процессов на высоком уровне. Существует реальная угроза повреждения зданий, инженерных сооружений, дорог, сельскохозяйственных угодий. Требуется проведение дорогостоящих инженерных защитных мероприятий и строгий контроль за хозяйственной деятельностью (Валуйский (100,0), Волоконовский (89,0), Ивнянский (83,3), Красненский (89,0), Краснояружский (83,3), Ракитянский (77,7), Старооскольский (77,6), Шебекинский (83,3)).

Данные расчётов говорят о доминировании в пределах Белгородской области среднего уровня природной опасности: 12 из 21 муниципальных округов. Для региона, в целом, характерна умеренная, но повсеместная активность опасных геоморфологических процессов.

Расчёт коэффициента природной опасности (H_p) с последующей корректировкой на демографический показатель выявил критическое перераспределение приоритетов. Абсолютным лидером по исходному суммарному баллу стал Валуйский муниципальный округ (100 баллов), где все три ключевых процесса проявили высокий уровень активности. Однако, после учёта доли населения, проживающего в округе (4,22 % от населения области), итоговый показатель составил $H_p = 4,22$.

В то же время, Белгородский муниципальный округ (включая г. Белгород), имея средний уровень природной опасности (55,6 баллов), получил максимальный в области показатель $H_p = 19,25$. Это является следствием «парадокса мегаполиса»: концентрация населения области (34,62 %) и критической инфраструктуры в зоне даже умеренной природной опасности формирует наихудший сценарий потенциального ущерба. Аналогичная, хотя и менее выраженная, ситуация характерна для Старооскольского городского округа ($H_p = 12,96$) при доле населения 16,7 %. Сводная таблица расчёта итогового показателя природной опасности (H_p) по муниципальным образованиям Белгородской области с корректировкой на демографический фактор приведена в табл. 4.

Пространственное распределение показателя природной опасности (H_p) по муниципальным образованиям Белгородской области отражено на карте (рис. 2).

К территориям с критическим уровнем риска природной опасности ($H_p > 10$) отнесены Белгородский муниципальный округ и г. Белгород (19,25) и Старооскольский г.о. (12,96). Это зоны наивысшего приоритета для мероприятий по снижению рисков. Несмотря на то, что природная опасность здесь средняя (55,6) и повышенная (77,6) соответственно, высокая концентрация населения (34,6 % и 16,7 % от всего населения области) приводит к тому, что именно здесь потенциальные социальные и экономические последствия от проявления опасных процессов максимальны для всей Белгородской области. Любой оползень, карстовый провал или проявление эрозии здесь могут затронуть огромное количество людей и инфраструктуры.

Территории с высоким уровнем риска природной опасности (H_p от 2 до 10) – Губкинский г.о. (5,0), Шебекинский (4,54), Валуйский (4,22), Алексеевский (2,57). Это также ключевые зоны внимания. Муниципальные округа вошли в эту группу по разным причинам: Валуйский – обладает максимальной природной опасностью (100,0), и даже при средней численности населения (4,22 %) риск велик. Губкинский и Шебекинский – сочетают повышенную природную опасность со значительной численностью населения (7,5 % и 5,45 %). Алексеевский – имеет среднюю природную опасность, но является одним из самых населённых среди периферийных округов.

Таблица 4
Table 4

Сводная таблица расчёта итогового показателя природной опасности (H_p)
по муниципальным образованиям Белгородской области
Summary table for calculating the final indicator of natural hazard (H_p)
for the municipalities of the Belgorod region

№	Муниципальное образование	Численность населения, чел. на 01.01.2024 г.	Доля населения, %	W_i/W	Суммарный балл природной опасности (H_{pi})	Итоговый показатель природной опасности (H_p)
1	Алексеевский	58 008	3,86	0,0386	66,6	2,57
2	Белгородский (в т. ч. г. Белгород)	519 544	34,62	0,3462	55,6	19,25
3	Борисовский	22 875	1,52	0,0152	55,6	0,85
4	Валуйский	63 354	4,22	0,0422	100	4,22
5	Вейделевский	20 272	1,35	0,0135	72,3	0,98
6	Волоконовский	28 634	1,91	0,0191	89,0	1,7
7	Грайворонский	26 027	1,73	0,0173	50,0	0,87
8	Губкинский	112 690	7,51	0,0751	66,6	5,00
9	Ивнянский	20 699	1,38	1,38	83,3	1,15
10	Корочанский	33 667	2,24	0,0224	66,6	1,5
11	Красненский	10 965	0,73	0,0073	89,0	0,65
12	Красногвардейский	31 492	2,10	0,021	66,6	1,40
13	Краснояржский	13 817	0,92	0,0092	83,3	0,77
14	Новооскольский	38 749	2,58	0,0258	66,6	1,71
15	Прохоровский	26 684	1,78	1,78	66,6	1,19
16	Ракитянский	32 687	2,18	0,0218	77,7	1,69
17	Ровеньский	22 050	1,47	0,0147	72,3	1,06
18	Старооскольский	250 703	16,70	0,1670	77,6	12,96
19	Чернянский	29 191	1,94	0,0194	50,0	0,97
20	Шебекинский	81 806	5,45	0,0545	83,3	4,54
21	Яковлевский	56 945	3,79	0,0379	39,0	1,48
Всего по Белгородской области		1500859	100	1	74,7	0,747

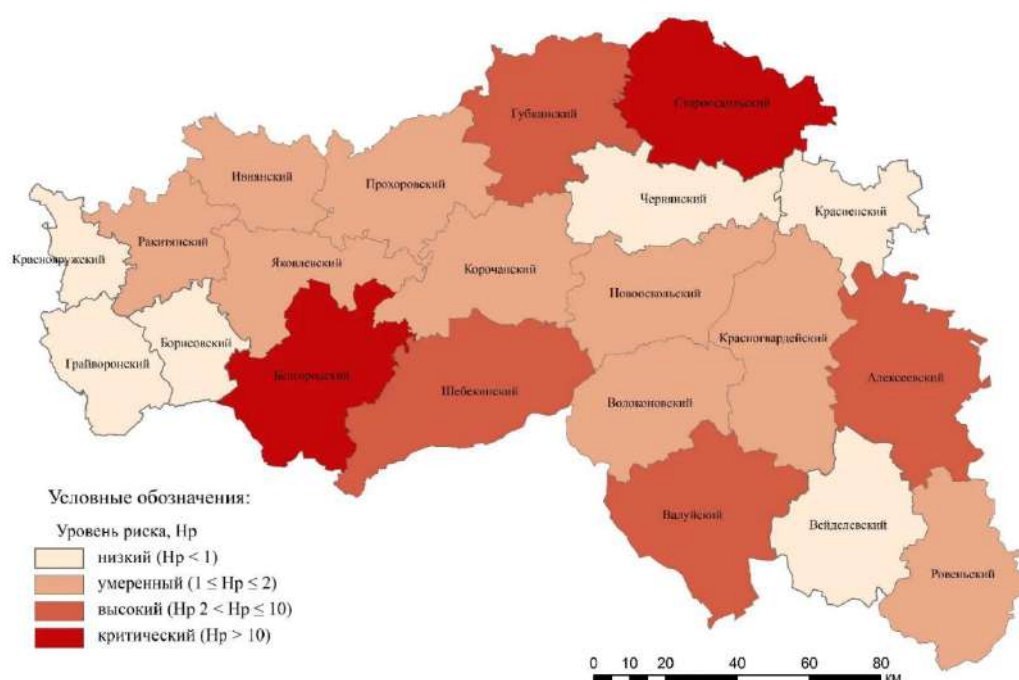


Рис. 2. Распределение уровней риска природной опасности (H_p) на территории Белгородской области
Fig. 2. Distribution of natural hazard risk levels (H_p) across the territory of the Belgorod region

Округа с умеренным уровнем риска природной опасности (H_p от 1 до 2) – Новооскольский (1,71), Ракитянский (1,69), Волоконовский (1,70), Прохоровский (1,19), Ивнянский (1,15), Яковлевский (1,48), Корочанский (1,50), Красногвардейский (1,40). Риск в этих округах существенный, но управляемый. Он обусловлен либо средней природной опасностью и небольшой численностью населения, либо (как в случае с Волоконовским м.о.) высокой опасностью, но очень малой долей населения (1,91 %). Округа с низким уровнем риска природной опасности ($H_p < 1$) – Борисовский (0,85), Грайворонский (0,87), Чернянский (0,97), Вейделевский (0,98), Ровенский (1,06), Краснояружский (0,77), Красненский (0,65). В этих округах совокупный риск для области минимален. Это связано с их малой численностью населения (в сумме менее 12 % от населения региона), что нивелирует даже высокие баллы природной опасности (например, у Красненского – 89,0).

Оценка коэффициента защищенности (V_p) показала выраженную поляризацию территории. Наименее защищенными ($V_p = 5,26–5,88$) оказались крупные промышленно-урбанизированные территории: г. Белгород, Старооскольский и Губкинский г.о. Эти территории характеризуются максимально высокой экологической напряженностью ($En = 8$), обусловленной концентрацией промышленного производства и транспортной инфраструктуры. При этом демографическая нагрузка в г. Белгород является одной из самых низких в области (706), а в Старом Осколе соответствует среднерегиональному высокому уровню (750). Наиболее защищенными ($V_p = 2,0–2,27$) стали аграрные районы с низкой промышленной нагрузкой (Борисовский, Вейделевский, Волоконовский, Корочанский и др.), где риски определяются преимущественно демографическим фактором.

Характеристика показателей защищенности территории Белгородской области представлена в табл. 5.

Таблица 5
Table 5

Характеристика показателей защищенности территории Белгородской области
(составлено авторами на основе [Белгородская область в цифрах..., 2024])
Characteristics of the territory protection indicators of the Belgorod region
(compiled by the authors based on [Belgorod Region in Figures..., 2024])

Показатель	Обозначение	Характеристика на основе данных	Значение (год)	Интерпретация
Экономическое развитие	E	Валовой региональный продукт (ВРП) на душу населения	859 545 руб. (2024)	Показатель отражает высокий экономический потенциал региона для финансирования мер по ЧС
Развитие инфраструктуры	I	Протяжённость автомобильных дорог; Основные показатели связи	1150 км общих границ; Общая протяжённость дорог 11 256 км, из них 9574 км дорог с твердым покрытием; Повсеместное распространение сотовой связи, Интернета и телевидения	Транспортная сеть и система связи развиты, что критически важно для эвакуации, доставки помощи и оповещения
Качество жизни	L	Ожидаемая продолжительность жизни при рождении	73,70 лет (2024 г.)	Интегральный индикатор находится на среднем уровне, указывает на удовлетворительное состояние здоровья населения, что влияет на устойчивость к последствиям ЧС
Развитость аварийно-спасательных служб и ГОЧС	D	Прямые данные отсутствуют в свободном доступе, косвенно: расходы бюджета	201 552 млн руб. (общие расходы, 2024 г.)	Аварийно-спасательные службы и ГОЧС представлены в каждом муниципальном округе

Вклад экологической и демографической нагрузки в защищённость от ЧС по муниципальным образованиям приведен в табл. 6.

Таблица 6
Table 6

Вклад экологической и демографической нагрузки в защищенность от ЧС
Contribution of environmental and demographic load to emergency protection

Муниципальное образование	Интегральный коэффициент эконапряжённости (E_n)	Демографическая нагрузка (D_p) ¹	Совместный вклад в защищённость от ЧС	Коэффициент защищённости (V_p)
Старооскольский	8	750	0,17	5,88
г. Белгород	8	706	0,19	5,26
Губкинский	6	750	0,33	3,00
Алексеевский	6	830	0,25	4,00
Валуйский	6	830	0,25	4,00
Шебекинский	6	750	0,33	3,00
Яковлевский	6	750	0,33	3,00
Белгородский	5	710	0,50	2,00
Борисовский	5	750	0,44	2,27
Вейделевский	5	750	0,44	2,27
Волоконовский	5	750	0,44	2,27
Грайворонский	5	750	0,44	2,27
Ивнянский	5	750	0,44	2,27
Корочанский	5	750	0,44	2,27
Красненский	5	750	0,44	2,27
Красногвардейский	5	750	0,44	2,27
Краснояржский	5	750	0,44	2,27
Новооскольский	5	750	0,44	2,27
Прохоровский	5	750	0,44	2,27
Ракитянский	5	750	0,44	2,27
Ровеньский	5	750	0,44	2,27
Чернянский	5	750	0,44	2,27

Примечание: ¹ Показатель демографической нагрузки рассчитан на 1000 чел. трудоспособного населения

Интегральная оценка риска природопользования (R_p) и последующее районирование позволили выделить пять уровней риска (табл. 7).

Таблица 7
Table 7

Ранжирование муниципальных образований Белгородской области по риску природопользования
Ranking of the municipalities of the Belgorod region by environmental management risk

№	Муниципальное образование	Коэффициент природной опасности (H_p)	Коэффициент защищённости (V_p)	Риск природопользования (R_p)	Интерпретация уровня риска
1	Белгородский (в т.ч. г. Белгород)	19,25	5,26	3,66	Катастрофический
2	Старооскольский	12,96	5,88	2,20	Катастрофический
3	Губкинский	5,00	3,00	1,67	Очень высокий
4	Шебекинский	4,54	3,00	1,51	Очень высокий
5	Валуйский	4,22	4,00	1,06	Высокий
6	Алексеевский	2,57	4,00	0,64	Повышенный
7	Яковлевский	1,48	3,00	0,49	Умеренный
8	Новооскольский	1,71	2,27	0,75	Повышенный
9	Волоконовский	1,70	2,27	0,75	Повышенный
10	Ракитянский	1,69	2,27	0,74	Повышенный
11	Корочанский	1,50	2,27	0,66	Повышенный
12	Красногвардейский	1,40	2,27	0,62	Повышенный
13	Прохоровский	1,19	2,27	0,52	Повышенный
14	Ивнянский	1,15	2,27	0,51	Повышенный
15	Ровеньский	1,06	2,27	0,47	Умеренный
16	Чернянский	0,97	2,27	0,43	Умеренный
17	Вейделевский	0,98	2,27	0,43	Умеренный
18	Краснояржский	0,77	2,27	0,34	Умеренный
19	Грайворонский	0,87	2,27	0,38	Умеренный
20	Борисовский	0,85	2,27	0,37	Умеренный
21	Красненский	0,65	2,27	0,30	Умеренный

Катастрофический риск ($R_p > 2,0$): Белгородский м.о. (с г. Белгород, $R_p = 3,66$) и Старооскольский г.о. ($R_p = 2,20$). На эти два образования, где проживает 51,3 % населения области, приходится максимальный совокупный риск, обусловленный синергией высокой уязвимости инфраструктуры и населения при низкой защищённости.

Очень высокий риск ($R_p = 1,5–2,0$): Губкинский ($R_p = 1,67$) и Шебекинский ($R_p = 1,51$) городские округа. Риск формируется значительной промышленной нагрузкой, развитием ЭГП и повышенной демографической уязвимостью.

Высокий риск ($R_p = 1,0–1,5$): Валуйский муниципальный округ ($R_p = 1,06$). Ключевой фактор – максимальная в области природная опасность (100 баллов).

Повышенный риск ($R_p = 0,5–1,0$): 8 муниципальных образований (Алексеевский, Новооскольский, Волоконовский и др.), где умеренная природная опасность сочетается со средней защищённостью.

Умеренный риск ($R_p < 0,5$): 8 преимущественно сельскохозяйственных районов (Красненский, Борисовский, Ровеньский и др.) с наименьшим потенциалом возникновения значительного ущерба.

Пространственное распределение риска природопользования в пределах Белгородской области отражено на карте (рис. 3).

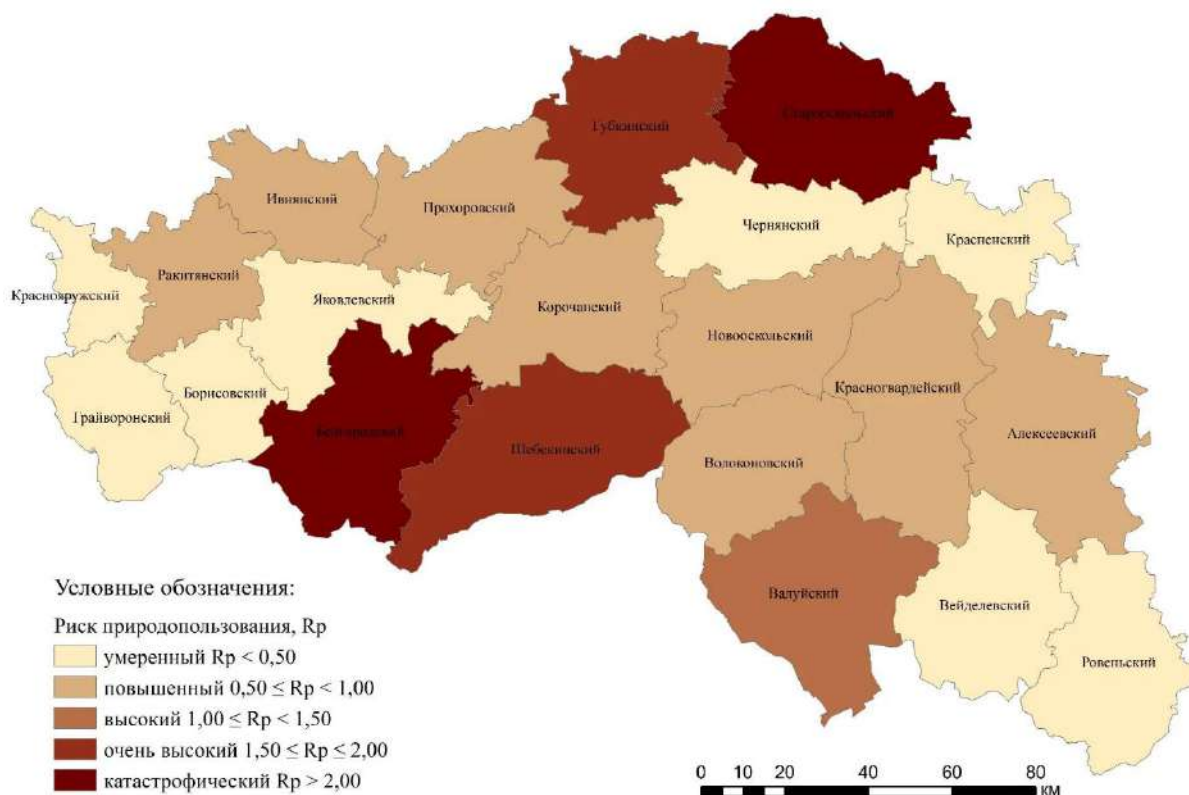


Рис. 3. Распределение уровней риска природопользования (R_p) на территории Белгородской области

Fig. 3. Distribution of environmental management risk (R_p) levels across the territory of the Belgorod region

Таким образом, около 65 % населения Белгородской области проживает в зонах катастрофического, очень высокого и высокого риска природопользования, что концентрирует основные угрозы техносферной безопасности и устойчивому развитию в ограниченном числе урбанизированных и промышленных территорий.

Полученные результаты подтверждают необходимость перехода от унифицированных к строго дифференцированным, адресным стратегиям управления рисками на региональном и муниципальном уровнях. Приоритетные меры должны быть сосредоточены на территориях с катастрофическим и очень высоким риском, где требуется комплексное сочетание инженерной защиты, градостроительного регулирования и усиления потенциала аварийно-спасательных служб. Для зон повышенного и умеренного риска достаточно внедрения адаптивных мероприятий в рамках текущей хозяйственной деятельности и систем мониторинга.

Заключение

На основании проведённого исследования по комплексной оценке рисков природопользования в Белгородской области с учётом развития экзогенных геологических процессов были сделаны следующие ключевые выводы.

Разработан и апробирован адаптированный методический подход, позволяющий интегрировать количественную оценку поражённости территории ведущими экзогенными геологическими процессами (эрозия, оползни, карст) с социально-экономическими факторами уязвимости и защищённости на муниципальном уровне. Нововведением стала корректировка

природной опасности на демографический вес территории, что позволило сместить акцент с площадного распространения процессов на потенциальный масштаб ущерба.

Выявлен «парадокс мегаполиса» – максимальный интегральный риск природопользования формируется не в районах с наибольшей природной опасностью, а в пределах крупнейших урбанизированных территорий – Белгородском (включая г. Белгород, где $Rp = 3,66$ и Старооскольском, где $Rp = 2,20$) городских округах, где проживает свыше 51 % населения области. Это обусловлено сочетанием высокой концентрации населения и инфраструктуры со средним уровнем природной опасности и значительной уязвимостью.

Выявлена резкая пространственная дифференциация риска, образующая две критические зоны (Белгородская и Старооскольско-Губкинская агломерации) и обширную периферию с умеренным уровнем опасности. При этом около 65 % населения области проживает в зонах высокого, очень высокого и катастрофического риска, что требует пересмотра подходов к территориальному планированию и распределению ресурсов системы предупреждения ЧС.

Определены приоритетные направления для дифференцированного управления рисками, включающие:

а) Внедрение почвозащитных технологий и развитие страхования урожая в агропромышленных районах с высокой эрозионной опасностью.

б) Модернизацию инфраструктуры, ограничение застройки в зонах риска и внедрение систем геомониторинга в городских агломерациях.

в) Учёт карт риска при территориальном планировании и дифференциацию ресурсов ГОЧС в зависимости от уровня риска муниципальных образований.

Таким образом, результаты исследования обеспечивают научно-практическую основу для перехода от реактивного к проактивному управлению комплексными рисками в Белгородской области, способствуя повышению техносферной безопасности, минимизации ущерба и обеспечению устойчивого развития региона в условиях возрастающей антропогенной нагрузки.

Список источников

- Белгородская область в цифрах. 2024. Белгород, Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Белгородской области (Белгородстат), 150 с.
- ГОСТ Р 22.1.12–2023. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Методика оценки рисков чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера на территориях субъектов Российской Федерации и муниципальных образований. 2023. М., Стандартинформ, 45 с.
- О состоянии и об охране окружающей среды Белгородской области в 2024 году. 2025. Белгород, Государственный доклад, 196 с.
- Методические рекомендации по оценке рисков возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера на территориях субъектов Российской Федерации (утв. МЧС России 01.12.2022 № 2–4–71–46–18). 2022. М., ВНИИ ГОЧС, 78 с.
- Киреева-Гененко И.А., Белоусова Л.И., Вендина Т.Н., Лебедева М.Г. 2021. Опасные природные явления и процессы на территории Белгородской области. Белгород, ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 136 с.
- Стратегия социально-экономического развития Белгородской области на период до 2030 года: Постановление Правительства Белгородской области № 514-пп от 28.12.2021. Электронный ресурс. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/3100202307130022> (дата обращения 16.02.2026).
- Петин А.Н., Петина В.И., Белоусова Л.И., Гайворонская Н.И. 2013. Экзогенные процессы рельефообразования равнинных территорий (на примере Белгородской области). Белгород, КОН-СТАНТА, 148 с.
- Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act of 1980 (CERCLA). Electronic resource. URL: <https://www.epa.gov/enforcement/comprehensive-environmental-response-compensation-and-liability-act-cercla-and-federal> (date of access 16.02.2026).

- Directive 2004/35/EC of the European Parliament and of the Council of 21 April 2004 on environmental liability with regard to the prevention and remedying of environmental damage. 2004. Legislation, European Union: 56–75.
- Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. 2015. United Nations, 25 p.
- UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction. 2017. Geneva, United Nations International Strategy for Disaster Reduction, 35 p.

Список литературы

- Белозеров А.И., Гаврилина О.П., Семенихин Н.А. 2025. Современные подходы к оценке экологической безопасности природопользования. Вестник Совета молодых ученых Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева, 3(25): 37–43.
- Бычков И.В., Тасейко О.В., Постникова У.С., Москвичев В.В., Шокин Ю.И. 2024. Управление территориальными рисками развития и защищенность социально-природно-техногенных систем. Вестник Российской академии наук, 94(11): 989–1002. <https://doi.org/10.31857/S0869587324110039>
- Вендина Т.Н., Белоусова Л.И. 2019. Геоэкологическая оценка состояния окружающей среды Белгородской области под воздействием промышленности по добыче ОПИ. В кн.: Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и на сопредельных территориях. Материалы VIII Международной научной конференции, Белгород, 22–25 октября 2019. Белгород, Издательский дом «Белгород»: 315–319.
- Географический атлас Белгородской области: природа, общество, хозяйство. 2018. Под ред. А.Г. Корнилова. Белгород, Константа, 199 с.
- Корнилов А.Г., Петин А.Н., Дроздова Е.А. 2014. Геоморфологические и эколого-экономические аспекты рекультивации отвалов вскрышных пород горнодобывающих предприятий региона КМА. Горный журнал, 8: 74–78.
- Красников Р.В., Хрисанов В.А., Сарычев А.В., Архипцев И.Н. 2024. Экзогенные процессы формирования современной геоэкологической ситуации в Белгородской области. Вестник Забайкальского государственного университета, 30(1): 40–49. <https://doi.org/10.2109/2227-9245-2024-30-1-40-49>
- Кузьмин С.Б. 2015. Мировые оценки риска природопользования. Проблемы современной науки и образования, 10(40): 120–125.
- Кузьмин С.Б. 2020. Сравнительная оценка риска природопользования в субъектах Российской Федерации. Проблемы анализа риска, 17(5): 48–71. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2020-17-5-48-71>
- Маркешина Т.А. 2021. Повышение устойчивости городов и муниципальных образований от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера как важная социальная задача. В кн.: Образовательное пространство как среда формирования культуры безопасности жизнедеятельности населения. Международная научно-практическая конференция, Брянск, 02–04 июня 2021. Брянск, Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского: 175–179.
- Миканович Д.С., Морозов А.А., Гницевич А.И., Гусев А.С. 2024. Методика оценки рисков чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси, 8(2): 209–224. <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2024.8-2.209>
- Михеева А.С., Ботоева Н.Б., Бардаханова Т.Б., Аюшеева С.Н., Мекуш Г.Е., ... Сангадиева И.Г. 2024. Оценка последствий эколого-экономических рисков в аграрном природопользовании. Экономика и управление: проблемы, решения, 7(5(146)): 84–92. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2024.05.07.009>
- Михно В.Б., Быковская О.П., Горбунов А.С. 2020. Региональные особенности литоландшафтогенеза Центрального Черноземья. Региональные геосистемы, 44(1): 29–40. <https://doi.org/10.18413/2712-7443-2020-44-1-29-40>
- Морина О.М., Вовчук Е.Е., Пилипич Т.А., Озарян Ю.А. 2012. Оценка экологической напряженности территории для разработки природоохранных мероприятий в зоне влияния ОАО «Корфовский каменный карьер». Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2: 155–160.

- Москвичев В.В., Постникова У.С., Тасейко О.В. 2022. Кластерный анализ в оценке территориальных рисков социально-природно-техногенных систем. *Вычислительные технологии*, 27(3): 112–124. <https://doi.org/10.25743/ICT.2022.27.3.009>
- Олтян И.Ю., Жданенко И.В. 2019. Оценка потенциальной уязвимости общества, экономики и государства перед природными и техногенными угрозами. *Технологии гражданской безопасности*, 16(2(60)): 8–14. <https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2019.16.2.60.2.8>
- Павлюк Я.В., Саблина О.М., Смирнова С.Б., Гладкая К.А. 2022. Анализ закономерностей развития линейной эрозии в бассейнах рек на юге Среднерусской возвышенности с использованием ГИС. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 14(3): 192–212. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-192-212>
- Природно-техногенная безопасность: оценка и управление рисками. 2018. Под ред. Н.Г. Рыбальского. М., НИА-Природа, 398 с.
- Саблина О.М., Чендев Ю.Г., Шайдурова А.В. 2019. Закономерности распределения овражных форм на территории Белгородской области. В кн.: Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и на сопредельных территориях. Материалы VIII Международной научной конференции, Белгород, 22–25 октября 2019. Белгород, Издательский дом «Белгород»: 368–371.
- Саблина О.М., Нарожная А.Г. 2023. Распространение оврагов на территории Белгородской области. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 3: 25–34. <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/3/25-34>
- Сарычев А.В., Архипцев И.Н., Караулова Е.А. 2024. Гравитационные процессы на территории Белгородской области и их влияние на экологическую ситуацию. В кн.: Геоэкология и рациональное недропользование: от науки к практике. IV Всероссийской научной конференции молодых ученых, Белгород, 10 октября 2024. Белгород, Белгородский государственный национальный исследовательский университет: 180–184.
- Тулупов А.С. 2021. Оценка риска загрязнения окружающей среды: обзор и систематизация методологических подходов и методического обеспечения. *Вестник Московского университета. Серия 6: Экономика*, 6: 3–27. <https://doi.org/10.38050/0130010520216.1>
- Фишберн П. 1978. Теория полезности для принятия решений. М., Наука, 352 с.
- Фурманова Т.Н., Петина М.А., Петин А.Н., Белоусова Л.И. 2016. Техногенная трансформация ландшафтов в зоне влияния активно разрабатываемых месторождений полезных ископаемых региона КМА. *Успехи современного естествознания*, 11–2: 422–426.
- Хрисанов В.А., Колмыков С.Н. 2017. Масштабы трансформации структурно-литологической основы, исходного рельефа и активизации современных экзогенных процессов в результате антропогенной деятельности на территории Белгородской области. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки*, 18(267): 94–109.
- Bell M.L., Davis A.G.H. 2019. The Public Health Impacts of Climate Change. *American Journal of Preventive Medicine*, 35(5): 401–402.
- Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) Handbook. 2019. Southfield, MI, Automotive Industry Action Group (AIAG), 150 p.
- Hazard and Operability Study (HAZOP). 2021. In: *Reliability Assessment of Safety and Production Systems*. Ed. by Signoret J.-P., Leroy A. Switzerland, Springer Cham: 157–164.
- Pelling M. 2003. *The Vulnerability of Cities: Natural Disasters and Social Resilience*. London, Earthscan, 256 p.
- Smith K. 2021. *Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster*. London, Routledge, 478 p.
- UN-Habitat. 2022. *Cities at Risk: Managing Environmental Hazards in Urban Areas*. Nairobi, UN-Habitat, 89 p.

References

- Belozеров А.И., Гаврилина О.П., Семенikhин Н.А. 2025. Modern Approaches to Assessing the Environmental Safety of Nature Management. *Vestnik Soveta molodykh uchenykh Riazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta imeni P.A. Kostycheva*, 3(25): 37–43 (in Russian).
- Bychkov I.V., Taseiko O.V., Postnikova U.S., Moskvichev V.V., Shokin Yu.I. 2024. Management of Territorial Risks of Development and Security of Social-Natural-Technogenic Systems. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 94(11): 989–1002 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0869587324110039>

- Vendina T.N., Belousova L.I. 2019. Geoekologicheskaya otsenka sostoyaniya okruzhaiushchei sredy Belgorodskoi oblasti pod vozdeystviem promyshlennosti po dobyche OPI [Geoecological Assessment of the Environmental State of the Belgorod Region Under the Influence of the Mining Industry]. In: Problemy prirodopolzovaniya i ekologicheskaya situatsiya v Evropeiskoi Rossii i na sopredel'nykh territoriyakh [Problems of Nature Management and the Environmental Situation in European Russia and Adjacent Territories]. Proceedings of the VIII International Scientific Conference, Belgorod, 22–25 October 2019. Belgorod, Publ. Belgorod: 315–319.
- Geograficheskii atlas Belgorodskoi oblasti: priroda, obshchestvo, khoziaistvo [Geographical Atlas of the Belgorod Region: Nature, Society, Economy]. Ed. by A.G. Kornilov. Belgorod, Publ. Constanta, 199 p.
- Kornilov A.G., Petin A.N., Drozdova E.A. 2014. Geomorfologicheskie i ekologo-ekonomicheskie aspekty rekul'tivatsii otvalov vskryshnykh porod gornodobyvaiushchikh predpriatii regiona KMA [Geomorphological and Ecological-Economic Aspects of Recultivation of Overburden Dumps at Mining Enterprises in the KMA Region]. Mining Journal, 8: 74–78 (in Russian).
- Krasnikov R.V., Khrisanov V.A., Sarychev A.V., Arkhiptsev I.N. 2024. Exogenous Processes of Formation of the Modern Geoecological Situation in the Belgorod Region. Transbaikalian State University Journal, 30(1): 40–49 (in Russian). <https://doi.org/10.2109/2227-9245-2024-30-1-40-49>
- Kuzmin S.B. 2015. Mirovye otsenki riska prirodopolzovaniya [Global Assessments of Environmental Risk]. Problems of Modern Science and Education, 10(40): 120–125.
- Kuzmin S.B. 2020. Comparative Nature Management Risk Assessment in the Russian Federation Districts. Issues of Risk Analysis, 17(5): 48–71 (in Russian). <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2020-17-5-48-71>
- Markeshina T.A. 2021. Increasing the Resilience of Cities and Municipalities from Natural and Man-Made Emergencies as an Important Social Task. In: Educational Space as an Environment for Developing a Culture of Life Safety in the Population. International Scientific and Practical Conference, Bryansk, 2–4 June 2021. Bryansk, Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky: 175–179 (in Russian).
- Mikanovich D.S., Morozov A.A., Gnitsevich A.I., Gusev A.S. 2024. Methodology of Risk Assessment of Natural and Technogenic Emergencies. Journal of Civil Protection, 8(2): 209–224 (in Russian). <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2024.8-2.209>
- Mikheeva A.S., Botoeva N.B., Bardakhanova T.B., Ayusheeva S.N., Mekush G.E., ... Sangadieva I.G. 2024. Assessment of the Consequences of Environmental and Economic Risks in Agricultural Environmental Management. Economics and Management: Problems, Solutions, 7(5(146)): 84–92 (in Russian). <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2024.05.07.009>
- Mihno V.B., Bykovskaya O.P., Gorbunov A.S. 2020. Regional Features of Lithological Genesis of Landscapes of the Central Chernozems Region. Regional Geosystems, 44(1): 29–40. <https://doi.org/10.18413/2712-7443-2020-44-1-29-40>
- Morina O.M., Vovchuk E.E., Pilipich T.A., Ozaryan Yu.A. 2012. Otsenka ekologicheskoi napriazhennosti territorii dlia razrabotki prirodookhrannykh meropriatii v zone vliianiia OAO «Korfovskii kamennyi kar'er» [Assessment of Ecological Tension of the Territory for the Development of Environmental Protection Measures in the Zone of Influence of Korfovsky Stone Quarry]. Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal), 2: 155–160.
- Moskvichev V.V., Postnikova U.S., Taseiko O.V. 2022. Cluster Analysis in the Assessment of Territorial Risks for Social-Natural-Technogenic Systems. Computational Technologies, 27(3): 112–124 (in Russian). <https://doi.org/10.25743/ICT.2022.27.3.009>
- Oltyan I.J., Zhdanenko I.V. 2019. Assessing Potential Vulnerability of Society, Economy and the State to Natural and Human-Made Hazards. Civil Security Technology, 16(2(60)): 86–95 (in Russian). <https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2019.16.2.60.2.8>
- Pavlyuk Ya.V., Sablina O.M., Smirnova S.B., Gladkaya K.A. 2022. Regularities Analysis of the Linear Erosion Development in River Basins in the South of the Central Russian Hill with the Use of GIS. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 14(3): 192–212 (in Russian). <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-192-212>
- Prirodno-tekhnogennaya bezopasnost': otsenka i upravlenie riskami [Natural and Man-Made Safety: Risk Assessment and Management]. 2018. Ed. by N.G. Rybalskiy. Moscow, Publ. NIA-Priroda, 398 p.
- Sablina O.M., Chendev Yu.G., Shaidurova A.V. 2019. Zakonomernosti raspredeleniya ovrazhnykh form na territorii Belgorodskoi oblasti [Patterns of Distribution of Gully Forms on the Territory of the Belgorod Region]. Problemy prirodopolzovaniya i ekologicheskaya situatsiya v Evropeiskoi Rossii i

- na sopredel'nykh territoriiakh]. Proceedings of the VIII International Scientific Conference, Belgorod, 22–25 October 2019. Belgorod, Publ. Belgorod: 368–371.
- Sablina O.M., Narozhnyaya A.G. 2023. Spread of Ravines in the Belgorod Region. Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology, 3: 25–34 (in Russian). <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/3/25-34>
- Sarychev A.V., Arkhiptsev I.N., Karaulova E.A. 2024. Gravitatsionnye protsessy na territorii Belgorodskoi oblasti i ikh vliianie na ekologicheskuiu situatsiiu [Gravitational Processes in the Belgorod Region and Their Impact on the Environmental Situation]. Geoekologiya i ratsional'noe nedropol'zovanie: ot nauki k praktike [Geoecology and Rational Subsoil Use: from Science to Practice]. IV All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, Belgorod, 10 October 2024. Belgorod, Publ. Belgorod State National Research University: 180–184.
- Tulupov A.S. 2021. Environmental Risk Assessment: Review and Systematization of Methodology and Methodical Support. Lomonosov Economics Journal, 6: 3–27 (in Russian). <https://doi.org/10.38050/0130010520216.1>
- Fishburn P.C. 1970. Utility Theory for Decision Making. New York, Publ. Wiley, 234 p.
- Furmanova T.N., Petina M.A., Petin A.N., Belousova L.I. 2016. Technogenic Landscapes Transformation in the Area of Influence Actively Developing Mineral Deposits of the Region KMA. Advances in current natural sciences, 11–2: 422–426 (in Russian).
- Hrisanov V.A., Kolmykov S.N. 2017. Scale of Transformation of Structural-Lithological Basis, Initial Relief and Activation of Modern Exogenous Processes as Results of Anthropogenic Activity on the Territory of the Belgorod Region. Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural sciences series, 18(267): 94–109 (in Russian).
- Bell M.L., Davis A.G.H. 2019. The Public Health Impacts of Climate Change. American Journal of Preventive Medicine, 35(5): 401–402.
- Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) Handbook. 2019. Southfield, MI, Automotive Industry Action Group (AIAG), 150 p.
- Hazard and Operability Study (HAZOP). 2021. In: Reliability Assessment of Safety and Production Systems. Ed. by Signoret J.-P., Leroy A. Switzerland, Springer Cham: 157–164.
- Pelling M. 2003. The Vulnerability of Cities: Natural Disasters and Social Resilience. London, Earthscan, 256 p.
- Smith K. 2021. Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster. London, Routledge, 478 p.
- UN-Habitat. 2022. Cities at Risk: Managing Environmental Hazards in Urban Areas. Nairobi, UN-Habitat, 89 p.

*Поступила в редакцию 10.12.2025;
поступила после рецензирования 09.02.2026;
принята к публикации 12.06.2026*

*Received December 10, 2025;
Revised February 09, 2026;
Accepted June 12, 2026*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вендина Татьяна Николаевна, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры географии, геоэкологии и безопасности жизнедеятельности, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Белюсова Людмила Ивановна, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры географии, геоэкологии и безопасности жизнедеятельности, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatyana N. Vendina, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Geography, Geoecology and Life Safety, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Ludmila I. Belousova, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Geography, Geoecology and Life Safety, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Киреева-Гененко Ирина Александровна, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры географии, геоэкологии и безопасности жизнедеятельности, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Irina A. Kireeva-Genenko, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Geography, Geoecology and Life Safety, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Юдина Юлия Валериевна, кандидат географических наук, доцент кафедры географии, геоэкологии и безопасности жизнедеятельности, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Yulia V. Yudina, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Geography, Geoecology and Life Safety, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

УДК 504.455(470.324)
DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-3-527-537
EDN DINKQL

Оценка экологического состояния Воронежского водохранилища по результатам мониторинга индекса загрязненности воды

¹Прожорина Т.И., ¹Клепиков О.В., ^{1,2}Куролап С.А., ¹Суханов П.А., ¹Боева А.С.

¹Воронежский государственный университет

Россия, 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1

²Белгородский государственный национальный исследовательский университет

Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

sukhanov.1990@bk.ru

Аннотация. Цель исследования – комплексная оценка экологического состояния Воронежского водохранилища на основе анализа пространственно-временной динамики индекса загрязненности воды (ИЗВ). В работе определены приоритетные загрязняющие вещества, зоны наибольшего экологического неблагополучия и сезонные закономерности ухудшения качества воды. Исследование основано на данных гидрохимического мониторинга за период с января 2023 г. по февраль 2026 г. Анализ проведен по четырем контрольным створам, репрезентативно отражающим состояние акватории водохранилища, расположенного на территории г. Воронежа. Оценка степени загрязнения выполнена в соответствии с утвержденной методикой расчета ИЗВ. Результаты показали, что качество воды в водохранилище характеризуется как хронически загрязненное. Выявлен устойчивый градиент загрязнения: среднегодовые значения ИЗВ ухудшаются от 1,35–1,61 (III класс, «умеренно загрязненная») в верхнем створе до 3,36–3,64 (IV класс, «загрязненная») в зоне, расположенной ниже города. Определена четкая сезонная цикличность с переходом к IV–V классам качества («загрязненная» – «грязная» вода) в летне-осенний период. Лимитирующими загрязнителями, определяющими высокий уровень ИЗВ, являются медь, нефтепродукты, фосфаты и взвешенные вещества. Отсутствие положительной динамики за трехлетний период наблюдений указывает на недостаточную эффективность действующих водоохраных мер.

Ключевые слова: Воронежское водохранилище, индекс загрязненности воды (ИЗВ), гидрохимический мониторинг, приоритетные загрязняющие вещества, качество поверхностных вод

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-00219, <https://rscf.ru/project/25-17-00219/>

Для цитирования: Прожорина Т.И., Клепиков О.В., Куролап С.А., Суханов П.А., Боева А.С. 2026. Оценка экологического состояния Воронежского водохранилища по результатам мониторинга индекса загрязненности воды. Региональные геосистемы, 50(3): 527–537. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-527-537 EDN: DINKQL

Assessing the Ecological Status of the Voronezh Reservoir Based on the Monitoring of the Water Pollution Index

Tatiana I. Prozhorina¹, Oleg V. Klepikov¹, Semen A. Kurolap^{1,2},
Pavel A. Sukhanov¹, Anastasia S. Boeva¹

¹Voronezh State University

Universitetskaya Sq., Voronezh 394018, Russia

²Belgorod State National Research University

85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia

sukhanov.1990@bk.ru

© Прожорина Т.И., Клепиков О.В., Куролап С.А., Суханов П.А., Боева А.С., 2026

Abstract. The study was aimed at providing a comprehensive assessment of the ecological status of the Voronezh Reservoir based on the analysis of spatiotemporal dynamics of the Water Pollution Index (WPI). The study was based on data from long-term hydrochemical monitoring from January 2023 to February 2026. We conducted analysis at four monitoring sections, which representatively reflect the state of the reservoir water area within the city of Voronezh. The assessment of pollution degree was carried out in accordance with the approved WPI calculation methodology. Priority pollutants were identified, as well as zones of greatest ecological distress and seasonal patterns of water quality deterioration. The results revealed a chronic pollution of the reservoir water. We have identified a stable pollution gradient: the average annual WPI values deteriorate from 1.35–1.61 (Class III, "moderately polluted") in the upper cross-section to 3.36–3.64 (Class IV, "polluted") in the zone located downstream of the city. A clear seasonal cyclicity has been determined, with a transition to Class IV–V quality ("polluted" – "dirty" water) during the summer and autumn period. The limiting pollutants determining the high WPI level are copper, petroleum products, phosphates, and suspended solids. The absence of a positive trend over the three-year observation period indicates insufficient effectiveness of the current water protection measures.

Keywords: Voronezh Reservoir, Water Pollution Index (WPI), hydrochemical monitoring, priority pollutants, surface water quality

Acknowledgements: The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 25-17-00219, <https://rscf.ru/project/25-17-00219/>

For citation: Prozhorina T.I., Klepikov O.V., Kurolap S.A., Sukhanov P.A., Boeva A.S. 2026. Assessing the Ecological Status of the Voronezh Reservoir Based on the Monitoring of the Water Pollution Index. Regional Geosystems, 50(3): 527–537 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-527-537 EDN: DINKQL

Введение

Загрязнение поверхностных водных объектов остается одной из наиболее острых глобальных экологических проблем, оказывающей прямое влияние на здоровье населения, состояние экосистем и социально-экономическое развитие территорий. В международной практике отмечается, что поступление в водные объекты биогенных элементов, нефтепродуктов, тяжелых металлов и патогенных микроорганизмов ведет к эвтрофикации, деградации водных сообществ, сокращению биоразнообразия и формированию зон экологического бедствия [Chowdhury et al., 2016; Daud et al., 2017]. Особую опасность представляет антропогенная нагрузка на водоемы, расположенные в границах крупных городов, где сочетаются точечные и рассредоточенные источники загрязнения [Gall et al., 2015, Fisher et al., 2021]. В связи с этим во многих странах мира развиваются системы комплексного мониторинга, направленные на количественную оценку вклада различных источников и разработку мер по снижению нагрузки [Heibati et al., 2017].

В Российской Федерации проблема загрязнения водных объектов также сохраняет свою актуальность. Урбанизированные территории, в том числе крупные города, вносят значительный вклад в ухудшение качества воды из-за сбросов недостаточно очищенных сточных вод, поверхностного стока с застроенных и сельскохозяйственных земель, а также в результате исторически сложившейся промышленной нагрузки [Калашников и др., 2020]. В условиях, когда более 70 % населения страны проживает в городах, обеспечение населения безопасной питьевой водой и сохранение водных экосистем становятся важнейшими задачами государственной экологической политики [Баскакова и др., 2020].

Воронежское водохранилище, являясь крупнейшим в России искусственным водоемом, расположенным в пределах городской черты, представляет собой яркий пример водного объекта, испытывающего интенсивную многофакторную антропогенную нагрузку [Силкин, 2012]. Его экологическое состояние вызывает серьезную озабоченность, поскольку водохранилище выполняет ключевые функции источника

питьевого водоснабжения, рекреационной зоны и элемента экологического каркаса города [Анциферова, 2015; Елисеев, Силкин, 2025]. Основные причины изменения допустимой степени загрязненности воды Воронежского водохранилища – это слабое влияние процессов самоочищения и значительное количество источников загрязнения [Чувычкин и др., 2018]. Многолетние наблюдения и научные исследования свидетельствуют о хроническом превышении предельно допустимых концентраций по широкому спектру загрязняющих веществ, периодическом «цветении» воды, вызванном развитием цианобактерий [Сейдалиев и др., 2017; Попова и др., 2021], а также о микробиологическом загрязнении, создающем прямые риски для здоровья населения [Мишон, 2010; Залата, Силкин, 2015; Анциферова, Беспалова, 2016]. В воде, донных отложениях, водорослях и почве обнаружены вещества, способные вызывать генетические изменения в клетках [Иванова, 2020]. Однако, несмотря на накопленный массив данных, системная оценка динамики загрязнения с использованием интегральных показателей, таких как индекс загрязненности воды (ИЗВ), и ее увязка с конкретными источниками воздействия остаются недостаточно разработанными.

Теоретическая значимость настоящего исследования заключается в комплексном подходе к анализу экологического состояния Воронежского водохранилища на основе обработки данных многолетнего мониторинга и расчета ИЗВ.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования ее результатов для обоснования приоритетных направлений реабилитации водохранилища, оптимизации системы мониторинга, а также для разработки конкретных водоохраных мероприятий, нацеленных на снижение нагрузки от основных источников загрязнения.

Целью настоящего исследования является комплексная оценка экологического состояния Воронежского водохранилища на основе анализа многолетней динамики индекса загрязненности воды. Для ее достижения поставлены следующие задачи: систематизация данных гидрохимического мониторинга, расчет и картографирование ИЗВ для различных участков акватории, выявление зон с наиболее неблагоприятными показателями и основных трендов изменения качества воды, а также разработка научно обоснованных рекомендаций по совершенствованию системы наблюдений и природоохранных мер. Реализация такого подхода позволит создать основу для эффективного управления качеством водной среды Воронежского водохранилища.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлось Воронежское водохранилище, расположенное в пределах города Воронежа. Анализ экологического состояния водного объекта проводился на основании данных государственного мониторинга качества поверхностных вод, предоставленных территориальными органами Росгидромета (ФГБУ «Центр регионального мониторинга состояния окружающей среды») и обработанных авторами. Исследование охватывало период с января 2023 по февраль 2026 года.

Забор проб воды для гидрохимического анализа проводился ежемесячно на четырех контрольных створах, расположенных на протяжении акватории водохранилища:

- створ в районе плотины гидроузла (водослив), 7 км ниже г. Воронежа;
- створ в районе плотины гидроузла (шлюз), 7 км ниже г. Воронежа;
- створ в 2,5 км ниже г. Воронежа (1,2 км ниже пос. Песчанка);
- створ в 5,5 км выше г. Воронежа (у автомобильного моста).

Указанные створы репрезентативно отражают качество воды в ключевых зонах водохранилища: приплотинной (нижней), промежуточной, подверженных максимальной антропогенной нагрузке, и верхней (фоновой).

Для комплексной оценки степени загрязнения воды использовался расчет индекса загрязненности воды (ИЗВ) в соответствии с действующей нормативно-методической

базой – Руководящим документом РД 52.24.643-2002 «Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязнения поверхностных вод по гидрохимическим показателям»¹. Данная методика является стандартизированным инструментом для интегральной оценки состояния водных объектов на территории Российской Федерации.

ИЗВ представляет собой количественный показатель, рассчитываемый на основе результатов определения ряда гидрохимических показателей в отобранных пробах воды. В соответствии с методикой, значение ИЗВ позволяет отнести качество воды к одному из семи классов: от «очень чистой» ($\text{ИЗВ} < 0,3$) до «чрезвычайно грязной» ($\text{ИЗВ} \geq 10$).

Обработка первичных данных мониторинга, расчет ИЗВ для каждого створа за исследуемый период, анализ динамики показателей и статистическая обработка результатов выполнены с использованием программного обеспечения *Microsoft Excel*. Такой подход обеспечил сопоставимость и объективность оценки пространственно-временных изменений экологического состояния Воронежского водохранилища.

Результаты и их обсуждение

По результатам проведенного гидрохимического мониторинга за период с января 2023 по февраль 2026 года была рассчитана динамика индекса загрязненности воды (ИЗВ) для четырех контрольных створов Воронежского водохранилища (табл. 1). Полученные данные позволили выявить устойчивые пространственно-временные закономерности в состоянии водного объекта.

Таблица 1

Table 1

Динамика индекса загрязненности воды в Воронежском водохранилище (2023–2026 гг.)

Dynamics of the Water Pollution Index in the Voronezh Reservoir (2023–2026)

Год	Янв	Февр	Март	Апр	Май	Июнь	Июль	Авг	Сент	Окт	Нояб	Дек	Ср. знач.
Воронежское водохранилище, г. Воронеж, 7 км ниже города, в створе плотины гидроузла (шлюз)													
2023	–	1,3	–	1,8	1,5	–	–	3,2	–	–	–	–	1,95
2024	–	1,7	–	1,9	1,8	–	–	3,7	–	–	–	–	2,28
2025	–	1,6	–	1,9	2,4	–	–	2,4	–	–	–	–	2,08
2026	–	1,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Воронежское водохранилище, г. Воронеж, 7 км ниже города, в створе плотины гидроузла (водослив)													
2023	1,3	1,4	1,8	1,6	1,5	2,2	2,9	3,3	3,9	3,5	2,1	1,6	2,26
2024	1,5	1,5	2,5	1,8	1,8	2,1	2,3	3,2	3,0	2,2	2,4	1,8	2,18
2025	1,9	1,9	1,9	1,9	2,4	2,7	3,4	2,2	3,2	3,0	2,1	2,0	2,38
2026	1,8	1,8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Воронежское водохранилище, г. Воронеж, 2,5 км ниже города, 1,2 км ниже п. Песчанка													
2023	–	–	–	2,6	3,1	3,2	3,9	3,5	4,0	4,3	–	–	3,51
2024	–	–	–	3,2	2,4	2,4	3,5	4,6	3,7	3,7	–	–	3,36
2025	–	–	–	2,9	3,0	3,1	4,5	3,8	4,0	4,2	–	–	3,64
2026	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Воронежское водохранилище, г. Воронеж, 5,5 км выше города, у автомобильного моста													
2023	1,6	2,1	2,2	1,4	0,9	1,6	1,4	1,9	1,9	1,4	1,6	1,3	1,61
2024	1,1	2,3	2,7	1,4	1,0	1,6	1,5	1,9	1,6	1,4	1,3	1,2	1,50
2025	1,1	1,1	1,3	1,1	1,1	1,4	1,8	2,0	1,7	1,3	1,2	1,1	1,35
2026	1,2	1,2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Обобщенные сведения по индексу загрязненности воды в Воронежском водохранилище													
2023	1,45	1,75	2,00	1,85	1,75	2,33	2,73	2,98	3,27	3,07	1,85	1,45	2,33
2024	1,30	1,83	2,60	2,08	1,75	2,03	2,43	3,35	2,77	2,43	1,85	1,50	2,33
2025	1,50	1,50	1,60	1,95	2,23	2,30	3,23	2,60	3,23	2,88	1,65	1,55	2,36
2026	1,40	1,40	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

¹ РД 52.24.643-2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязнения поверхностных вод по гидрохимическим показателям. 2002. Ростов-на-Дону, Росгидромет, 55 с.

Наглядно эти закономерности представлены на рис. 1, совмещающем схему расположения мониторинговых точек и график динамики ИЗВ. Пространственное распределение показателей демонстрирует четкий градиент загрязнения: наиболее благоприятная ситуация (среднегодовой ИЗВ 1,35–1,61, класс качества воды III («умеренно загрязненная»)) отмечается в верхнем (фоновом) створе у автомобильного моста (точка 4), а наиболее критические значения (среднегодовой ИЗВ 3,36–3,64, класс IV («загрязненная»)) зафиксированы в створе, расположенном в 2,5 км ниже города (точка 3). В приплотинной зоне (точки 1 и 2) среднегодовые показатели также соответствуют классу III (1,95–2,38), однако здесь в летне-осенний период регулярно фиксируются переходы в класс IV с показателями до 3,9. В отдельные месяцы на участке точки 3 значения ИЗВ достигали 4,6 (август 2024 г.), что соответствует классу V («грязная» вода).

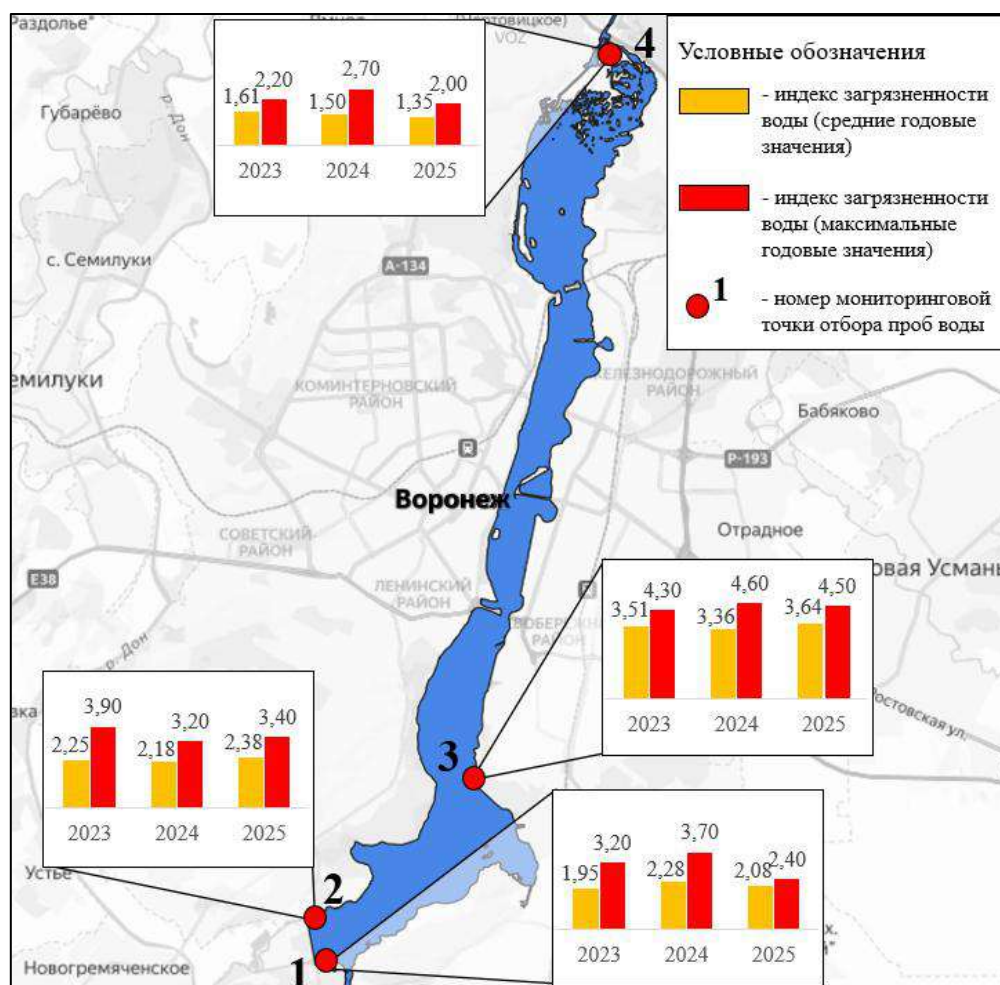


Рис. 1. Схема расположения мониторинговых точек и динамика индекса загрязненности воды в Воронежском водохранилище за 2023–2025 гг.

Fig. 1. Layout of monitoring points and dynamics of the Water Pollution Index in the Voronezh Reservoir, 2023–2025

Временная динамика и сезонные закономерности. Анализ данных выявил выраженную сезонную цикличность: качество воды ухудшается с III класса («умеренно загрязненная») в зимние месяцы (декабрь–февраль) до IV класса («загрязненная») в летне-осенний период (июнь–октябрь). Пиковые значения загрязнения приходятся на июль–сентябрь, что связано с комплексом факторов: максимальной рекреационной нагрузкой, повышением температуры воды, снижением водообмена и интенсивностью поверхностного стока. Снижение ИЗВ начинается в ноябре с переходом к зимней стабилизации.

Оценка многолетней тенденции. Среднегодовые значения обобщенного ИЗВ за весь период наблюдений стабильно находятся в диапазоне 2,33–2,36, что соответствует границе между III и IV классами качества. Это свидетельствует о хроническом характере загрязнения водохранилища в среднем по всей акватории. Отсутствие выраженной положительной динамики за трехлетний период подтверждает, что существующая антропогенная нагрузка носит устойчивый характер, а реализуемые водоохранные меры недостаточны для перелома негативной тенденции.

Структура и ведущие загрязнители. Анализ гидрохимических показателей, формирующих ИЗВ, позволил выделить ведущие загрязняющие вещества и связать их с потенциальными источниками. Лимитирующим показателем загрязнения и наиболее часто встречающимся веществом является медь, присутствующая практически во всех расчетах ИЗВ. Данный факт свидетельствует о наличии постоянного техногенного источника, которым могут быть промышленные стоки или коррозия трубопроводных систем [Прожорина и др., 2021; Баскакова, Куролап, 2022].

Стабильное присутствие фосфатов указывает на постоянное поступление фосфорных соединений, преимущественно со сточными бытовыми и промышленными водами, что является ключевым фактором процессов эвтрофикации [Механтьев и др., 2020; Баскакова и др., 2023].

Нефтепродукты фиксируются с высокой частотой, особенно в теплый период (май–сентябрь), что коррелирует с периодами активной рекреационной и хозяйственной деятельности на акватории (судоходство) и усилением поверхностного стока с автодорог [Дмитриева, Бучик, 2023].

Значительную роль в формировании ИЗВ играют взвешенные вещества, концентрация которых возрастает в периоды паводков и ветрового перемешивания, что свидетельствует об активных процессах эрозии берегов, смыва с урбанизированных территорий и вторичного загрязнения за счет донных отложений [Дмитриева, Жигулина, 2020; Дмитриева и др., 2022].

Заключение

По результатам многолетнего гидрохимического мониторинга и расчета индекса загрязненности воды за период с января 2023 по февраль 2026 года установлено, что экологическое состояние Воронежского водохранилища в черте города Воронежа характеризуется как хронически загрязненное. Ключевым выводом является четко выраженный пространственный градиент: качество воды последовательно ухудшается от III класса («умеренно загрязненная») в верхнем фоновом створе до стабильно IV класса («загрязненная») в створе, расположенном ниже города, с эпизодическим достижением V класса («грязная») в отдельные месяцы. Особую озабоченность вызывает стабильно высокая загрязненность акватории ниже городской черты, где среднегодовые значения ИЗВ устойчиво превышают значение 3,3.

Анализ структуры загрязнения позволил выявить ведущие приоритетные вещества, определяющие высокий уровень ИЗВ. К ним относятся медь (постоянный лимитирующий показатель, указывающий на промышленный источник), нефтепродукты (хроническое загрязнение, усиливающееся в рекреационный сезон), фосфаты (постоянный источник эвтрофикации) и взвешенные вещества (индикатор эрозионных процессов и смыва). Выявлена устойчивая сезонная цикличность с закономерным ухудшением качества воды до IV–V классов в летне-осенний период (июнь–октябрь) на фоне максимальной антропогенной нагрузки, повышенной температуры воды и снижения водообмена. Отсутствие положительной динамики среднегодовых значений ИЗВ (2,33–2,36) за три года свидетельствует о недостаточной эффективности действующих водоохранных мероприятий.

Проведенная оценка является основой для разработки адресных и экономически обоснованных природоохранных мер. В качестве первоочередных мероприятий, направленных на улучшение состояния водохранилища, на основании выявленной структуры и динамики загрязнения рекомендуется:

- приоритетная модернизация и повышение эффективности работы очистных сооружений, являющихся основным точечным источником загрязнения, с внедрением технологий глубокой очистки от соединений меди, фосфора и нефтепродуктов;

- реализация комплекса мер по сокращению загрязнения, включая: обустройство систем сбора и очистки поверхностного стока с городских территорий и автодорог; берегоукрепительные работы для снижения эрозии и поступления взвешенных веществ; регулирование рекреационной нагрузки в пиковые периоды;

- развитие системы экологического мониторинга с увеличением частоты отбора проб в критические сезонные периоды и внедрением автоматизированных станций контроля в зонах наибольшего загрязнения для оперативного реагирования.

Полученные результаты представляют собой научную базу для принятия управленческих решений органами власти и природоохранными службами, позволяя сконцентрировать ресурсы на решении наиболее острых проблем и обеспечить переход к устойчивому управлению водными ресурсами города.

Список литературы

- Анциферова Г.А. 2015. Диатомовые водоросли в биоиндикации экологически неблагополучных водоемов на примере Масловского затона Воронежского водохранилища. Вопросы современной альгологии, 3(10): 6–8.
- Анциферова Г.А., Беспалова Е.В. 2016. Состояние водной среды Воронежского водохранилища в связи с экологической ситуацией в Масловском затоне. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2: 91–100.
- Баскакова А.Г., Козлов А.Т., Мазуров Г.И. 2023. Применение комплексных подходов к освоению водных ресурсов и водопользованию на территории Воронежской области. Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки, 17(3): 24–32.
- Баскакова А.Г., Куролап С.А. 2022. Оценка воздействия на водные ресурсы реки Дон: здоровье и безопасность, подходы и направления на будущее. В кн.: Гигиенические, эпидемиологические и экологические аспекты профилактики заболеваемости на региональном уровне. Межвузовская научно-практическая конференция, посвященная 100-летию основания санитарно-эпидемиологической службы Российской Федерации, Воронеж, 25 марта 2022. Воронеж, Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н. Бурденко: 156–158.
- Баскакова А.Г., Механтьев И.И., Куролап С.А. 2020. Оценка экологического состояния речных водоемов Воронежской области по результатам многолетнего гидрохимического мониторинга. В кн.: Региональная геоэкологическая диагностика состояния хозяйственно-питьевого и рекреационного водопользования. Воронеж, Цифровая полиграфия: 53–61.
- Дмитриева В.А., Бучик С.В. 2023. Гидроэкологические трансформации и экологический сток в бассейне Верхнего Дона. Воронеж, Цифровая полиграфия, 150 с.
- Дмитриева В.А., Жигулина Е.В. 2020. Динамика водности малых водотоков Верхнедонского бассейна и ее роль в структурно-динамической организации ландшафтов. Региональные геосистемы, 44(4): 404–414. <https://doi.org/10.18413/2712-7443-2020-44-4-404-414>
- Дмитриева В.А., Сушков А.И., Закусилов В.П. 2022. Климатическая обусловленность современных гидроэкологических процессов в речных потоках бассейна Верхнего Дона. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2: 118–127. <https://doi.org/10.17308/geo.2022.2/9318>
- Елисеев А.А., Силкин К.Ю. 2025. Экологическое состояние Воронежского водохранилища (обзор научных публикаций). Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, 1: 118–130. <https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-118-130>
- Залата А.Е., Силкин К.Ю. 2015. Дистанционный мониторинг преобразования Воронежского водо-

- хранилища под действием комплекса природно-антропогенных факторов. В кн.: Материалы Научной сессии Воронежского государственного университета. Секция экологической геологии. Воронеж, Воронежский государственный университет: 17–22.
- Иванова Е.Ю. 2020. Аккумуляция генотоксических соединений некоторыми компонентами водных и прибрежных экосистем Воронежского водохранилища. Региональные геосистемы, 44(1): 113–120. <https://doi.org/10.18413/2712-7443-2020-44-1-113-120>
- Калашников Ю.С., Механтьев И.И., Степкин Ю.И. 2020. Оценка санитарно-гигиенической и эпидемиологической безопасности мест рекреационного водопользования населения на реке Дон. В кн.: Фундаментальные и прикладные аспекты анализа риска здоровью населения. Материалы всероссийской научно-практической интернет-конференции молодых ученых и специалистов Роспотребнадзора с международным участием, Пермь, 05–09 октября 2020. Пермь, Пермский национальный исследовательский политехнический университет: 49–55.
- Механтьев И.И., Клепиков О.В., Молоканова Л.В., Баскакова А.Г. 2020. Оценка качества воды водных объектов бассейна Верхнего Дона в местах рекреационного водопользования населения Воронежской области. В кн.: Региональная геоэкологическая диагностика состояния хозяйственно-питьевого и рекреационного водопользования. Воронеж, Цифровая полиграфия: 46–52.
- Мишон В.М. 2010. Прогноз заиления и занесения Воронежского водохранилища продуктами разрушения берегов, фитопланктона и высшей водной растительности. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 1: 92–97.
- Попова А.Ю., Кузьмин С.В., Механтьев И.И. 2021. Оценка эффективности реализации системного подхода к обеспечению гигиенической безопасности питьевого и рекреационного водопользования населения на примере Воронежской области. Здоровье населения и среда обитания, 29(8): 7–14. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2021-29-8-7-14>
- Прожорина Т.И., Куролап С.А., Боева А.С. 2021. Исследование влияния сбросов очистных сооружений масложирового комбината на качество воды реки Сарма – притока Дона. Естественные и технические науки, 4(155): 196–201.
- Сейдалиев Г.С., Косинова И.И., Соколова Т.В., Силкин К.Ю. 2017. Экологический менеджмент территории Воронежского водохранилища. Воронеж, Истоки, 186 с.
- Силкин К.Ю. 2012. Методика оценки экологического состояния Воронежского водохранилища по материалам многозонального дистанционного зондирования. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология, 1: 220–223.
- Чувачкин А.Л., Яблонских Л.А., Девятова Т.А. 2018. Качество поверхностных вод Воронежского водохранилища и его влияние на здоровье населения г. Воронежа. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация, 2: 270–277.
- Chowdhury S., Mazumder M.A.J., Al-Attas O., Husain T. 2016. Heavy Metals in Drinking Water: Occurrences, Implications, and Future Needs in Developing Countries. Science of the Total Environment, 569–570: 476–488. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.166>
- Daud M.K., Nafees M., Ali S., Rizwan M., Bajwa R.A., ... Zhu S.J. 2017. Drinking Water Quality Status and Contamination in Pakistan. BioMed research international, 2017(1): 7908183.
- Fisher M.B., Guo A.Z., Tracy J.W., Prasad S.K., Cronk R.D., ... Bartram J.K. 2021. Occurrence of Lead and Other Toxic Metals Derived from Drinking-Water Systems in Three West African Countries. Environmental Health Perspectives, 129(4): 47012.
- Gall A.M., Mariñas B.J., Lu Y., Shisler J.L. 2015. Waterborne Viruses: A Barrier to Safe Drinking Water. PLoS Pathogens, 11(6), e1004867. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1004867>
- Heibati M., Stedmon C.A., Stenroth K., Rauch S., Toljander J., ... Murphy K.R. 2017. Assessment of Drinking Water Quality at the Tap Using Fluorescence Spectroscopy. Water Research, 125: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.08.020>

References

- Antsiferova G.A. 2015. Diatoms as Bioindicators of Polluted Waters: a Case Maslovskiy Backwaters of the Voronezh Reservoir. Issues of modern algology, 3(10): 6–8 (in Russian).
- Antsiferova G.A., Bupalova E.V. 2016. Sostoyanie vodnoy sredy Voronezhskogo vodokhranilishcha v svyazi s ekologicheskoy situatsiey v Maslovskom zatone [The State of the Aquatic Environment of the Voronezh Reservoir in Connection with the Ecological Situation in the Maslovsky Backwater].

- Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya, 2: 91–100.
- Baskakova A.G., Kozlov A.T., Mazurov G.I. 2023. Primenenie kompleksnykh podkhodov k osvoeniyu vodnykh resursov i vodopol'zovaniyu na territorii Voronezhskoy oblasti [Application of Integrated Approaches to the Development of Water Resources and Water Management in the Voronezh region]. Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki, 17(3): 24–32.
- Baskakova A.G., Kurolap S.A. 2022. Otsenka vozdeystviya na vodnyye resursy reki Don: zdorovye i bezopasnost, podkhody i napravleniya na budushcheye [Assessment of the Impact on the Water Resources of the Don River: Health and Safety, Approaches and Future Directions]. In: Gigiyenicheskiye, epidemiologicheskiye i ekologicheskiye aspekty profilaktiki zabolevayemosti na regionalnom urovne [Hygienic, Epidemiological, and Environmental Aspects of Disease Prevention at the Regional Level]. Interuniversity scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of the founding of the Sanitary and Epidemiological Service of the Russian Federation, Voronezh, 25 March 2022. Voronezh, Publ. Voronezhskiy gosudarstvennyy meditsinskiy universitet imeni N.N. Burdenko: 156–158.
- Baskakova A.G., Mekhant'ev I.I., Kurolap S.A. 2020. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya rechnykh vodoemov Voronezhskoy oblasti po rezul'tatam mnogoletnego gidrokhimicheskogo monitoringa [Assessment of the Ecological State of River Reservoirs in the Voronezh Region Based on the Results of Long-Term Hydrochemical Monitoring]. In: Regionalnaya geoekologicheskaya diagnostika sostoyaniya khozyaystvenno-pityevogo i rekreatsionnogo vodopol'zovaniya: sbornik nauchnykh statey [Regional Geoecological Diagnostics of the State of Domestic, Drinking and Recreational Water Use: a Collection of Scientific Articles]. Voronezh, Publ. Tsifrovaya poligrafiya: 53–61.
- Dmitrieva V.A., Buchik S.V. 2023. Gidroekologicheskie transformatsii i ekologicheskiy stok v basseynе Verkhnego Dona [Hydroecological Transformations and Environmental Flow in the Upper Don Basin]. Voronezh, Publ. Tsifrovaya poligrafiya: 150 p.
- Dmitrieva V.A., Zhigulina E.V. 2020. Water Dynamics of Small Water Currents of the Upper Don Basin and Its Role in the Structural-Dynamic Organization of Landscapes. Regional Geosystems, 44(4): 404–414 (in Russian). <https://doi.org/10.18413/2712-7443-2020-44-4-404-414>
- Dmitrieva V.A., Sushkov A.I., Zakusilov V.P. 2022. Climatic Conditionality of Modern Hydroecological Processes in the River Flows of the Upper Don Basin. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya, 2: 118–127 (in Russian). <https://doi.org/10.17308/geo.2022.2/9318>
- Eliseev A.A., Silkin K.Yu. 2025. Ecological State of the Voronezh Reservoir (Review of Scientific Publications). Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management, 1: 118–130 (in Russian). <https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-118-130>
- Zalata A.E., Silkin K.Yu. 2015. Distantsonnyy monitoring preobrazovaniya Voronezhskogo vodokhranilishcha pod deystviem kompleksa prirodno-antropogennykh faktorov [Remote Monitoring of the Transformation of the Voronezh Reservoir Under the Influence of a Complex of Natural and Anthropogenic Factors]. In: Materialy Nauchnoy sessii Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Sektsiya ekologicheskoy geologii [Proceedings of the Scientific Session of Voronezh State University. Section of Environmental Geology]. Voronezh, Publ. Voronezhskiy gosudarstvennyy universitet: 17–22.
- Ivanova E.Y. 2020. The Accumulation of Genotoxic Compounds Some Components of the Aquatic and Coastal Ecosystems of the Voronezh Reservoir. Regional Geosystems, 44(1): 113–120 (in Russian). <https://doi.org/10.18413/2712-7443-2020-44-1-113-120>
- Kalashnikov Yu.S., Mekhant'ev I.I., Styopkin Yu.I. 2020. Otsenka sanitarno-gigiyenicheskoy i epidemiologicheskoy bezopasnosti mest rekreatsionnogo vodopol'zovaniya naseleniya na reke Don [Assessment of Sanitary-Hygienic and Epidemiological Safety of Recreational Water Use Areas on the Don River]. In: Fundamentalnye i prikladnye aspekty analiza riska zdorov'yu naseleniya [Fundamental and Applied Aspects of Public Health Risk Analysis]. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Online Conference of Young Scientists and Specialists of Rospotrebnadzor with International Participation, Perm, 5–9 October 2020. Perm, Publ. Permskiy natsionalnyy issledovatel'skiy politekhnicheskii universitet: 49–55.

- Mekhantsev I.I., Klepikov O.V., Molokanova L.V., Baskakova A.G. 2020. Otsenka kachestva vody vodnykh ob'ektov basseyna Verkhnego Dona v mestakh rekreatsionnogo vodopolzovaniya naseleniya Voronezhskoy oblasti [Assessment of Water Quality in Water Bodies of the Upper Don Basin in Areas of Recreational Water Use of the Voronezh Region Population]. In: Regionalnaya geoeologicheskaya diagnostika sostoyaniya khozyaystvenno-pityevogo i rekreatsionnogo vodopolzovaniya: sbornik nauchnykh statey [Regional Geoecological Diagnostics of the State of Domestic, Drinking and Recreational Water Use: a Collection of Scientific Articles]. Voronezh, Publ. Tsifrovaya poligrafiya: 46–52.
- Mishon V.M. 2010. The Forecast of Silting and Polluting of the Voronezh Reservoir by Disintegration Products of the Coast, Phytoplankton and Higher Aquatic Vegetation. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya, 1: 92–97 (in Russian).
- Popova A.Yu., Kuzmin S.V., Mekhantsev I.I. 2021. Assessment of Implementation Efficiency of the System Approach to Ensuring Safety of Public Drinking and Recreational Water Use on the Example of the Voronezh Region. Public Health and Life Environment, 29(8): 7–14 (in Russian).
- Prozhorina T.I., Kurolap S.A., Boeva A.S. 2021. Study of the Impact of Discharges from the Wastewater Treatment of the Oil and Fats Plant on Water Quality of the Sarma River – a Tributary of the Don. Estestvennye i tekhnicheskie nauki, 4(155): 196–201 (in Russian).
- Seydaliev G.S., Kosinova I.I., Sokolova T.V., Silkin K.Yu. 2017. Ekologicheskii menedzhment territorii Voronezhskogo vodokhranilishcha [Ecological Management of the Voronezh Reservoir Territory]. Voronezh, Publ. Istoki, 186 p.
- Silkin K.Yu. 2012. Ecological Condition of the Voronezh Water Basin: the Estimation Technique According to Remote Sensing Data. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya, 1: 220–223 (in Russian).
- Chuvyichkin A.L., Yablonskikh L.A., Devyatova T.A. 2018. Quality of Surface Water of the Voronezh Reservoir and Its Impact on the Health of the Population of the City of Voronezh. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya, 2: 270–277 (in Russian).
- Chowdhury S., Mazumder M.A.J., Al-Attas O., Husain T. 2016. Heavy Metals in Drinking Water: Occurrences, Implications, and Future Needs in Developing Countries. Science of the Total Environment, 569–570: 476–488. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.166>
- Daud M.K., Nafees M., Ali S., Rizwan M., Bajwa R.A., ... Zhu S.J. 2017. Drinking Water Quality Status and Contamination in Pakistan. BioMed research international, 2017(1): 7908183.
- Fisher M.B., Guo A.Z., Tracy J.W., Prasad S.K., Cronk R.D., ... Bartram J.K. 2021. Occurrence of Lead and Other Toxic Metals Derived from Drinking-Water Systems in Three West African Countries. Environmental Health Perspectives, 129(4): 47012.
- Gall A.M., Mariñas B.J., Lu Y., Shisler J.L. 2015. Waterborne Viruses: A Barrier to Safe Drinking Water. PLoS Pathogens, 11(6), e1004867. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1004867>
- Heibati M., Stedmon C.A., Stenroth K., Rauch S., Toljander J., ... Murphy K.R. 2017. Assessment of Drinking Water Quality at the Tap Using Fluorescence Spectroscopy. Water Research, 125: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.08.020>

Поступила в редакцию 17.03.2026;
поступила после рецензирования 21.04.2026;
принята к публикации 12.05.2026

Received March 17, 2026;
Revised April 21, 2026;
Accepted May 12, 2026

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Прождорина Татьяна Ивановна, кандидат химических наук, доцент кафедры геоэкологии и мониторинга окружающей среды, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatiana I. Prozhorina, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor at the Department of Geoecology and Environmental Monitoring, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Клепиков Олег Владимирович, доктор биологических наук, профессор кафедры геоэкологии и мониторинга окружающей среды, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

Oleg V. Klepikov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of Geoecology and Environmental Monitoring, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Куrolап Семен Александрович, доктор географических наук, профессор, декан факультета географии, геоэкологии и туризма, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия; старший научный сотрудник Института наук о Земле, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Semen A. Kurolap, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Geography, Geoecology and Tourism, Voronezh State University, Voronezh, Russia; Senior Research Fellow of the Institute of Earth Sciences, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Суханов Павел Алексеевич, аспирант кафедры геоэкологии и мониторинга окружающей среды, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

Pavel A. Sukhanov, Postgraduate Student of the Department of Geoecology and Environmental Monitoring, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Боева Анастасия Сергеевна, кандидат географических наук, старший преподаватель кафедры геоэкологии и мониторинга окружающей среды, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

Anastasia S. Boeva, Candidate of Geographical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Geoecology and Environmental Monitoring, Voronezh State University, Voronezh, Russia



УДК 551.4.042
DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-3-538-554
EDN FJMKEO

Оценка эрозионного потенциала осадков для азиатской части России

Полякова А.Р., Мухарамова С.С., Ермолаев О.П., Савельев А.А.

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Россия, 420008, Казань, ул. Кремлёвская, 18

zakieva.alika@mail.ru, smukhara@gmail.com, oyermol57@mail.ru, anatoly.saveliev.aka.saa@gmail.com

Аннотация. Эрозионный потенциал осадков (*R*-фактор) является одним из ключевых параметров в эрозионных моделях *USLE/RUSLE*, определяя интенсивность дождевого (ливневого) смыва почв. Его количественная оценка затруднена по причине отсутствия массового количественного материала по интенсивности осадков на метеостанциях, особенно это характерно для территории азиатской части России на фоне происходящих климатических изменений. Исследования направлены на разработку методики расчета *R*-фактора для азиатского макрорегиона России на основе данных срочных наблюдений за осадками. В основе методологии лежит комбинация расчетов эрозионной активности дождевых событий (*Rs*) по данным автоматических метеостанций с 10-минутным разрешением и применения обобщенно-аддитивных моделей (*GAM*) для прогнозирования *Rs* на метеостанциях Росгидромета. Разработанная *GAM*-модель объясняет 94,6 % изменчивости логарифма *Rs* и позволяет восстановить временные ряды *R*-фактора с 1966 по 2021 гг. для 328 метеостанций этого макрорегиона страны. Установлено, что среднемноголетние значения *R*-фактора за период 1966–1985 гг. хорошо согласуются с ранее полученными референсными данными Г.А. Ларионова. Анализ временной динамики на 85 % метеостанций не выявил статистически значимых трендов *R*-фактора за выбранный 56-летний период по всему макрорегиону, а наблюдаемые изменения не превышают 1 % от средних значений. Разработанная методика позволяет получать современные помесечные и годовые оценки *R*-фактора на метеостанциях для всех лет наблюдений, а также выполнять среднемноголетние обобщения за заданный период.

Ключевые слова: метеостанции, плювиограммы, эрозионная активность дождей, временная динамика, *USLE/RUSLE*, *GAM*-модель, эрозия почв, ливневой смыв

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания КФУ (проект № FZSM-2026-0017).

Для цитирования: Полякова А.Р., Мухарамова С.С., Ермолаев О.П., Савельев А.А. 2026. Оценка эрозионного потенциала осадков для азиатской части России. Региональные геосистемы, 50(3): 538–554. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-538-554 EDN: FJMKEO

Estimation of the R-Factor for the Asian Part of Russia

Alika R. Polyakova, Svetlana S. Mukharamova, Oleg P. Yermolaev, Anatoly A. Saveliev

Kazan (Volga Region) Federal University

18 Kremlyovskaya St., Kazan 420008, Russia

zakieva.alika@mail.ru, smukhara@gmail.com, oyermol57@mail.ru, anatoly.saveliev.aka.saa@gmail.com

Abstract. Rainfall erosivity (*R*-factor) is one of the key parameters in the *USLE/RUSLE* erosion models, determining the intensity of rainfall (storm) soil erosion. Its quantitative assessment is hampered by the lack of extensive quantitative data on rainfall intensity at weather stations, which is particularly

© Полякова А.Р., Мухарамова С.С., Ермолаев О.П., Савельев А.А., 2026

characteristic of the Asian part of Russia against the background of ongoing climate change. The research aims to develop a methodology for calculating the *R*-factor for the Asian macro-region of Russia using sub-daily precipitation observation data. The methodology combines the calculation of rain event erosivity (*Rs*) from automatic weather stations with 10-minute resolution and the application of Generalized Additive Models (*GAM*) to predict *Rs* at Roshydromet weather stations. The developed *GAM* model explains 94.6 % of the log-*Rs* variability and allows reconstructing *R*-factor time series for 328 weather stations in this macro-region from 1966 to 2021. It was found that the long-term average *R*-factor values for the period 1966–1985 are in good agreement with the reference data previously obtained by G.A. Larionov. Trend analysis for 85 % of the stations showed no statistically significant trends in the *R*-factor over the selected 56-year period across the entire macro-region, and the observed changes do not exceed 1 % of the mean values. The developed methodology makes it possible to obtain current monthly and annual *R*-factor estimates at weather stations for all years of observations, as well as to perform long-term averaging for any given period.

Keywords: weather stations, pluviograms, rainfall erosivity, temporal dynamics, *USLE/RUSLE*, *GAM* model, soil erosion, rainstorm erosion

Acknowledgements: The study was financially supported by the state assignment of Kazan Federal University (project No. FZSM-2026-0017)

For citation: Polyakova A.R., Mukharamova S.S., Yermolaev O.P., Saveliev A.A. 2026. Estimation of the *R*-Factor for the Asian Part of Russia. *Regional Geosystems*, 50(3): 538–554 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-538-554 EDN: FJMKEO

Введение

Эрозия почв в условиях гумидного климата – один ведущих экзогеодинамических процессов, ведущих к деградации почв и снижению почвенного плодородия. На этот процесс приходится 84 % глобальной деградации земель [Реппock, 2019]. Нарушение верхнего плодородного слоя почв является одной из глобальных мировых проблем, главным образом влияющей на продовольственную безопасность населения Земли. По разным оценкам, эрозия почв затрагивает около $2,9 \times 10^6$ км² суши планеты [Borrelli et al., 2017; Vousdoukas et al., 2020; Wen et al., 2023], снижая урожайность сельскохозяйственных культур на $7,5 \times 10^4$ млн т. Почва хоть и считается возобновляемым ресурсом, но «восстановить естественную, первозданную почву невозможно, так как она сформировалась в условиях уже неповторимых» и «почва – это особый природный ресурс: он и невозобновляемый, и в то же время при правильном использовании – неисчерпаемый» [Заславский, 1979].

Локальные оценки интенсивности почвенной эрозии проводят на стоковых станциях, а также с использованием разнообразных методов полевых экспериментов (шпильки, замер объема струйчатых размывов, микропрофилирование, короткодистанционная стереофотметрическая съемка, радиоизотопов, коррелятных отложений, лазерного сканирования и пр.) [Егоров, 2009; Yermolaev et al., 2018]. В начале прошлого столетия в США негативными последствиями от сдачи земель фермерам в аренду стали катастрофические эрозионные потери почвы и ее плодородия. Эта природная катастрофа в определенной степени способствовала тому, что в середине прошлого века было разработано универсальное уравнение эрозии почв (*USLE – Universal Soil Loss Equation*), ставшее удобным рабочим инструментом для специалистов по охране почв, позволяющее провести оценку интенсивности почвенной эрозии от дождевых осадков. Уравнение впервые было опубликовано в 1965 г. [Wischmeier, Smith, 1965]. «Универсальность» модели *USLE* отличает ее от предшествующих ей региональных моделей. Со временем модель *USLE* модифицировалась, были внесены дополнительные ограничения и обновления в расчеты факторов, в результате чего разработаны ее усовершенствованные версии – модели

RUSLE [Renard, 1997], *RUSLE2* [Revised..., 2013], *MUSLE* [Williams, 1975], *USPED* [Mitasova et al., 1996], *SEDEM* [Van Rompaey et al., 2001]. Наиболее полный обзор количественных моделей эрозии почв представлен в ряде отечественных работ [Литвин, 2002; Лисецкий и др., 2012; Эрозионно-русовые системы, 2017]. Что касается непосредственно территории азиатской части России (АЧР), то проблемы эрозии почв Сибири и Дальнего Востока изучаются в нашей стране в таких научных учреждениях, как Институт почвоведения и агрохимии СО РАН [Танасиенко и др., 2021], МГУ им. М.В. Ломоносова [Литвин и др., 2021], Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН [Баженова и др., 2023] и другими. Так Л.Ф. Литвиным [2021] в 2021 году проанализирована земледельческая эрозия почв по субъектам АЧР, а в статье А.А. Танасиенко с соавторами [2021] описано исследование влияния режима осадков на эрозионные процессы в Кузнецкой котловине, Приобье и Салаире. В одной из последних фундаментальных работ, посвященной мировой деградации почв [Li et al., 2022], две главы по эрозии почв на юге Сибири написаны отечественными учеными [Bazhenova et al., 2022a; 2022b].

В спектре параметров модели *USLE/RUSLE* особого внимания заслуживает *R*-фактор (или эрозионный потенциал осадков). Он выражает способность дождей вызывать эрозию почвы через совокупный потенциальный эффект от удара капель дождя и турбулентности стока при транспортировке отдельных частиц. Именно дожди высокой интенсивности формируют склоновый поверхностный сток, являющийся движущей силой эрозии, и оказывают прямое воздействие на отрыв частиц почвы [Panagos et al., 2015]. Согласно модели *USLE/RUSLE* *R*-фактор определяется как сумма эрозионной активности отдельных дождей (R_S), выпавших за заданный период (месяц, год). Эрозионная активность отдельного дождя, в свою очередь, определяется как произведение кинетической энергии дождя и его максимальной 30-минутной интенсивности ($R_S = E \times I_{30}$). Л.Ф. Литвин [2002] в своей работе обосновывает принципиальную возможность использования *R*-фактора в эрозионных моделях в условиях России, что подтверждается сравнением распределения величин $E \times I_{30}$ отдельных ливней для ряда метеостанций США и России. В более ранних работах М.Н. Заславского [1979] и Г.А. Ларионова [1993] также подтверждается возможность применения показателя $E \times I_{30}$ для расчета *R*-фактора как на территории России, так и в пределах бывшего СССР.

Для корректного расчета эрозионной активности осадков в конкретной локации (как правило на метеостанции) требуются данные наблюдений за дождевыми осадками с высоким временным разрешением и на протяжении теплого периода года в течение нескольких лет. Это либо данные плувиографа (гитографа) – самопишущего прибора для непрерывной регистрации количества жидких атмосферных осадков, их интенсивности и времени выпадения, либо данные дождемеров – приборов, регистрирующих осадки через короткие промежутки времени (1–30 мин). Лишь несколько исследований в национальном/региональном масштабе в Европе определяли *R*-фактор непосредственно по данным с высоким временным разрешением, в том числе исследования, проведенные в Словении [Petan et al., 2010], Швейцарии [Meusburger et al., 2012], на водосборе Эбро в Испании [Angulo-Martínez, Beguería, 2009], Чешской Республике [Janeček et al., 2013], Греции [Panagos et al., 2016], Италии [Borrelli et al., 2016], одной из федеральных земель Германии – Северном Рейне-Вестфалии [Fiener et al., 2013]. Для территории бывшего СССР расчеты среднесуточного *R*-фактора по данным с высоким временным разрешением были выполнены на 660 метеостанциях по 20-летним рядам плувиографических наблюдений 1960–1980-х годов [Ларионов, 1993]. По этим результатам методом изолиний построена карта ЭПО (*R*-фактора) на территорию бывшего СССР в масштабе 1 : 8 000 000, опубликованная в работах [Заславский, 1979; Ларионов, 1993]. Наиболее значительным современным проектом с использованием данных с высоким временным разрешением (от 5 до 60 минут) является исследование Р. Panagos с соавторами [2023], результатом которого стала глобальная база данных *GloREDa* v.1.2, содержащая оценки *R*-фактора на 3939 станциях мира, а также

глобальная карта R -фактора с пространственным разрешением 1 км, полученная интерполяцией методом регрессии (с ковариатами) на основе гауссовских процессов. При этом необходимо отметить, что данные о R -факторе на 217 российских метеостанциях, присутствующие в *GloREDa* v.1.2, также основаны на наблюдениях полувековой давности – 1960–1980-х годов (т.е. не являются современными).

Количество регистрирующих датчиков дождя с высоким временным разрешением невелико, такие полевые измерения дороги, они как правило отсутствуют в открытом доступе, их сложно получить в большом масштабе, а в пространстве они распределены крайне неравномерно, при этом часто имеют короткие периоды наблюдения. Поэтому для исследований регионального и глобального уровня используют методы приближенной оценки R -фактора по более доступным данным об осадках с грубым временным разрешением – суточным, месячным или годовым [Renard, Freimund, 1994; Diodato, Bellocchi, 2007; Angulo-Martínez, Beguería, 2009; Bonilla, Vidal, 2011; Panagos et al., 2012; Panagos et al., 2015; Xie et al., 2016]. Здесь как правило, связь между R и количеством осадков описывается степенной зависимостью [Richardson et al., 1983], а при наличии суточных или месячных данных о дождевых осадках в модель иногда включают синусоидальную функцию, отражающую годовой цикл параметров степенного закона [Yu, 1998; Yu et al., 2001; Capolongo et al., 2008; Angulo-Martínez, Beguería, 2009; Xie et al., 2016]. Такие аппроксимирующие уравнения обычно разрабатываются для конкретных регионов и плохо применимы в других условиях. Кроме этого, они не могут отразить влияние на R экстремальных событий – наиболее эрозионно-опасных ливней высокой интенсивности, т.е. доли осадков высокой интенсивности при одной и той же сумме осадков.

В данном исследовании излагается разработанная коллективом авторов методика, позволяющая получать современные помесечные и годовые оценки R -фактора на метеостанциях для всех лет наблюдений, а также выполнять среднемноголетние обобщения за заданный период. Моделирование пространственного распределения R -фактора и пространственный анализ полученных результатов будут рассмотрены в отдельной публикации. В частности, современная оценка R -фактора для территории Европейской части России за период 2015–2021 гг. выполнена коллективом авторов и опубликована на геопортале «Речные бассейны Европейской России» [Ермолаев и др., 2025a]. Актуальность получения современной оценки R -фактора для АЧР подтверждается происходящими с беспрецедентной скоростью за последние десятилетия климатическими изменениями [Masson-Delmotte et al., 2021; Переведенцев и др., 2024], приводящими в том числе и к изменению режима осадков, способных вызвать эрозионные процессы [Zolina, 2011; Chizhikova et al., 2022]. Предлагаемый нами подход развивает метод приближенной оценки R -фактора, который основан на создании эмпирической модели и использовании внутри-суточных данных об осадках. Такие данные могут предоставить больше информации об экстремальных осадках и быть лучшей альтернативой для оценки R по сравнению с годовыми, месячными и суточными данными. Решение этой задачи также позволяет определить современные темпы почвенной эрозии на пространствах АЧР.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является эрозионный потенциал дождевых осадков – R -фактор. Регион исследования – материковое пространство азиатской части России. Протяженность этого макрорегиона страны с запада на восток составляет порядка 6 тыс. км, а общая площадь около 12,8 млн км², включая Западно-Сибирский (2,46 млн км²), Восточно-Сибирский (4,16 млн км²) и Дальневосточный (6,17 млн км²) регионы. В силу своего географического положения и огромной площади для него характерно высокое ландшафтное разнообразие: от арктических тундр и пустынь на севере до типичных степей на юге. Рельеф также очень контрастный и характеризуется сочетанием обширных

равнинных территорий на севере и западе, высоких плато в центральной части и горных систем на юге Сибири и Дальнего Востока. Сельскохозяйственная освоенность региона слабая: пашнями занято только 25,4 млн га в Сибири и 2,3 млн га на юге Дальнего Востока.

Климат отличается большим разнообразием: от резко континентального на западе до муссонного на востоке. Режим увлажнения отличается высокой пространственной контрастностью и выраженной сезонностью. Годовые суммы осадков варьируют от 100–200 мм в арктических и субарктических районах до 600–800 мм в горах Южной Сибири и на юге Дальнего Востока, где в Приморье они могут достигать 800 мм [Бикбулатова, 2011]. На большей части региона до 70–95 % годовой суммы осадков выпадает в теплый период, причем в Западной Сибири максимум приходится на июль–август [Бикбулатова, 2011], а в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке осадки второй половины лета носят преимущественно ливневой характер [Bazhenova et al., 2022a]. Интенсивность ливней на Дальнем Востоке может достигать 150–250 мм/сутки [Бикбулатова, 2011]. Многолетняя динамика осадков также характеризуется пространственной неоднородностью. Для АЧР в целом за период 1975–2005 гг. отмечалась незначимая тенденция к снижению годовых сумм осадков (в среднем – 5 мм/10 лет), однако в теплый период в отдельных районах Средней Сибири наблюдался слабый рост [Логоинов, 2012]. В современный период (1991–2020 гг.) увеличение летних сумм осадков фиксируется в Западной Сибири и на побережье Охотского моря, тогда как на юге Восточной Сибири наблюдается их уменьшение [Алешина, Семенов, 2022].

Разработанный и примененный нами метод оценки R -фактора основан на использовании двух категорий данных о дождевых осадках: 1) набора данных с высоким временным разрешением, полученных на ограниченном числе автоматических метеостанций, не входящих в сеть Росгидромета; 2) данных на метеостанциях Росгидромета, где проводятся внутри-суточные (срочные) наблюдения за осадками. Метод реализуется в три этапа.

На первом этапе по доступным данным автоматических метеостанций с высоким временным разрешением [Ермолаев и др., 2025б] по методологии *USLE/RUSLE* рассчитывалась эрозионная активность (R_s) каждого из наблюдаемых дождей. Согласно *USLE/RUSLE*, дождевое событие определяется как осадки, разделенные более чем 6 часовым сухим интервалом – величины, принятой в *USLE* [Wischmeier, Smith, 1965; 1978] и *RUSLE2* [Revised Universal..., 2013] в качестве минимального меж-дождевого времени. Эрозионно-опасным считается ливень с общим количеством осадков не менее 12,7 мм или с максимальной 15-минутной интенсивностью, превышающей 25,4 мм/ч [Wischmeier, Smith, 1978]. В зависимости от региональных климатических и почвенных условий применяются различные пороговые значения как для суммарного слоя осадков, так и для их интенсивности [Renard, 1997; Yu, 1999; Литвин, 2002]. Дискуссионным остается и вопрос о целесообразности включения в анализ всех без исключения ливневых событий [Yin et al., 2017]. В настоящей работе при расчете эрозионного потенциала учитывались ливни со слоем осадков более 10 мм. Применимость данного порога для условий Северной Евразии была обоснована Л.Ф. Литвиным [2002]. Ввиду отсутствия региональных исследований, обосновывающих пороговые значения непосредственно для азиатской части России, использование этого апробированного подхода представляется методически оправданным.

Эрозионная активность отдельного ливневого (дождевого) события R_s (МДж мм ч⁻¹ га⁻¹) рассчитывалась по методологии *USLE/RUSLE* как:

$$R_s = E \times I_{30},$$

где I_{30} (мм ч⁻¹) – средняя интенсивность за 30 минут непрерывного дождя с наибольшим количеством осадков (максимальная 30-ти минутная интенсивность), E (МДж га⁻¹) – энергия дождя, которая определяется как интеграл по времени (D – продолжительность

дождя, час) от произведения удельной кинетической энергии дождя (e , МДж мм⁻¹ га⁻¹) на его мгновенную интенсивность (i , мм час⁻¹):

$$E = \int_0^D e \times i \, dt$$

и аппроксимируется как:

$$E \approx \sum_{k=1}^m e_k \times \Delta V_k$$

k – индекс для интервалов во время дождя, где интенсивность осадков считается постоянной, m – количество таких интервалов, ΔV_k (мм) – количество (слой) осадков в k -м интервале, e_k (МДж мм⁻¹ га⁻¹) – удельная энергия (энергия на единицу площади и на единицу слоя осадков) в k -м интервале, которую вычисляют как [Revised Universal..., 2013]:

$$e_k = 0,29(1 - 0,72 \exp(-0,082i_k))$$

i_k (мм ч⁻¹) – интенсивность осадков для k -го интервала дождя.

На втором этапе на основе полученной выборки значений эрозионной активности (R_s) наблюдаемых дождей моделировалась статистическая зависимость R_s от внешних факторов (характеристик дождя, места и времени его выпадения). С этой целью был применен метод обобщенно-аддитивных моделей (GAM) [Hastie, Tibshirani, 1986]. Данный метод позволяет описывать нелинейные зависимости между откликом и предикторами с помощью сплайнов. GAM-модель в нашем случае представляла собой сумму сглаживающих функций ($f_i(x_i)$) от потенциальных предикторов с логарифмической функцией связи:

$$\ln(R_s) = a_0 + f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_n(x_n) + \varepsilon,$$

где a – свободный член, $f(x)$ – непараметрическая гладкая функция (сплайн), ε – случайная ошибка. В конечном варианте степень нелинейности сплайнов выбиралась на основе (обобщенной) перекрестной проверки, чтобы обеспечить оптимальное качество прогноза.

На третьем этапе выполнялась искомая оценка R -фактора на метеостанциях, обеспеченных внутри-суточными данными об осадках. Для этого предварительно на каждой метеостанции за весь период наблюдений выделялись так называемые «модельные» дожди – непрерывные последовательности сроков наблюдений, в каждом из которых зафиксированы дождевые осадки. Для каждого эрозионно-опасного «модельного» дождя (со слоем осадков >10 мм) с помощью построенной GAM-модели рассчитывалась прогнозная оценка его эрозионной активности R_s на основе значений предикторов модели. Годовые значения R -фактора для каждой станции рассчитывались как сумма R_s всех эрозионных «модельных» дождей за соответствующий год для всех лет наблюдений.

Результаты и их обсуждение

В качестве набора данных об осадках с высоким временным разрешением в работе использованы данные, полученные (с шагом по времени 10 мин) на автоматических метеостанциях, не входящих в сеть Росгидромета (предоставлены производителем контрольно-измерительных устройств для метеомониторинга). На их основе выделены 3747 дождевых событий, наблюдаемых на АЧР в 64-х локациях в 2017–2022 гг. Каждый из этих дождей представлен аппроксимацией своей «плювиограммы» (с шагом 10 мин) (примеры на рис. 1), что позволило рассчитать характеристики этих дождей: максимальную 30-ти минутную интенсивность (I_{30}) и энергию дождя (E) и, в итоге, его эрозионную активность R_s по формулам USLE/RUSLE. Статистическое изучение полученной выборки R_s показало наилучшее соответствие эмпирических данных логнормальному распределению, что согласуется с выводами других авторов о применимости данного распределения для описания экстремальных осадков [Papalexiou et

al., 2013]. Логнормальное распределение способно адекватно описывать область больших значений, которые вносят определяющий вклад в годовой эрозионный потенциал осадков, несмотря на редкую повторяемость сильных ливней.

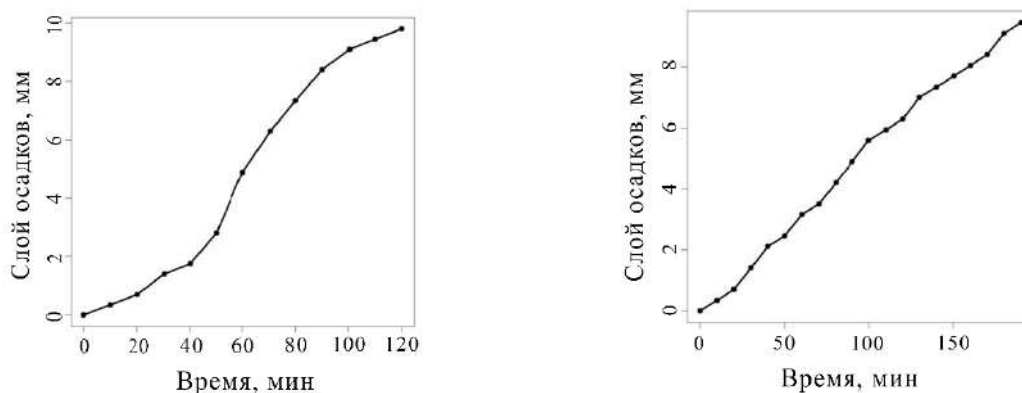


Рис. 1. Примеры «плювиограмм» двух дождевых событий
Fig. 1. Examples of «pluviograms» of two rainfall events

Кроме этого, для каждого из 3747 дождей рассчитана сумма выпавших осадков (*SumPrec*) для анализа этой характеристики как потенциального предиктора эрозионной активности дождя, который может быть использован впоследствии для прогнозной оценки *Rs* «модельных» дождей на метеостанциях с внутри-суточными данными об осадках.

Построенная на базе полученной выборки GAM-модель зависимости эрозионной активности отдельного дождя от внешних факторов для логнормального распределения с фиксированной дисперсией имеет следующий вид:

$$\ln(Rs) = a_0 + a_1 \times H + f_1(Lon, Lat) + f_2(DoY) + f_3(\log(SumPrec)) + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim Norm(0, \sigma_{err}^2),$$

где f_1, f_2, f_3 – непараметрические гладкие функции (сплайны), ε – случайная ошибка с нулевым средним и дисперсией $\sigma^2 = 0,230$. Как значимые предикторы в модель вошли сумма выпавших осадков за дождевое событие (*SumPrec*), характеристики времени и места выпадения дождя – порядковый номер дня в году (*DoY*), географические координаты (*Lon, Lat* – долгота и широта), высота в рельефе (*H*). На рис. 2 показаны графики непараметрических функций некоторых частных зависимостей, вошедших в модель.

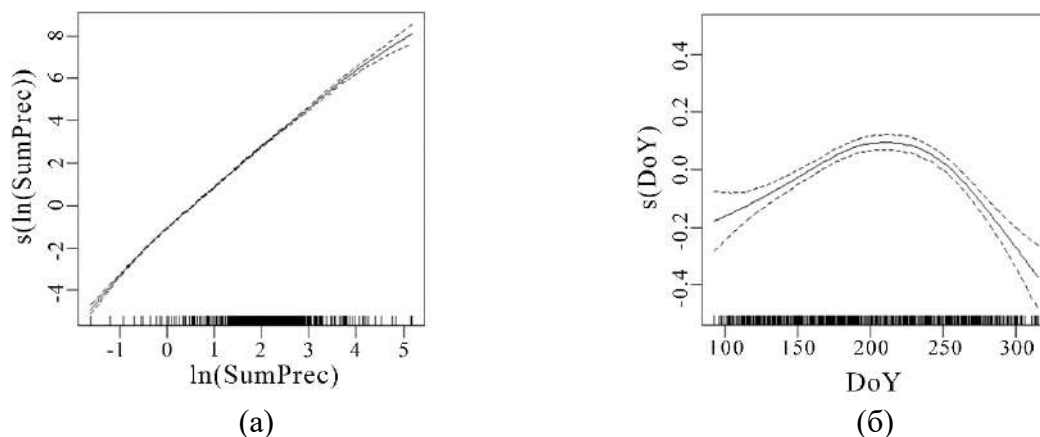


Рис. 2. Примеры частных зависимостей логарифма эрозионной активности дождя *Rs* от объясняющих переменных: (а) от логарифма слоя выпавших осадков ($\ln(SumPrec)$), (б) от номера дня в году (*DoY*). По горизонтали – значение предиктора, по вертикали – его вклад в модель
Fig. 2. Examples of partial dependence of the logarithm of rainfall erosivity (*Rs*) on explanatory variables: (a) on the logarithm of precipitation amount ($\ln(SumPrec)$), (б) on the day of the year (*DoY*). The horizontal axis shows the predictor value, the vertical axis shows its contribution to the model

Результирующая GAM-модель объясняет 94,6 % изменчивости данных (коэффициент детерминации). Точность прогноза, даваемого GAM-моделью логарифма R_s с 95 %-ой доверительной вероятностью, составляет примерно $\pm 0,94$. Для сравнения, размах выборочных значений 13,62. То есть, модель обеспечивает представление фактической изменчивости логарифма R_s с ошибкой прогноза порядка 7 % от разброса данных. В таблице приведены статистические показатели соответствия модельных результатов исходным данным, основанные на анализе остатков, а на рис. 3 – ряд графиков/диаграмм, иллюстрирующих качество модели.

Статистики остатков построенной GAM-модели логарифма эрозионной активности дождя (R_s)
Residual statistics of the fitted GAM model for the logarithm of rainfall erosivity (R_s)

Средняя ошибка, ME	Медиана ошибки, MD	Средняя абсолютная ошибка, MAE	Среднее квадрата ошибки, MSE	Стандартная ошибка оценки, SE
0	0,05	0,358	0,230	0,480

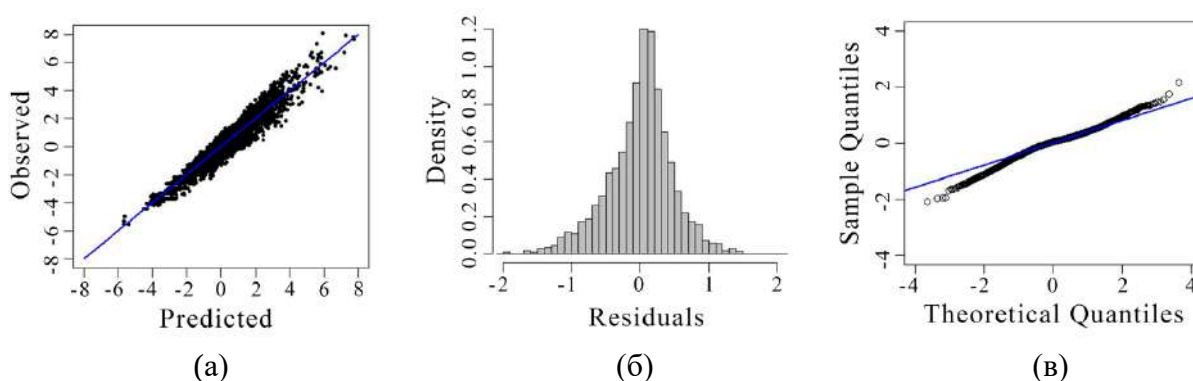


Рис. 3. Диаграммы, иллюстрирующие качество построенной модели логарифма эрозионной активности дождя R_s (метод GAM): (а) по горизонтали – модельные значения (*predicted*), по вертикали – наблюдаемые значения (*observed*) логарифма R_s ; (б) гистограмма частот значений остатков (*residuals*); (в) по горизонтали – теоретические квантили нормального распределения, по вертикали – выборочные квантили остатков
Fig. 3. Diagrams illustrating the quality of the fitted GAM model for the logarithm of rainfall erosivity (R_s): (a) horizontal axis – predicted values, vertical axis – observed values of log R_s ; (б) histogram of residual frequencies; (в) horizontal axis – theoretical quantiles of the normal distribution, vertical axis – sample quantiles of the residuals

Разработанная GAM-модель применена для оценки R -фактора на метеостанциях Росгидромета, обеспеченных внутри-суточными данными об осадках. В пределах АЧР (с буферной зоной 100 км) расположены 328 таких станций. Исходные данные для них загружены из открытого цифрового архива ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» [Архив всероссийского..., 2026] и представляют собой срочные наблюдения за количеством осадков (в мм) в интервалах между сроками, начиная с 1966 г. В 1966-1985 гг. измерения проводились 4 раза в сутки, с 1986 г. – 2 раза в сутки. В ходе предварительной обработки отфильтрованы данные с пропусками и сбойные данные. Всего за обеспеченные года наблюдений на этих 328 станциях было идентифицировано 380 725 «модельных» дождей (от 7 до 75 на станцию в год). Из них к категории эрозионно-опасных дождевых событий (с суммой осадков более 10 мм) отнесены 123 800 ливней (от 0 до 42 на станцию в год). С использованием построенной GAM-модели рассчитаны прогнозные оценки R_s «модельных» дождей в зависимости от значений предикторов: суммы осадков дождя, времени и места выпадения дождя. После чего суммированием R_s эрозионно-опасных «модельных» дождей получены помесечные и годовые оценки R -фактора на каждой метеостанции для всех лет наблюдений с 1966 г. по 2021 г.

Адекватность модельных результатов проверялась путем их сравнения с оценками R -фактора, полученными ранее другими исследователями (с учетом периода обобщения). В качестве «референсных» оценок рассматривались упомянутые выше среднемноголетние значения годового R -фактора, рассчитанные на метеостанциях бывшего СССР по рядам плювиографических наблюдений 1960–1980-х годов [Ларионов, 1993; Panagos, 2023]. На территории АЧР находятся 107 таких метеостанций, которые при этом обеспечены внутри-суточными данными об осадках, что позволило получить на них и наши оценки среднемноголетнего годового R -фактора (усредненного за 1966–1985 гг.). И наши, и «референсные» оценки сделаны для примерно одинаковых периодов обобщения. На рис. 4 приведены диаграммы, иллюстрирующие согласие наших модельных оценок и «референсных» данных. Можно видеть, что наша оценка показывает значения как ниже, так и выше «референсных», но в среднем согласие вполне приемлемое. Медиана и среднее значение отношения нашей оценки к «референсной» практически равны 1 (медиана = 0,99, среднее = 1,1), коэффициент корреляции 0,75.

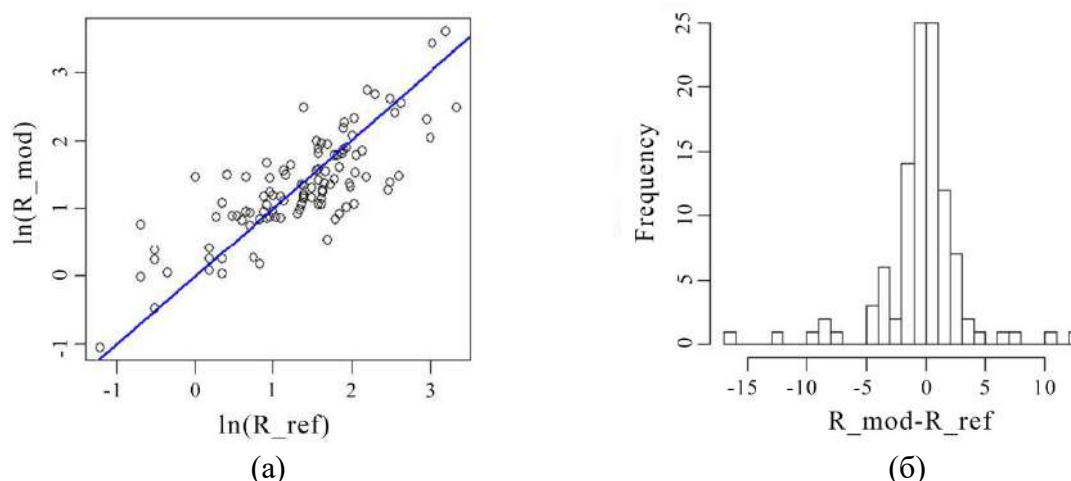


Рис. 4. Диаграммы, иллюстрирующие результаты сравнения на метеостанциях АЧР полученных модельных оценок среднемноголетнего (для периода 1960–1980-х годов) R -фактора с ранее полученными результатами, использованными при построении карты ЭПО [Ларионов, 1993]: (а) по горизонтали – «референсные» значения логарифма R , по вертикали – модельные значения логарифма R ; (б) гистограмма частот значений разностей оценок

Fig. 4. Diagrams illustrating the results of comparing the obtained model estimates of the long-term mean (for the period of the 1960s–1980s) R -factor at weather stations of the Asian territory of Russia with previously published results used for mapping rainfall erosivity [Larionov, 1993]: (a) horizontal axis – reference values of log R , vertical axis – model estimates of log R ; (b) histogram of the frequency distribution of the differences between the estimates

Полученные на метеостанциях АЧР оценки R -фактора за период с 1966 по 2021 гг. позволяют не только анализировать межгодовую динамику этого фактора, но и получать среднемноголетние обобщения за заданный период/периоды в этом интервале лет. Среднемноголетняя оценка снижает влияние межгодовой изменчивости и увеличивает надежность выводов. В частности, современная оценка R -фактора вычислена как среднемноголетняя за период 1996–2021 гг. Ее картографическая визуализация и гистограмма распределения частот значений приведены на рис. 5.

Значения годового R -фактора варьируются в интервале от 0 до 5814 (МДж×мм)/(га×час) в год, при этом 99 % квантиль составляет 2727, а 90 % значений находятся в интервале от 75 до 988, среднее значение 388, медиана 246 (МДж×мм)/(га×час) в год.

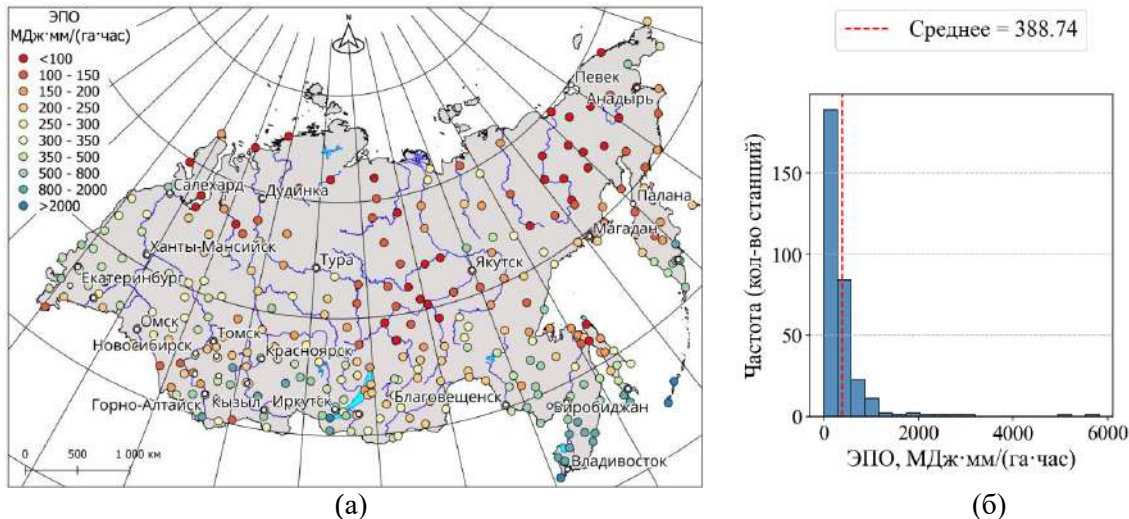


Рис. 5. (а) оценка ЭПО (среднегогодевного за 1996–2021 гг.) на 328 метеостанциях Росгидромета, обеспеченных срочными данными об осадках, на территории АЧР;
(б) гистограмма распределения частот значений ЭПО на станциях за период 1996–2021 гг.
Fig. 5. (a) R-factor estimates (long-term average for 1996–2021) at 328 Roshydromet weather stations with sub-daily precipitation data in the Asian territory of Russia; (b) histogram of rainfall erosivity (R-factor) frequency distribution at the stations for the period 1996–2021

Для исследования систематических временных изменений анализируемых характеристик осадков применено несколько непараметрических статистических критериев: критерий Манна-Кендалла, тест наклона Сена, используемые для проверки гипотезы о наличии направленных изменений (трендов). Достаточным порогом статистической значимости тестов был взят уровень $p\text{-value} = 0,05$. Тесты применялись к построенным временным рядам характеристик осадков на каждой метеостанции. На 85 % метеостанций статистически значимые тренды R -фактора в изучаемый временной интервал 1996–2021 гг. не выявлены, на 11 % станций показано статистически значимое увеличение годового R -фактора, на 3 % – статистически значимое уменьшение (рис. 6а). Для R -фактора изменения за 26 лет за счет тренда составляют около 2 %. График на рис. 6б иллюстрирует эти выводы.

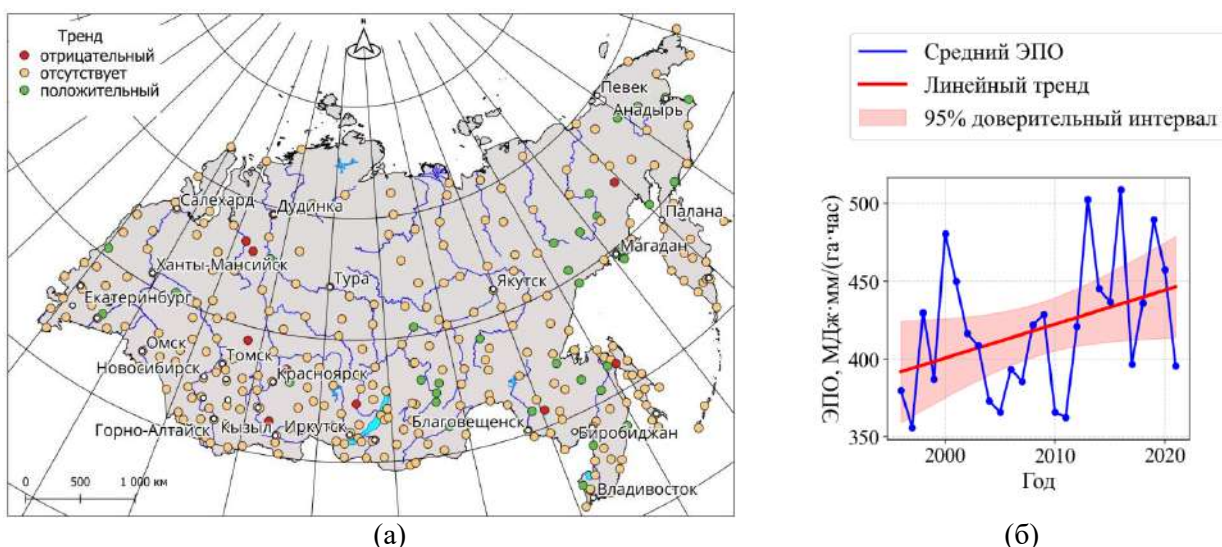


Рис. 6. (а) пространственное распределение метеостанций по знаку тренда годовой суммы дождевых осадков (1996–2021 гг.) (б) межгодовая динамика годового ЭПО на метеостанциях исследуемой территории
Fig. 6. (a) Spatial distribution of weather stations by trend sign of annual rainfall amount (1996–2021); (b) interannual dynamics of the annual R-factor at weather stations of the study area

Заключение

В ходе выполнения работы разработана и реализована методика количественной оценки эрозионного потенциала осадков (*R*-фактора) для азиатской части России, основанная на комбинации данных с высоким временным разрешением и обобщенно-аддитивных моделей (*GAM*). Использование 10-минутных рядов осадков позволило рассчитать эрозионную активность отдельных дождевых событий (*Rs*) по классической методологии *USLE/RUSLE*. Построенная *GAM*-модель объясняет 94,6 % изменчивости логарифма *Rs* и обеспечивает прогноз с ошибкой порядка 7 % от общего разброса данных, что подтверждается анализом остатков и сопоставлением с референсными оценками.

На основе модели восстановлены временные ряды *R*-фактора для 328 метеостанций Росгидромета за период 1966–2021 гг. показано, что среднемноголетние значения *R*-фактора за 1966–1985 гг. хорошо согласуются с данными Г.А. Ларионова (медиана отношения 0,99, коэффициент корреляции 0,75). Современная оценка *R*-фактора (среднемноголетняя за 1996–2021 гг.) варьирует от 0 до 5814 (МДж×мм)/(га×час) в год, при этом 90 % значений лежат в интервале 75–988, а среднее значение составляет 388.

Анализ временной динамики с использованием непараметрических критериев Манна-Кендалла и наклона Сена показал, что на 85 % метеостанций статистически значимые тренды *R*-фактора за 1996–2021 гг. отсутствуют. На 11 % станций выявлен значимый положительный тренд, на 3 % – отрицательный. Величина изменений за счет тренда не превышает 2 % от средних многолетних значений, что свидетельствует о стабильности эрозионного потенциала осадков на большей части азиатской территории России в последние десятилетия.

Предложенная методика позволяет прогнозировать эрозионную активность дождевых осадков на метеостанциях Росгидромета на основе доступных внутри-суточных (срочных) наблюдений за осадками и может быть использована для создания актуальных карт *R*-фактора, а также для оценки влияния климатических изменений на эрозионные процессы в регионах с ограниченной сетью высокоразрешающих наблюдений. Полученные оценки *R*-фактора являются основой для дальнейшего моделирования почвенной эрозии в пределах азиатской части России.

Список источников

- Архив всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных. Электронный ресурс. URL: <http://meteo.ru/data/> (дата обращения 08.05.2026).
- Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE2). 2013. Washington, USDA-Agricultural Research Service, 330 p.

Список литературы

- Алешина М.А., Семенов В.А. 2022. Изменения характеристик осадков на территории России в XX–XXI вв. по данным ансамбля моделей CMIP6. Фундаментальная и прикладная климатология, 8(4): 424–440. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-4-424-440>.
- Баженова О.И., Тюменцева Е.М., Черкашина А.А., Голубцов В.А., Тухта С.А. 2023. Почвенные ресурсы юга Сибири. География и природные ресурсы, 44(4): 37–45. <https://doi.org/10.15372/GIPR20230404>.
- Бикбулатова Г.Г. 2011. Исследование распределения атмосферного увлажнения на территории Сибири и Дальнего Востока. Омский научный вестник, 1(104): 232–235.
- Заславский М.Н. 1979. Эрозия почв. М., Мысль, 245 с.
- Егоров И.Е. 2009. Полевые методы изучения почвенной эрозии. Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле, 1: 157–170.
- Ермолаев О.П., Мухарамова С.С., Мальцев К.А., Полякова А.Р., Савельев А.А. 2025а. Факторы эрозии почв в макрорегионе Европейской части России: моделирование,

- геоинформационное картографирование и пространственный анализ. Почвоведение, 2: 281–300. <https://doi.org/10.31857/S0032180X25020097>.
- Ермолаев О.П., Мухарамова С.С., Полякова А.Р., Савельев А.А. 2025б. Факторы эрозии почв в бассейновых геосистемах азиатской части России. Известия Российской академии наук. Серия географическая, 89(6): 930–942. <https://doi.org/10.7868/S2658697525060059>.
- Ларионов Г.А. 1993. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М., Изд-во МГУ, 198 с.
- Лисецкий Ф.Н., Светличный А.А., Черный С.Г. 2012. Современные проблемы эрозиоведения. Белгород, Константа, 456 с.
- Литвин Л.Ф. 2002. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М., Академкнига, 255 с.
- Литвин Л.Ф., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Добровольская Н.Г., Горобец А.В. 2021. География динамики земледельческой эрозии почв Сибири и Дальнего Востока. Почвоведение, 1: 136–148. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2101007X>
- Логинов С.В. 2012. Пространственно-временная изменчивость климата азиатской территории России. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 23 с.
- Переведенцев Ю.П., Мирсаева Н.А., Павлова В.Н., Елисеев А.В., Шанталинский К.М., ... Тагиров М.Ш. 2024. Современные региональные климатические изменения и их последствия. М., РУ-САЙНС, 224 с.
- Танасиенко А.А., Чумбаев А.С., Якутина О.П., Алмендрос Г., Кленов Б.М. 2021. Ливневая эрозия черноземов Западной Сибири. Почвы и окружающая среда, 4(2): e145. <https://doi.org/10.31251/pos.v4i2.145>.
- Эрозионно-русловые системы. 2017. Под ред. Р.С. Чалова, А.Ю. Сидорчука, В.Н. Голосова. М., ИНФРА-М, 700 с.
- Angulo-Martínez M., Beguería S. 2009. Estimating Rainfall Erosivity from Daily Precipitation Records: A Comparison Among Methods Using Data from the Ebro Basin (NE Spain). Journal of Hydrology, 379(1): 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.051>.
- Bazhenova O.I., Tyumentseva E.M., Golubtsov V.A. 2022a. Soil Erosion on the Agricultural Lands of the Asian Part of Russia (Siberia): Processes, Intensity and Areal Distribution. In: Global Degradation of Soil and Water Resources. Ed. by Li R., Napier T., ElSwaify S., Sabir M., Rienzi E. Beijing, Springer: 566–593.
- Bazhenova O.I., Cherkashina A.A., Tyumentseva E.M., Golubtsov V.A., Sorokovikova L.M. 2022b. Ecological Consequences of Soil Degradation and Water Pollution in the Asian Part of Russia (Siberia). In: Global Degradation of Soil and Water Resources 2022. Ed. by Li R., Napier T., ElSwaify S., Sabir M., Rienzi E. Beijing, Springer: 594–616.
- Bonilla C.A., Vidal K.L. 2011. Rainfall Erosivity in Central Chile. Journal of Hydrology, 410(1–2): 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.022>.
- Borrelli P., Diodato N., Panagos P. 2016. Rainfall Erosivity in Italy: A National Scale Spatio-Temporal Assessment. International Journal of Digital Earth, 9(9): 835–850. <https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1148203>.
- Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., ... Panagos P. 2017. An Assessment of the Global Impact of 21st Century Land Use Change on Soil Erosion. Nature Communications, 8(1): 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>.
- Capolongo D., Diodato N., Mannaerts C.M., Piccarreta M., Strobl R.O. 2008. Analyzing Temporal Changes in Climate Erosivity Using a Simplified Rainfall Erosivity Model in Basilicata (Southern Italy). Journal of Hydrology, 356(1–2): 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.04.002>.
- Chizhikova N., Yermolaev O., Golosov V., Mukharamova S., Saveliev A. 2022. Changes in the Regime of Erosive Precipitation on the European Part of Russia for the Period 1966–2020. Geosciences (Switzerland), 12(7): 279. <https://doi.org/10.3390/geosciences12070279>.
- Diodato N., Bellocchi G. 2007. Estimating Monthly (R)USLE Climate Input in a Mediterranean Region Using Limited Data. Journal of Hydrology, 345(3–4): 224–236. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.08.008>.
- Fiener P., Neuhaus P., Botschek J. 2013. Long-Term Trends in Rainfall Erosivity: Analysis of High Resolution Precipitation Time Series (1937–2007) from Western Germany. Agricultural and Forest Meteorology, 171–172: 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.011>.

- Hastie T., Tibshirani R. 1986. Generalized Additive Models. *Statistical Science*, 1(3): 297–310.
- Janeček M., Květoň V., Kubátová E., Kobzová D., Vošmerová M., Chlupsová J. 2013. Values of Rainfall Erosivity Factor for the Czech Republic. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 61(2): 97–102. <https://doi.org/10.2478/johh-2013-0013>.
- Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., ... Zhou B. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Cambridge University Press, 2391 p.
- Meusburger K., Steel A., Panagos P., Montanarella L., Alewell C. 2012. Spatial and Temporal Variability of Rainfall Erosivity Factor for Switzerland. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16: 167–177. <https://doi.org/10.5194/hess-16-167-2012>.
- Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson L.R. 1996. Iverson Modelling Topographic Potential for Erosion and Deposition Using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 10(5): 629–641.
- Li R., Napier T., El-Swaify S., Sabir M., Rienzi E. 2022. *Global Degradation of Soil and Water Resources: Regional Assessment and Strategies*. Beijing, Springer, 673 p.
- Panagos P., Ballabio C., Borrelli P., Meusburger K., Klik A., ... Alewell Ch. 2015. Rainfall Erosivity in Europe. *Science of The Total Environment*, 511: 801–814. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.008>.
- Panagos P., Ballabio C., Borrelli P., Meusburger K. 2016. Spatio-Temporal Analysis of Rainfall Erosivity and Erosivity Density in Greece. *Catena*, 137: 161–172. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.09.015>.
- Panagos P., Karydas C.G., Gitas I.Z., Montanarella L. 2012. Monthly Soil Erosion Monitoring Based on Remotely Sensed Biophysical Parameters: a Case Study in Strymonas River Basin Towards a Functional Pan-European Service. *International Journal of Digital Earth*, 5(6): 461–487. <https://doi.org/10.1080/17538947.2011.587897>.
- Panagos P., Hengl T., Wheeler I., Marcinkowski P., Rukeza M.B., ... Borrelli P. 2023. Global Rainfall Erosivity Database (GloREDa) and Monthly R-Factor Data at 1 km Spatial Resolution. *Data in Brief*, 50: 109482. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109482>.
- Papalexioy S.M., Koutsoyiannis D., Makropoulos C. 2013. How Extreme is Extreme? An Assessment of Daily Rainfall Distribution Tails. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(2): 851–862. <https://doi.org/10.5194/hess-17-851-2013>.
- Pennock D. 2019. *Soil Erosion: The Greatest Challenge to Sustainable Soil Management*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 100 p.
- Petan S., Rusjan S., Vidmar A., Mikos M. 2010. The Rainfall Kinetic Energy-Intensity Relationship for Rainfall Erosivity Estimation in the Mediterranean Part of Slovenia. *Journal of Hydrology*, 391(3–4): 314–321. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.031>.
- Renard K.G., Freimund J.R. 1994. Using Monthly Precipitation Data to Estimate the R-Factor in the Revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157(1–4): 287–306. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4).
- Renard K.G. 1997. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Agricultural Handbook. Washington, U.S. Government Printing Office, 384 p.
- Richardson C.W., Foster G.R., Wright D.A. 1983. Estimation of Erosion Index from Daily Rainfall Amount. *Transactions of the ASAE*, 26(1): 153–156. <https://doi.org/10.13031/2013.33893>.
- Van Rompaey A., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J. 2001. Modelling Mean Annual Sediment Yield Using a Distributed Approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11): 1221–1236. <https://doi.org/10.1002/esp.275>.
- Vousdoukas M.I., Ranasinghe R., Mentaschi L., Plomaritis Th.A., Athanasiou P., ... Feyen L. 2020. Sandy Coastlines Under Threat of Erosion. *Nature Climate Change*, 10: 260–263. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0>.
- Wen X., Zhen L., Jiang Q.O., Xiao Y. 2023. A Global Review of the Development and Application of Soil Erosion Control Techniques. *Environmental Research Letters*, 18(3): 033003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acbaac>.
- Williams J.R. 1975. Sediment-Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor. In: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources*. Washington DC, US Department of Agriculture, Agriculture Research Service: 244–252.

- Wischmeier W.H., Smith D.D. 1965. Prediction Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: A Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation. Agricultural Handbook No. 282. Washington, U.S. Department of Agriculture, 47 p.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses: a guide to conservation planning. Agricultural Handbook No. 537. Washington, U.S. Department of Agriculture, 58 p.
- Xie Y., Yin S., Liu B., Nearing M.A., Zhao Y. 2016. Models for Estimating Daily Rainfall Erosivity in China. *Journal of Hydrology*, 535(3): 547–558. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.020>.
- Yermolaev O.P., Gafurov A.M., Usmanov B.M. 2018. Evaluation of Erosion Intensity and Dynamics Using Terrestrial Laser Scanning. *Eurasian Soil Science*, 51: 814–826. <https://doi.org/10.1134/S1064229318070037>.
- Yin S., Nearing M.A., Borrelli P., Xue X. 2017. Rainfall Erosivity: An Overview of Methodologies and Applications. *Vadose Zone Journal*, 16(12): 1–16. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.06.0131>.
- Yu B. 1998. Rainfall Erosivity and Its Estimation for Australia's Tropics. *Soil Research*, 36(1): 143. <https://doi.org/10.1071/S97025>
- Yu B. 1999. A Comparison of the R-Factor in the Universal Soil Loss Equation and Revised Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 42(6): 1615–1620.
- Yu B., Hashim G.M., Eusof Z. 2001. Estimating the R-Factor with Limited Rainfall Data: A Case Study from Peninsular Malaysia. *Journal of Soil and Water Conservation*, 56(2): 101–105.
- Zolina O.G. 2011. Changes in the Duration of Synoptic Rainy Periods in Europe from 1950 to 2008 and Their Relation to Extreme Precipitation. *Doklady Earth Sciences*, 436: 279–283. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11020206>.

References

- Aleshina M.A., Semenov V.A. 2022. Changes in Precipitation Characteristics Over Russia in XX–XXI Centuries from CMIP6 Models Ensemble. *Fundamental and Applied Climatology*, 8(4): 424–440 (in Russian). <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-4-424-440>.
- Bazhenova O.I., Tyumentseva E.M., Cherkashina A.A., Golubtsov V.A., Tukhta S.A. 2023. Soil Resources of Southern Siberia. *Geography and Natural Resources*, 44(4): 37–45 (in Russian). <https://doi.org/10.15372/GIPR20230404>.
- Bikbulatova G.G. 2011. The Analysis of Atmospheric Moisture on the Territory of Siberia and Far East. *Omsk Scientific Bulletin*, 1(104): 232–235 (in Russian).
- Zaslavskiy M.N. 1979. *Eroziya pochv* [Soil Erosion]. Moscow, Publ. Mysl, 245 p.
- Yegorov I.E. 2009. Field Methods of Studying Soil Erosion. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*, 1: 157–170 (in Russian).
- Yermolaev O.P., Mukharamova S.S., Maltsev K.A., Polyakova A.R., Saveliev A.A. 2025a. Soil Erosion Factors in the European Russia Macroregion: Modeling, Geoinformation Mapping, and Spatial Analysis. *Eurasian Soil Science*, 58(2): 1–17 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S1064229324603561>.
- Yermolaev O.P., Mukharamova S.S., Polyakova A.R., Saveliev A.A. 2025b. Soil Erosion Factors in Basin Geosystems of the Asian Part of Russia. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 89(6): 930–942 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S2658697525060059>.
- Larionov G.A. 1993. *Eroziya i deflyatsiya pochv: osnovnyye zakonomernosti i kolichestvennyye otsenki* [Soil Erosion and Deflation: Basic Patterns and Quantitative Assessments]. Moscow, Publ. Moscow University Press, 198 p.
- Lisetsky F.N., Svetlichnyi A.A., Chernyi S.G. 2012. Recent Developments in Erosion Science. Belgorod, Publ. Konstanta, 456 p. (in Russian).
- Litvin L.F. 2002. *Geografiya erozii pochv selskokhozyaystvennykh zemel Rossii* [Geography of Soil Erosion on Agricultural Lands of Russia]. Moscow, Publ. Akademkniga, 255 p.
- Litvin L.F., Kiryukhina Z.P., Krasnov S.F., Dobrovolskaya N.G., Gorobets A.V. 2021. Dynamics of Agricultural Soil Erosion in Siberia and Far East. *Eurasian Soil Science*, 54(1): 150–160 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S1064229321010075>
- Loginov S.V. 2012. *Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' klimata aziatskoy territorii Rossii* [Spatio-Temporal Variability of Climate in the Asian Territory of Russia]. Abstract. dis. ... cand. phys.-math. sciences. Tomsk, 24 p.

- Perevedentsev Yu.P., Mirsayeva N.A., Pavlova V.N., Eliseyev A.V., Shantalinskiy K.M., ... Tagirov M.Sh. 2024. Sovremennyye regional'nyye klimaticheskiye izmeneniya i ikh posledstviya [Modern Regional Climate Changes and Their Consequences]. Moscow, Publ. RU-SAYNS, 224 p.
- Tanasienko A.A., Chumbaev A.S., Yakutina O.P., Almendros G., Klenov B.M. 2021. Rainfall Patterns Associated with Runoff and Erosion Levels in West-Siberian Chernozems. *The Journal of Soils and Environment*, 4(2): e145 (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v4i2.145>.
- Eroзионно-ruslovyye sistemy [Erosion-Channel Systems]. 2017. Ed. by R.S. Chalov, A.Yu. Sidorchuk, V.N. Golosov. Moscow, Publ. INFRA-M, 700 p.
- Angulo-Martínez M., Beguería S. 2009. Estimating Rainfall Erosivity from Daily Precipitation Records: A Comparison Among Methods Using Data from the Ebro Basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 379(1): 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.051>.
- Bazhenova O.I., Tyumentseva E.M., Golubtsov V.A. 2022a. Soil Erosion on the Agricultural Lands of the Asian Part of Russia (Siberia): Processes, Intensity and Areal Distribution. In: *Global Degradation of Soil and Water Resources*. Ed. by Li R., Napier T., ElSwaify S., Sabir M., Rienzi E. Beijing, Springer: 566–593.
- Bazhenova O.I., Cherkashina A.A., Tyumentseva E.M., Golubtsov V.A., Sorokovikova L.M. 2022b. Ecological Consequences of Soil Degradation and Water Pollution in the Asian Part of Russia (Siberia). In: *Global Degradation of Soil and Water Resources 2022*. Ed. by Li R., Napier T., ElSwaify S., Sabir M., Rienzi E. Beijing, Springer: 594–616.
- Bonilla C.A., Vidal K.L. 2011. Rainfall Erosivity in Central Chile. *Journal of Hydrology*, 410(1–2): 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.022>.
- Borrelli P., Diodato N., Panagos P. 2016. Rainfall Erosivity in Italy: A National Scale Spatio-Temporal Assessment. *International Journal of Digital Earth*, 9(9): 835–850. <https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1148203>.
- Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., ... Panagos P. 2017. An Assessment of the Global Impact of 21st Century Land Use Change on Soil Erosion. *Nature Communications*, 8(1): 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>.
- Capolongo D., Diodato N., Mannaerts C.M., Piccarreta M., Strobl R.O. 2008. Analyzing Temporal Changes in Climate Erosivity Using a Simplified Rainfall Erosivity Model in Basilicata (Southern Italy). *Journal of Hydrology*, 356(1–2): 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.04.002>.
- Chizhikova N., Yermolaev O., Golosov V., Mukharamova S., Saveliev A. 2022. Changes in the Regime of Erosive Precipitation on the European Part of Russia for the Period 1966–2020. *Geosciences (Switzerland)*, 12(7): 279. <https://doi.org/10.3390/geosciences12070279>.
- Diodato N., Bellocchi G. 2007. Estimating Monthly (R)USLE Climate Input in a Mediterranean Region Using Limited Data. *Journal of Hydrology*, 345(3–4): 224–236. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.08.008>.
- Fiener P., Neuhaus P., Botschek J. 2013. Long-Term Trends in Rainfall Erosivity: Analysis of High Resolution Precipitation Time Series (1937–2007) from Western Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 171–172: 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.011>.
- Hastie T., Tibshirani R. 1986. Generalized Additive Models. *Statistical Science*, 1(3): 297–310.
- Janeček M., Květoň V., Kubátová E., Kobzová D., Vošmerová M., Chlupsová J. 2013. Values of Rainfall Erosivity Factor for the Czech Republic. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 61(2): 97–102. <https://doi.org/10.2478/johh-2013-0013>.
- Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., ... Zhou B. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Cambridge University Press, 2391 p.
- Meusburger K., Steel A., Panagos P., Montanarella L., Alewell C. 2012. Spatial and Temporal Variability of Rainfall Erosivity Factor for Switzerland. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16: 167–177. <https://doi.org/10.5194/hess-16-167-2012>.
- Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson L.R. 1996. Iverson Modelling Topographic Potential for Erosion and Deposition Using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 10(5): 629–641.
- Li R., Napier T., El-Swaify S., Sabir M., Rienzi E. 2022. *Global Degradation of Soil and Water Resources: Regional Assessment and Strategies*. Beijing, Springer, 673 p.

- Panagos P., Ballabio C., Borrelli P., Meusburger K., Klik A., ... Alewell Ch. 2015. Rainfall Erosivity in Europe. *Science of The Total Environment*, 511: 801–814. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.008>.
- Panagos P., Ballabio C., Borrelli P., Meusburger K. 2016. Spatio-Temporal Analysis of Rainfall Erosivity and Erosivity Density in Greece. *Catena*, 137: 161–172. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.09.015>.
- Panagos P., Karydas C.G., Gitas I.Z., Montanarella L. 2012. Monthly Soil Erosion Monitoring Based on Remotely Sensed Biophysical Parameters: a Case Study in Strymonas River Basin Towards a Functional Pan-European Service. *International Journal of Digital Earth*, 5(6): 461–487. <https://doi.org/10.1080/17538947.2011.587897>.
- Panagos P., Hengl T., Wheeler I., Marcinkowski P., Rukeza M.B., ... Borrelli P. 2023. Global Rainfall Erosivity Database (GloREDa) and Monthly R-Factor Data at 1 km Spatial Resolution. *Data in Brief*, 50: 109482. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109482>.
- Papalexiou S.M., Koutsoyiannis D., Makropoulos C. 2013. How Extreme is Extreme? An Assessment of Daily Rainfall Distribution Tails. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(2): 851–862. <https://doi.org/10.5194/hess-17-851-2013>.
- Pennock D. 2019. Soil Erosion: The Greatest Challenge to Sustainable Soil Management. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 100 p.
- Petan S., Rusjan S., Vidmar A., Mikos M. 2010. The Rainfall Kinetic Energy-Intensity Relationship for Rainfall Erosivity Estimation in the Mediterranean Part of Sloveni. *Journal of Hydrology*, 391(3–4): 314–321. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.031>
- Renard K.G., Freimund J.R. 1994. Using Monthly Precipitation Data to Estimate the R-Factor in the Revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157(1–4): 287–306. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4).
- Renard K.G. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agricultural Handbook*. Washington, U.S. Government Printing Office, 384 p.
- Richardson C.W., Foster G.R., Wright D.A. 1983. Estimation of Erosion Index from Daily Rainfall Amount. *Transactions of the ASAE*, 26(1): 153–156. <https://doi.org/10.13031/2013.33893>.
- Van Rompaey A., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J. 2001. Modelling Mean Annual Sediment Yield Using a Distributed Approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11): 1221–1236. <https://doi.org/10.1002/esp.275>
- Vousdoukas M.I., Ranasinghe R., Mentaschi L., Plomaritis Th.A., Athanasiou P., ... Feyen L. 2020. Sandy Coastlines Under Threat of Erosion. *Nature Climate Change*, 10: 260–263. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0>.
- Wen X., Zhen L., Jiang Q.O., Xiao Y. 2023. A Global Review of the Development and Application of Soil Erosion Control Techniques. *Environmental Research Letters*, 18(3): 033003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acbaac>.
- Williams J.R. 1975. Sediment-Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor. In: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources*. Washington DC, US Department of Agriculture, Agriculture Research Service: 244–252.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. 1965. Prediction Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: A Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation. *Agricultural Handbook No. 282*. Washington, U.S. Department of Agriculture, 47 p.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses: a guide to conservation planning. *Agricultural Handbook No. 537*. Washington, U.S. Department of Agriculture, 58 p.
- Xie Y., Yin S., Liu B., Nearing M.A., Zhao Y. 2016. Models for Estimating Daily Rainfall Erosivity in China. *Journal of Hydrology*, 535(3): 547–558. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.020>.
- Yermolaev O.P., Gafurov A.M., Usmanov B.M. 2018. Evaluation of Erosion Intensity and Dynamics Using Terrestrial Laser Scanning. *Eurasian Soil Science*, 51: 814–826. <https://doi.org/10.1134/S1064229318070037>.
- Yin S., Nearing M.A., Borrelli P., Xue X. 2017. Rainfall Erosivity: An Overview of Methodologies and Applications. *Vadose Zone Journal*, 16(12): 1–16. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.06.0131>.
- Yu B. 1998. Rainfall Erosivity and Its Estimation for Australia's Tropics. *Soil Research*, 36(1): 143. <https://doi.org/10.1071/S97025>

- Yu B. 1999. A Comparison of the R-Factor in the Universal Soil Loss Equation and Revised Universal Soil Loss Equation. Transactions of the ASAE, 42(6): 1615–1620.
- Yu B., Hashim G.M., Eusof Z. 2001. Estimating the R-Factor with Limited Rainfall Data: A Case Study from Peninsular Malaysia. Journal of Soil and Water Conservation, 56(2): 101–105.
- Zolina O.G. 2011. Changes in the Duration of Synoptic Rainy Periods in Europe from 1950 to 2008 and Their Relation to Extreme Precipitation. Doklady Earth Sciences, 436: 279–283. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11020206>.

*Поступила в редакцию 16.05.2026;
поступила после рецензирования 28.06.2026;
принята к публикации 17.07.2026*

*Received May 16, 2026;
Revised June 28, 2026;
Accepted July 17, 2026*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Полякова Алика Рафаэлевна, старший преподаватель кафедры моделирования экологических систем института экологии, биотехнологии и природопользования К(П)ФУ, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Мухарамова Светлана Саясовна, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры моделирования экологических систем института экологии, биотехнологии и природопользования К(П)ФУ, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Ермолаев Олег Петрович, доктор географических наук, профессор, профессор кафедры ландшафтной экологии института экологии, биотехнологии и природопользования К(П)ФУ, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Савельев Анатолий Александрович, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник учебно-научной лаборатории «Центр агро- и экобиотехнологий» института экологии, биотехнологии и природопользования К(П)ФУ, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alika R. Polyakova, Senior Lecturer of the Department of Environmental Systems Modeling, Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

Svetlana S. Mukharamova, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Ecological Systems Modeling, Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

Oleg P. Yermolaev, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Professor at the Department of Landscape Ecology, Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

Anatoly A. Saveliev, Doctor of Biological Sciences, Professor, Chief Researcher at the "Center for Agro- and Eco-Biotechnologies" Educational and Research Laboratory, Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

УДК 631.4
DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-3-555-572
EDN GKTMHF

Параметры ареалов и карбонатных профилей эталонно-значимых черноземов выщелоченных и типичных на юге Среднерусской возвышенности

¹Чендев Ю.Г., ²Геннадиев А.Н., ²Смирнова М.А., ¹Талджеббини А., ¹Юй С.

¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет
Россия, 310015, г. Белгород, ул. Победы, 85

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Россия, 117992, г. Москва, Ленинские горы, 1
Chendev@bsuedu.ru; summjeria@yandex.ru

Аннотация. Впервые в практике исследования лесостепных почв выполнен сравнительный анализ двух зональных подтипов лугово-степных черноземов (выщелоченного и типичного), ареалы которых расположены в непосредственной близости друг от друга на эталонно-значимых водораздельных территориях с нативными свойствами почв, занятых старыми выгонами и сенокосами, которые никогда не подвергались распашке. Исследование проводилось на территории Белгородской области (юг Среднерусской возвышенности). Детальное почвенное картографирование на трех пространственно разобщенных ключевых участках выявило повсеместное представительство в структуре почвенного покрова ровных водоразделов ареалов выщелоченных и типичных черноземов с преобладанием по площади черноземов типичных (фоновый компонент почвенного покрова). Ареалы черноземов выщелоченных, как правило, имеют округлую или овальную, реже вытянутую форму при средней площади 70 м² (варьирование от 5 до 140 м²), в единичном случае встречен ареал площадью 450 м². Ширина зон перехода от типичных к выщелоченным черноземам, окружающих ареалы черноземов выщелоченных, в среднем составляет 2,4 ± 0,1 м (варьирование от 0,5 до 5 м). Профильное распределение содержания углерода карбонатов в выщелоченных и типичных черноземах имеет разнообразный вид: с одним или несколькими максимумами, с максимумом в верхней части карбонатных профилей, с постепенным ростом содержания показателя с глубиной. Однако в среднестатистических черноземах выщелоченных и типичных выявляется один максимум залегания карбонатов, причем в черноземах выщелоченных он находится на глубине 160 см, а в черноземах типичных – на глубине 125–130 см. Анализ карбонатных профилей свидетельствует о более высоких запасах углерода карбонатов в слое 0–200 см у черноземов типичных (319 т/га) по сравнению с черноземами выщелоченными (218 т/га). Обсуждается вопрос о роли литогенной дифференциации запасов карбонатов в профилях изучаемых черноземов. Результаты исследования рекомендуется использовать в системе фонового экологического мониторинга, а также в практике точного земледелия.

Ключевые слова: детальное картографирование почв, анализ почвенных профилей, эталонно-значимые черноземы, старые выгоны и сенокосы, автоморфный рельеф, лесостепь, Белгородская область

Благодарности Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 24-17-00154 «География, свойства и эталонные функции нативных черноземов лесостепи юга Среднерусской возвышенности», https://rscf.ru/prj_card_int?24-17-00154).

Для цитирования: Чендев Ю.Г., Геннадиев А.Н., Смирнова М.А., Талджеббини А., Юй С. 2026. Параметры ареалов и карбонатных профилей эталонно-значимых черноземов выщелоченных и типичных на юге Среднерусской возвышенности. Региональные геосистемы, 50(3): 555–572. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-555-572 EDN: GKTMHF

Parameters of Areas and Carbonate Profiles of Benchmark Leached and Typical Chernozems in the South of the Central Russian Upland

¹Yury G. Chendev, ²Alexander N. Gennadiev, ²Maria A. Smirnova,

¹Abdulrazzaq Taljebini, ¹Xiaoyu Yu

¹Belgorod State National Research University,
85 Pobeda St., Belgorod 308015, Russia

²Lomonosow Moscow State University,
1 Leninskie Gory, Moscow 117992, Russia
Chendev@bsuedu.ru; summjeria@yandex.ru

Abstract. This study presents the first comparative analysis of two zonal subtypes of meadow–steppe chernozems, whose areas lie in close proximity to one another. We selected benchmark sites with native soil properties on flat watershed surfaces, represented by old fallow lands and hayfields that had never been ploughed. The research was conducted within Belgorod region (the southern part of the Central Russian Upland). Detailed soil mapping at three spatially discrete key sites revealed that the soil cover on level watersheds consistently comprises two sub-types of meadow–steppe chernozems – typical and leached ones – with the typical form predominating in area and constituting the background soil component. The leached chernozems occur as discrete areas, generally circular or oval in outline, more rarely elongated, with a mean area of about 70 m² (ranging from 5 to 140 m²); only one larger area of 450 m² was encountered. The transitional zones surrounding the leached chernozems and delimiting them from the typical chernozems have an average width of 2.4 ± 0.1 m (ranging from 0.5 to 5 m). The profile distribution of carbonate carbon content varied considerably in both sub-types: some showed single or multiple maxima, some peaked in the upper part of the carbonate horizon, and others exhibited a gradual increase with depth. In the averaged profiles, however, a single distinct maximum emerges – at 160 cm in the leached chernozems and at 125–130 cm in the typical ones. Carbonate carbon stocks in the 0–200 cm layer proved markedly higher in the typical chernozems (319 t ha⁻¹) than in the leached ones (218 t ha⁻¹). The analysis has allowed us to examine the possible role of lithogenic differentiation in controlling carbonate stocks within the profiles studied. The findings are recommended for application in background environmental monitoring and in precision agriculture.

Keywords: Central Russian Upland, Belgorod region, forest-steppe, soil areas, leached chernozems, typical chernozems, carbonate profiles of soils

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation, project No. 24-17-00154 «Geography, properties, and benchmark functions of native chernozems in the southern forest-steppe of the Central Russian Upland», https://rscf.ru/prj_card_int?24-17-00154.

For citation: Chendev Yu.G., Gennadiev A.N., Smirnova M.A., Taljebini A., Xiaoyu Yu. 2026. Parameters of Areas and Carbonate Profiles of Benchmark Leached and Typical Chernozems in the South of the Central Russian Upland. *Regional Geosystems*, 50(3): 555–572 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-555-572 EDN: GKTMHF

Введение

Вопросам генезиса и географии почв лесостепи Среднерусской возвышенности посвящено немало работ, начиная с исследований В.В. Докучаева [Докучаев, 1883; Афанасьева, 1966; Фридланд и др., 1969; Коковина, Лебедева, 1986; Ахтырцев Б.П., Ахтырцев А.Б., 1993; Щеглов, 1999; Геннадиев и др., 2010; Русаков, 2012; Vysloužilová et al., 2016; Mikhailova et al., 2018; Козлов и др., 2019; Lozbenov et al., 2019; Грошева, 2020; Смирнова и др., 2020; Лукин, 2023; Чендев и др., 2024; Pimenov et al., 2025]. Однако, несмотря на это, остается целый ряд дискуссионных вопросов, работа над которыми представляется весьма актуальной. Речь, в частности, идет о совершенствовании подходов к оценке результатов длительного хозяйственного освоения и использования почв данного региона на основе

сопоставления трансформированных почвенных разностей с антропогенно-малоизмененными почвами и участками почвенного покрова [Лебедева, 2002; Чендев и др., 2017]. В этой связи весьма важно рассматривать поиск и изучение уцелевших эталонно-значимых фрагментов нативного почвенного покрова [Тишков, 2024; Чернова, Присяжная, 2024]. Первые наши исследования в указанном направлении позволили выявить такие сохранившиеся фрагменты и обосновать подходы для определения степени их эталонности [Чендев и др., 2017; Чендев и др., 2024; Новых и др., 2025]. Они оказались представленными автоморфными приводораздельными черноземами старых выгонов и сенокосов на территориях или в окрестностях ряда сел и деревень Белгородской области, которые никогда не распахивались и за всю свою историю хозяйственного освоения подвергались лишь выпасу домашних животных и сенокошению. Следует отметить, что хорошо известные заповедные территории лесостепи Среднерусской возвышенности также ранее использовались в качестве выгонов и сенокосов, как например, Центрально-Черноземный заповедник им. В.В. Алехина (включавший тогда и Ямскую степь), который к моменту издания монографии Е.А. Афанасьевой [1966] лишь 30 лет находился в заповедном режиме. Другим вопросом, требующим ответа, является вопрос о составе и строении нативного черноземного почвенного покрова на приводораздельных пространствах. Ранее проведенные исследования показали, что в структуре естественного почвенного покрова лугово-степных ландшафтов Центральной лесостепи (на участках заповедной степной целины) встречается, главным образом, два подтипа черноземов: черноземы типичные и черноземы выщелоченные [Афанасьева, 1966; Щеглов, 1999; Русаков, 2012]. По мнению Е.А. Афанасьевой [1966], на территории заповедной Стрелецкой степи среди преобладающих по площади черноземов типичных по микрозападинам плоских водораздельных поверхностей также встречаются черноземы выщелоченные, характеризующиеся наличием карбонатов глубже горизонта В – в горизонте ВС, переходном к материнской породе. Близкие географические особенности распространения этих подтипов были обнаружены южнее – на территории Ямской степи в Губкинском районе Белгородской области, относящейся в настоящее время к заповеднику «Белогорье» [Фридланд и др., 1969; Русаков, 2012]. Тем не менее, открытым остается вопрос – везде ли кроме указанных участков сохраняется наличие в структуре нативного почвенного покрова водоразделов двух указанных подтипов черноземов? Необходимость решения данного вопроса определила цель проведенного авторами статьи исследования, а именно – изучить особенности почвенного покрова на ряде новых эталонно значимых ключевых участках лугово-степных ландшафтов Среднерусской возвышенности, выявить и проанализировать компоненты почвенного покрова на уровне подтипов в соответствии с отечественной классификацией почв 1977 г. [Классификация..., 1977], а также рассмотреть характер строения их карбонатных профилей, который является определяющим при диагностике рассматриваемых подтипов черноземных почв.

Объекты и методы исследования

Ключевые участки исследований находятся на южном макросклоне Среднерусской возвышенности в северной части Белгородской области. Схема местоположения участков исследования представлена на рис. 1.

Все участки расположены на ровных водораздельных поверхностях в диапазоне абсолютных высот 230–240 м. Почвообразующими породами являются карбонатные тяжелые лессовидные суглинки, а на крайнем восточном участке «Верхососна» – карбонатные лессовидные глины. Несколько отдельных слов следует сказать об участке «Верхососна», т.к. одноименное село, на юго-западной окраине которого были выполнены почвенные исследования, до 1770-х гг. носило статус города, а в XVII веке являлось городом-крепостью на оборонительной линии укреплений Белгородской черты.

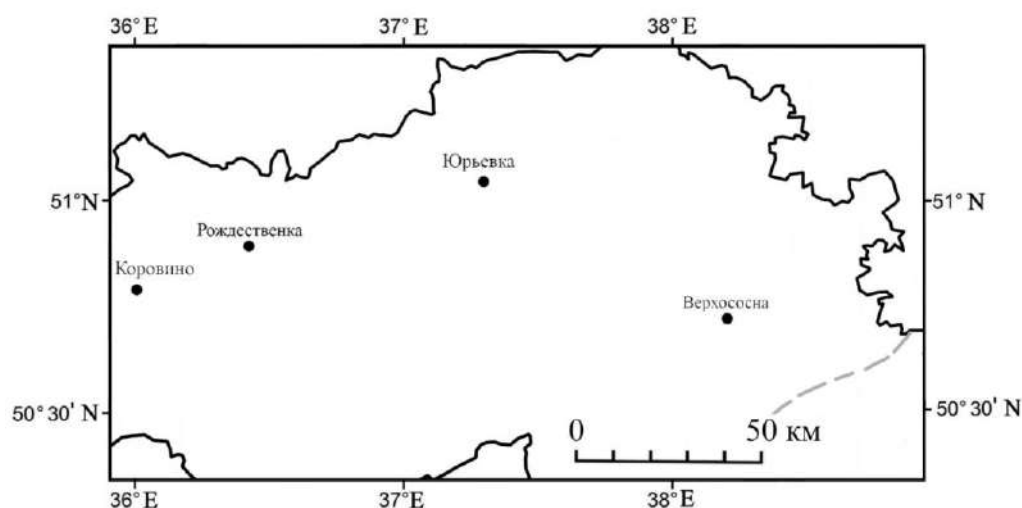


Рис. 1. Местоположение ключевых участков исследования. Сплошной линией показана граница Белгородской области, пунктирной линией – граница лесостепи и степи
Fig. 1. Location of the key plots. The solid line is the border of Belgorod region, the dotted line shows the border between forest-steppe and steppe

Все изучаемые участки находятся на территории старых выгонов и сенокосов, которые, судя по анализу достоверных крупномасштабных (М 1 : 8400, 1 : 10000) материалов разновременных съемок (начиная с конца XVIII века), а также по строению верхней части профилей изученных почв, не распахивались и подвергались только «мягким» антропогенным воздействиям в виде сенокосения и выпаса животных [Чендев и др., 2024].

Несмотря на то, что все больше дается рекомендаций по совершенствованию крупномасштабного почвенного картографирования с использованием данных дистанционного зондирования Земли [Савин, 2025; De Caires et al., 2025], наземные съемки остаются одним из наиболее важных элементов детального почвенного картографирования. На участках «Коровино», «Рождественка» и «Верхососна» выполненное авторами статьи детальное почвенное картографирование потребовало проведения следующих видов работ. Размечали границы участков и точки бурения, выполняли координатную и высотную привязки всех размеченных точек с помощью спутникового геодезического оборудования *South Galaxy G2*. Производили бурение почв тонкоствольным почвенным буром до глубины 2 м, в точках бурения описывали строение почвенных профилей, в наиболее репрезентативных (по описанию почв в скважинах) участках определяли места заложения глубоких почвенных разрезов, выполняли их экскавацию и с помощью метода морфологического анализа почвенного профиля проводили описание почвенных профилей. Заключительным этапом полевых работ был отбор почвенных проб из разрезов и скважин для лабораторных анализов с последующей рекультивацией разрезов. Скважины закладывали по квадратной сетке через 10 м на участках «Коровино» (квадрат со стороной 50 м) и «Рождественка» (прямоугольник со сторонами 40 на 50 м) и через 7,5 м на участке «Верхососна» (квадрат со стороной 30 м). В общей сложности было выполнено бурение почв в 91 точке и заложено 14 почвенных разрезов. Пробоотбор в скважинах и разрезах осуществлялся через каждые 10 см в слое 0–100 см и через 20 см в более глубоко лежащих слоях – до 2 м. В разрезах пробоотбор выполнялся с их боковых стенок с последующим усреднением навесок проб. Схема мест бурения и заложения разрезов на трех изученных участках представлена на рис. 2.

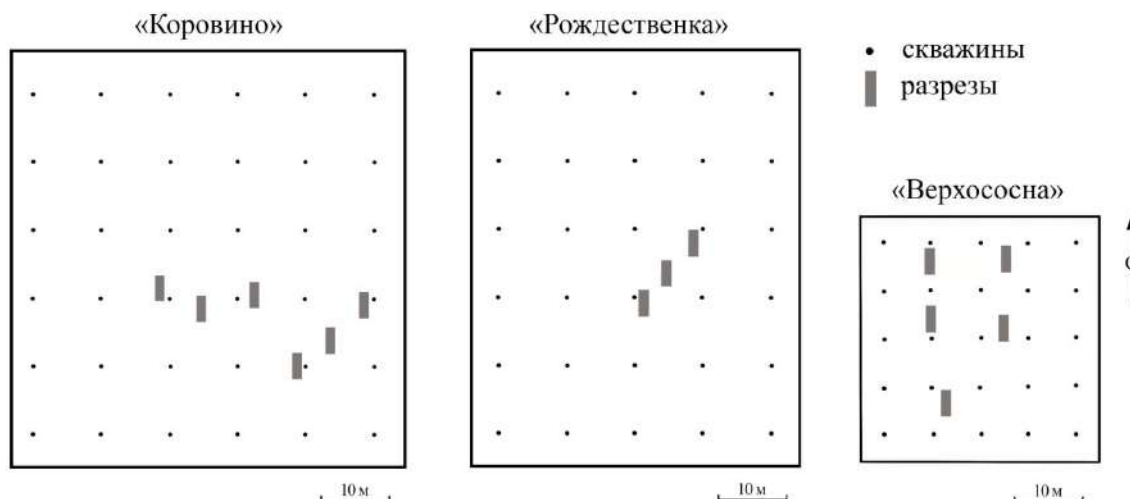


Рис. 2. Картосхемы участков детального почвенного картографирования с указанием мест заложения почвенных скважин и разрезов

Fig. 2. Maps of detailed soil area mapping indicating the locations of soil boreholes and pits

На участке «Юрьевка» картографирование почв не выполнялось, и почвенные профили были изучены в двух глубоких разрезах на расстоянии 10 м друг от друга. В разрезе 1 был исследован профиль чернозема выщелоченного, а в разрезе 2 – чернозема типичного, что послужило поводом для включения черноземов данного участка в объединенные выборки почв, изученные на участках картографирования, где также выявлялось близкое расположение ареалов выщелоченных и типичных черноземов. Идентификация почв на уровне подтипов на всех исследованных участках выполнялась в соответствии с рекомендациями, содержащимися в работе [Классификация..., 1977]. Для черноземов типичных максимальная глубина вскипания (глубина залегания карбонатов) нами идентифицировалась на уровне середины горизонта В, а черноземы выщелоченные определялись по вскипанию в горизонте ВС. Переходные разности черноземов от типичных к выщелоченным характеризовались наличием вскипания между средней частью горизонта В и верхней частью горизонта ВС.

Плотность сложения почв в разрезах была определена гравиметрическим методом с помощью стальных колец объемом 66,92 см³ в 3-кратной повторности послойно. Лабораторные анализы выполняли для таких характеристик как содержание гигроскопической влаги и содержание углерода карбонатов ацидиметрическим методом. Точное содержание углерода карбонатов в почвах рассчитывалось по произведению коэффициента гигроскопичности на полученное лабораторным методом содержание углерода карбонатов.

Результаты и их обсуждение

Тахеометрическая съемка участков детального почвенного картографирования показала максимальные относительные перепады высот между противоположными точками участков «Верхососна» и «Рождественка», равные 0,4–0,5 м, а на участке «Коровино» – 1,5 м (по диагонали, равной 71 м). На первых двух участках крутизна поверхности не превышает 1° (абсолютно ровные водоразделы), а на участке «Коровино» этот показатель находится в диапазоне 1–1,5° (ровный водораздел с намечающимся очень пологим водораздельным склоном). На участке «Юрьевка» территория между разрезами и на значительном удалении от них представляет собой абсолютно ровную водораздельную поверхность. Грунтовые воды на всех участках залегают на глубинах более 10 м. Таким образом, все участки удовлетворяют условию изучения на них автоморфного зонального почвообразования.

Прежде чем перейти к анализу результатов выполненного полевого и лабораторного исследования почв, обратимся к анализу картосхем распределения ареалов лугово-степных черноземов на всей территории лесостепи Среднерусской возвышенности (рис. 3).

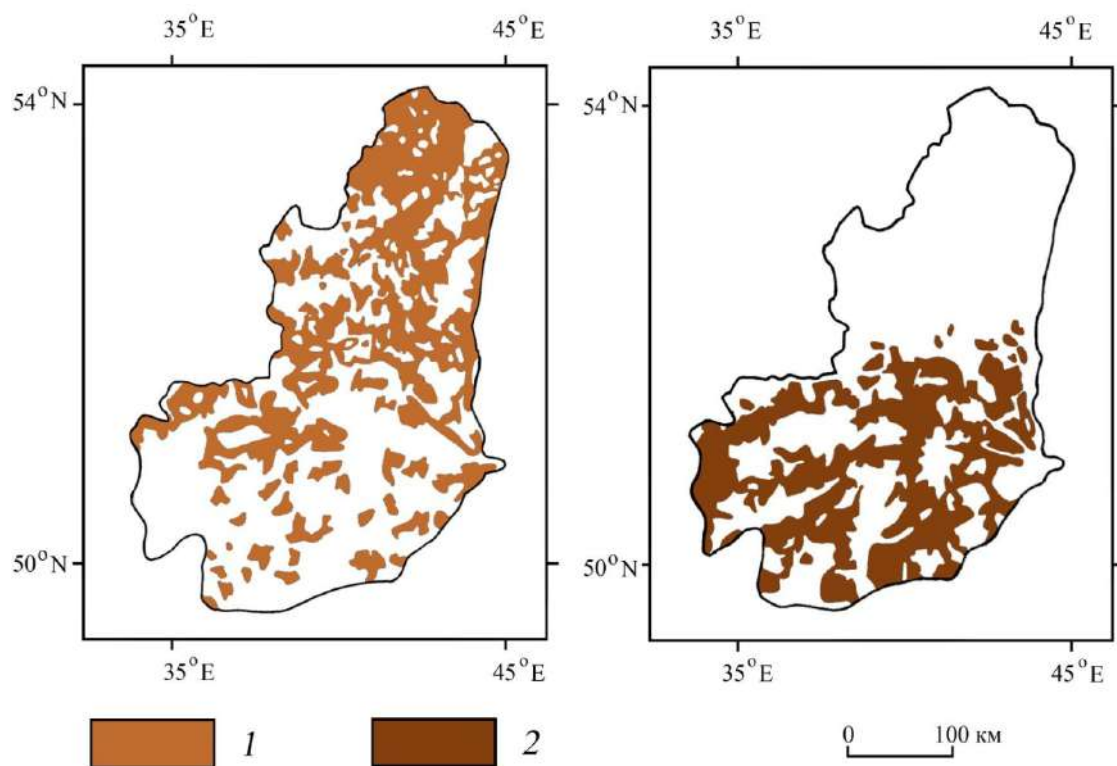


Рис. 3. Ареалы лугово-степных подтипов черноземов на территории лесостепи Среднерусской возвышенности: 1 – выщелоченных, 2 – типичных (составлено путем прорисовки контуров различных подтипов черноземов с почвенной карты РСФСР масштаба 1 : 2500000)

Fig. 3. Areas of meadow-steppe subtypes of chernozems in the forest-steppe territory of the Central Russian Upland: 1 – leached, 2 – typical (compiled on the basis of the RSFSR soil map on a scale of 1 : 2500000)

Данные картосхемы были выполнены на основе использования почвенной карты России мелкого масштаба – 1 : 2500000¹. Согласно распределению двух зональных подтипов лугово-степных черноземов (выщелоченного и типичного) на картосхемах рис. 3, лесостепь Среднерусской возвышенности можно разделить на подзоны. Северная подзона характеризуется господством на территории луговых степей только черноземов выщелоченных, а южная подзона – господством двухкомпонентного почвенного покрова, состоящего из выщелоченных и типичных черноземов. Севернее 52° с. ш. черноземы типичные на карте масштаба 1 : 2500000 не выделены (см. рис. 3). Данное наблюдение представляется весьма важным с точки зрения дальнейшего обсуждения полученных результатов, так как все ключевые участки исследований находятся южнее 52° с. ш. (см. рис. 1).

Картосхемы почв, выполненные на основании детального почвенного картографирования трех участков нашего исследования, представлены на рис. 4. Основным фоном в структуре почвенного покрова на всех участках выступают черноземы типичные. Однако также повсеместно, хотя и на меньшей площади, присутствуют ареалы черноземов выщелоченных.

¹ Почвенная карта РСФСР масштаба 1:2500000. 1987. Под ред. В.М. Фридланда. М., Лист 5.

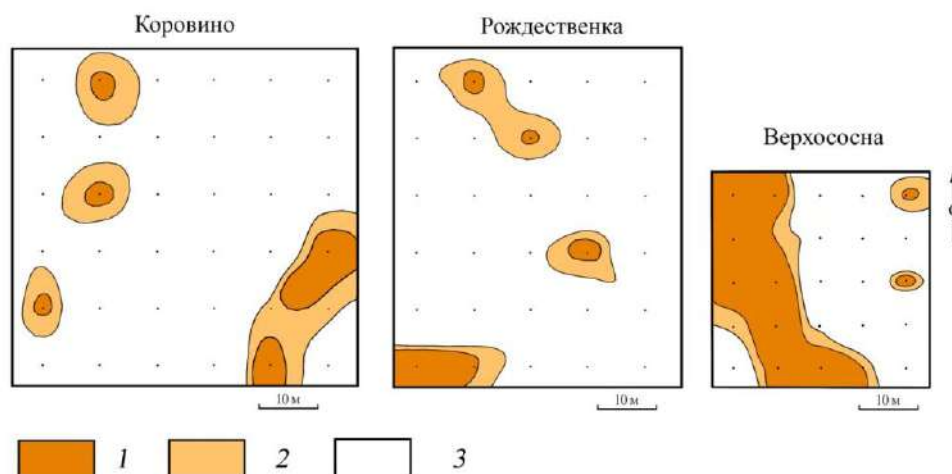


Рис. 4. Картограммы почвенных ареалов на трех ключевых участках исследования.

Условные обозначения: 1 – черноземы выщелоченные, 2 – почвы, переходные от черноземов выщелоченных к черноземам типичным, 3 – черноземы типичные

Fig.4. Schemes of soils in the three key plots under study. Legend: 1 – leached chernozems, 2 – transitional soils changing from leached chernozems to typical chernozems, 3 – typical chernozems

Случайный выбор участков картографирования исключает субъективный фактор поиска мест исследований и позволяет предполагать закономерное существование в зональной структуре почвенного покрова лесостепи юга Среднерусской возвышенности комбинаций, состоящих из автоморфных черноземов типичных и выщелоченных, причем эта особенность выявляется в широком диапазоне картографирования – от мелкого до детального масштабов, как это наглядно демонстрируют картограммы на рис. 3 и 4.

Форму выявленных ареалов черноземов выщелоченных можно охарактеризовать как округлую, овальную или вытянутую (см. рис. 4). Близкие оценки содержатся в работах других авторов, выполнявших полевые исследования и детальное картографирование заповедных участков луговых степей [Афанасьева, 1966; Фридланд, 1972].

Особого внимания заслуживает, выявленное в полевых условиях и картографическими способами, пространство перехода между двумя рассматриваемыми подтипами черноземов (см. рис. 4). На картах масштаба 1 : 1000 и крупнее данные зоны рекомендуется выделять в качестве самостоятельных ареалов, т.к. их конфигурация хорошо прослеживается на планах в указанных масштабах. Ряд показателей и свойств, выявленных путем анализа картограмм на рис. 4, представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1
Table 1

Форма и площади ареалов черноземов выщелоченных
на участках детального почвенного картографирования (согласно анализу рис. 4)
Shape and size of leached chernozem areas identified according to detailed soil mapping (Fig. 4)

Участок	Форма ареала и площадь, м ²					Площадь всех ареалов, % от площади участка
	1	2	3	4	5	
«Коровино»	округлая, 9	округлая, 20	округлая, 20	овальная, 60	вытянутая, 140	6,9
«Рождественка»	вытянутая, 120	округлая, 10	округлая, 7	овальная, 17	–	4,5
«Верхососна»	вытянутая, 450	овальная, 6	овальная, 4	–	–	32,7

Примечание: прочерк – ареал отсутствует

Таблица 2
Table 2

Статистические показатели ширины зоны перехода (м) между выщелоченными и типичными черноземами на участках детального картографирования (согласно анализу рис. 4)
Statistical indicators of the width of transition zone (m) between leached and typical chernozems in areas of detailed mapping (according to analysis of Fig. 4)

Участок	<i>n</i>	<i>Lim</i>	$X \pm \delta_x$	δ	<i>V</i> , %
«Коровино»	40	0,8–5,0	$2,8 \pm 0,2$	1,22	43,6
«Рождественка»	40	0,5–4,7	$2,7 \pm 0,2$	1,09	40,4
«Верхососна»	40	0,5–3,4	$1,6 \pm 0,1$	0,78	48,8
Все участки	120	0,5–5,0	$2,4 \pm 0,1$	1,17	48,8

Примечание: *n* – количество измерений, *Lim* – предел варьирования (*min–max*), $X \pm \delta_x$ – среднее арифметическое с ошибкой выборочной средней, δ – стандартное отклонение, *V* – коэффициент вариации.

Полученные результаты приобретают особенное значение в связи с тем, что работ, содержащих материалы детального картографирования черноземных почв не много [Фридланд и др., 1969; Фридланд, 1972; Ахтырцев, Соловиченко, 1984; Khitrov et al., 2019; Жидкин и др., 2023; Chinilin et al., 2024, Suleymanov et al., 2024], и еще меньше работ, раскрывающих данный аспект на сохранившихся нативных фрагментах почвенного покрова лесостепи Среднерусской возвышенности [Фридланд и др., 1969; Фридланд, 1972; Lozbenov et al., 2019]. Изучение географии естественных почвенных ареалов с помощью планов почвенного покрова пахотных угодий детального масштаба, по-видимому, не совсем корректно. Об этом, в частности, свидетельствуют результаты почвенных съемок участка заповедной Стрелецкой степи и прилегающего к нему участка пашни с возрастом распашки не менее 60 лет (в идентичных условиях рельефа и почвообразующих пород). Выяснилось, что на пахотном угодье площадная доля выщелоченных черноземов оказалась сниженной за счет увеличения доли черноземов типичных [Фридланд, 1972]. Мы полагаем, что это связано с трендом агрогенной трансформации черноземов выщелоченных в черноземы типичные в обстановке изменившихся на пашне гидротермических режимов почвообразования, о чем имеются упоминания в литературе [Лебедева, 2002; Чендев, 2008; Чендев и др., 2017].

Второй частью проведенного исследования являлся анализ параметров карбонатных профилей изученных черноземов. Главное отличие черноземов выщелоченных от черноземов типичных заключается в более глубоком (на уровне горизонта ВС у выщелоченных черноземов) нахождении карбонатов в профилях. По визуально определяемым морфологическим формам карбонатов отличия определены на уровне тенденции и заключаются в несколько меньшем представителестве карбонатной плесени и в несколько большей частоте встречаемости карбонатных журавчиков в профилях выщелоченных черноземов по сравнению с черноземами типичными. Формы карбонатов, выявленные в процессе описания почвенных профилей ($Ч^B$ и $Ч^T$), представлены на рис. 5.

Усредненный по всем изученным профилям (для черноземов выщелоченных $n = 7$, для черноземов типичных $n = 6$), ход содержания углерода карбонатов с глубиной представлен на рис. 6. Анализ выполнялся для тех участков («Коровино», «Верхососна», «Юрьевка»), на которых профили черноземов выщелоченных и типичных были выявлены и проанализированы в непосредственной близости друг от друга. Из анализа был исключен участок «Рождественка», в трех разрезах которого были описаны только черноземы типичные. На представленных графиках рис. 6 в 2-метровой толще почв выявляется один максимум содержания углерода карбонатов, причем у черноземов выщелоченных он находится на глубине 160 см, а у черноземов типичных – на глубине 125 см, т.е. располагается на 35 см выше. Рассчитанные на основании установленных плотности сложения и содержания углерода карбонатов в почвенных профилях, послойные и профильные (0–200 см) запасы углерода карбонатов представлены в табл. 3. Достоверные отличия запасов в черноземах выщелоченных от черноземов типичных определяются в слоях 50–100 и 100–150 см, а в слое 150–200 см значения выравниваются (табл. 3).

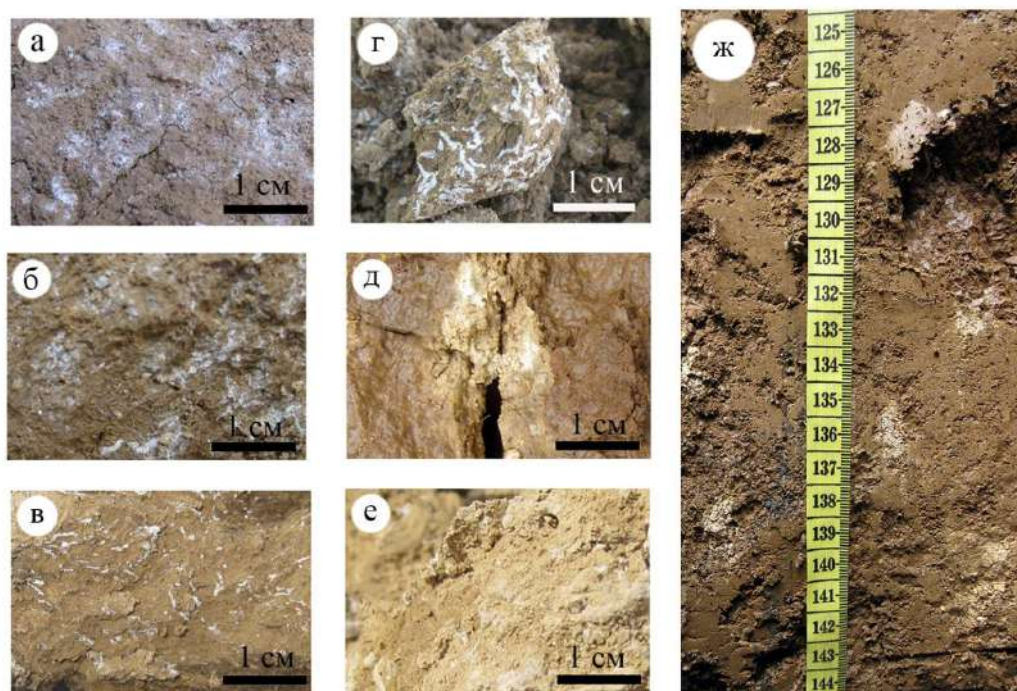


Рис. 5. Формы карбонатных новообразований, встреченные в профилях черноземов выщелоченных и типичных на участках исследования: а – плесень, б – сочетание плесени и мицелия, в – мицелий, г – трубочки, д – кутаны, е – мучнистые дисперсно рассеянные карбонаты, ж – журавчики
Fig. 5. Forms of carbonate neoformations found in profiles of the studied leached and typical chernozems.
а – mold, б – combination of mold and mycelium, в – mycelium, г – tubules, д – cutans, е – mealy dispersed carbonates, ж – dense nodules

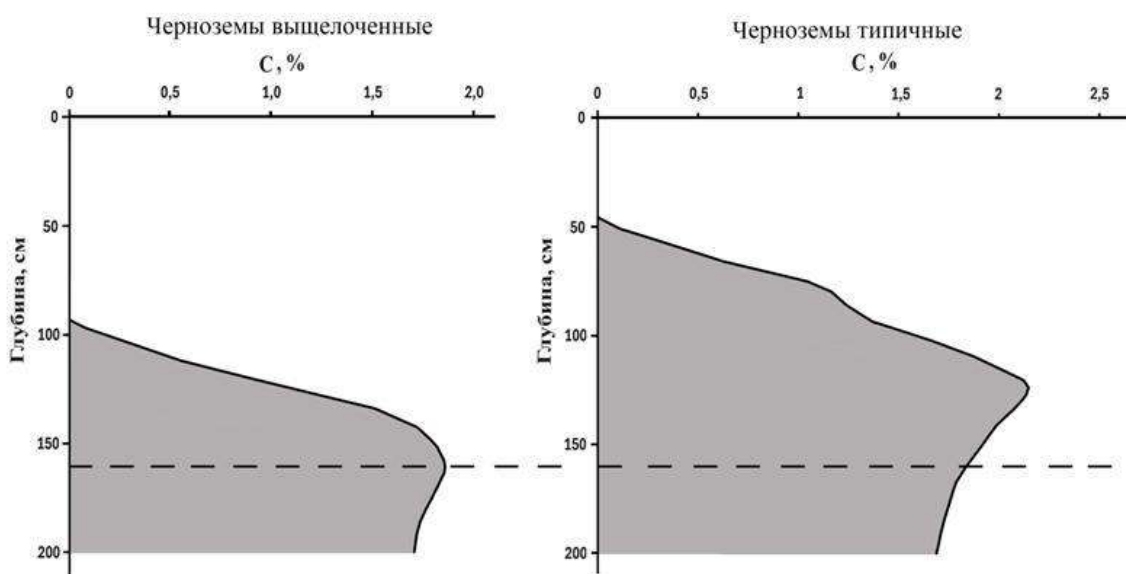


Рис. 6. Распределение с глубиной содержания углерода карбонатов в черноземах выщелоченных и типичных (усредненные характеристики профилей, изученных в разрезах участков «Коровино», «Верхососна», «Юрьевка»). Пунктирной линией показана глубина максимума содержания карбонатов в черноземах выщелоченных
Fig. 6. Distribution of carbonates in leached and typical chernozems, with the depth of carbon content (mean characteristics of soil profiles studied in key plots “Korovino”, “Rozhdestvenka”, “Verkhososna”, “Yurievka”). The dotted line shows the depth of the maximum carbon content in leached chernozems

Таблица 3
Table 3

Запасы углерода карбонатов (т/га) в профилях черноземов выщелоченных и типичных
на трех ключевых участках исследования
Carbonate carbon stocks (t/ha) in the profiles of leached and typical chernozems at the three key sites

Слой, см	Черноземы выщелоченные										
	К-4	К-5	К-6	В-1	В-2	В-3	Ю-1	Lim	$X \pm \delta_X$	δ	V, %
0–50	0	0	0	0	0	0	0	0	0 ± 0	0	0
50–100	0	0	0	0	0	9,6	0	0–9,6	$1,4 \pm 1,4$	3,63	259,2
100–150	114,4	51,1	101,2	54,2	71,5	99,1	92,3	51,1–114,4	$83,4 \pm 9,3$	24,63	29,5
150–200	126,0	88,2	199,8	122,7	136,3	99,1	162,1	88,2–199,8	$133,4 \pm 14,3$	37,92	28,4
0–200	240,4	139,3	301,0	176,9	207,8	207,8	254,4	139,3–254,4	$218,2 \pm 20$	52,92	24,2
Слой, см	Черноземы типичные										
	К-1	К-2	К-3	В-4	В-5	Ю-2	Lim	$X \pm \delta_X$	δ	V, %	
0–50	0	0	0	0	0	9,1	0–9,1	$1,5 \pm 1,5$	3,71	247,3	
50–100	32,5	86,8	31,7	4,9	126,4	50,7	4,9–126,4	$55,5 \pm 18,0$	44,01	79,3	
100–150	111,6	129,4	98,3	164,9	164,6	123,0	98,3–164,9	$132,0 \pm 11,2$	27,51	20,8	
150–200	64,6	124,8	97,7	176,2	143,9	172,8	64,6–176,2	$130,0 \pm 17,8$	43,60	33,5	
0–200	208,7	341,0	227,7	346,0	434,9	355,6	208,7–434,9	$319,0 \pm 34,9$	85,42	26,8	

Примечание: К – черноземы участка «Коровино», В – черноземы участка «Верхососна», Ю – черноземы участка «Юрьевка». Цифрами указаны номера почвенных разрезов на каждом участке. Обозначения статистических показателей такие же, как в табл. 2.

Анализ близко расположенных (в 10–25 м друг от друга) профилей черноземов выщелоченных и типичных на участках «Коровино», «Верхососна», «Юрьевка» позволяет предположить существование исходной (до начала формирования черноземов) литогенной дифференциации верхней 2-метровой толщи почвообразующих пород по содержанию и запасам карбонатов. Характер растительного покрова, представленного разнотравно-злаковыми ассоциациями, идентичен для ареалов двух рассматриваемых подтипов черноземов.

Мнение о приуроченности черноземов выщелоченных к суффозионным понижениям микрорельефа, аккумулирующим дополнительную влагу для выщелачивания карбонатов, как на это указывают некоторые авторы [Афанасьева, 1966; Ахтырцев, Соловиченко, 1984; Lozbenev et al., 2021], справедливо не для всех участков лугово-степных ландшафтов, т.к. в нашем исследовании ареалы выщелоченных черноземов, в большинстве случаев были обнаружены на абсолютно ровных водораздельных поверхностях. Однако даже, если предположить приуроченность черноземов выщелоченных к ранее существовавшим микрозападинам, которые со временем были выровнены естественными процессами (например, зоотурбациями), труднообъяснимым кажется результат произошедшего очень значительного выщелачивания от карбонатов этих участков: среднестатистический 2-метровый профиль черноземов выщелоченных содержит 218 т/га углерода карбонатов, а профиль черноземов типичных такой же мощности – 319 т/га углерода карбонатов (см. табл. 3). Если учесть, что, согласно палеопочвенным и палеогеографическим реконструкциям, первая половина голоцена на территории Центральной лесостепи характеризовалась более засушливым климатом, чем в наше время [Серебрянная, 1992; Александровский, Александровская, 2005; Lukanina et al., 2022], установленные различия по запасам карбонатов в парах близко расположенных черноземов выщелоченных и типичных с почвенно-эволюционной точки зрения становятся еще менее объяснимыми.

Для более детального пространственного анализа радиальной (внутрипрофильной) и латеральной (площадной) дифференциации содержания углерода карбонатов в почвенном покрове, характеризующимся наличием комбинаций, состоящих из выщелоченных и типичных черноземов, авторы статьи провели специальное исследование на участке картографирования «Верхососна» (рис. 7, 8), которое заключалось в определении профильного распределения содержания карбонатов во всех 25 точках бурения.

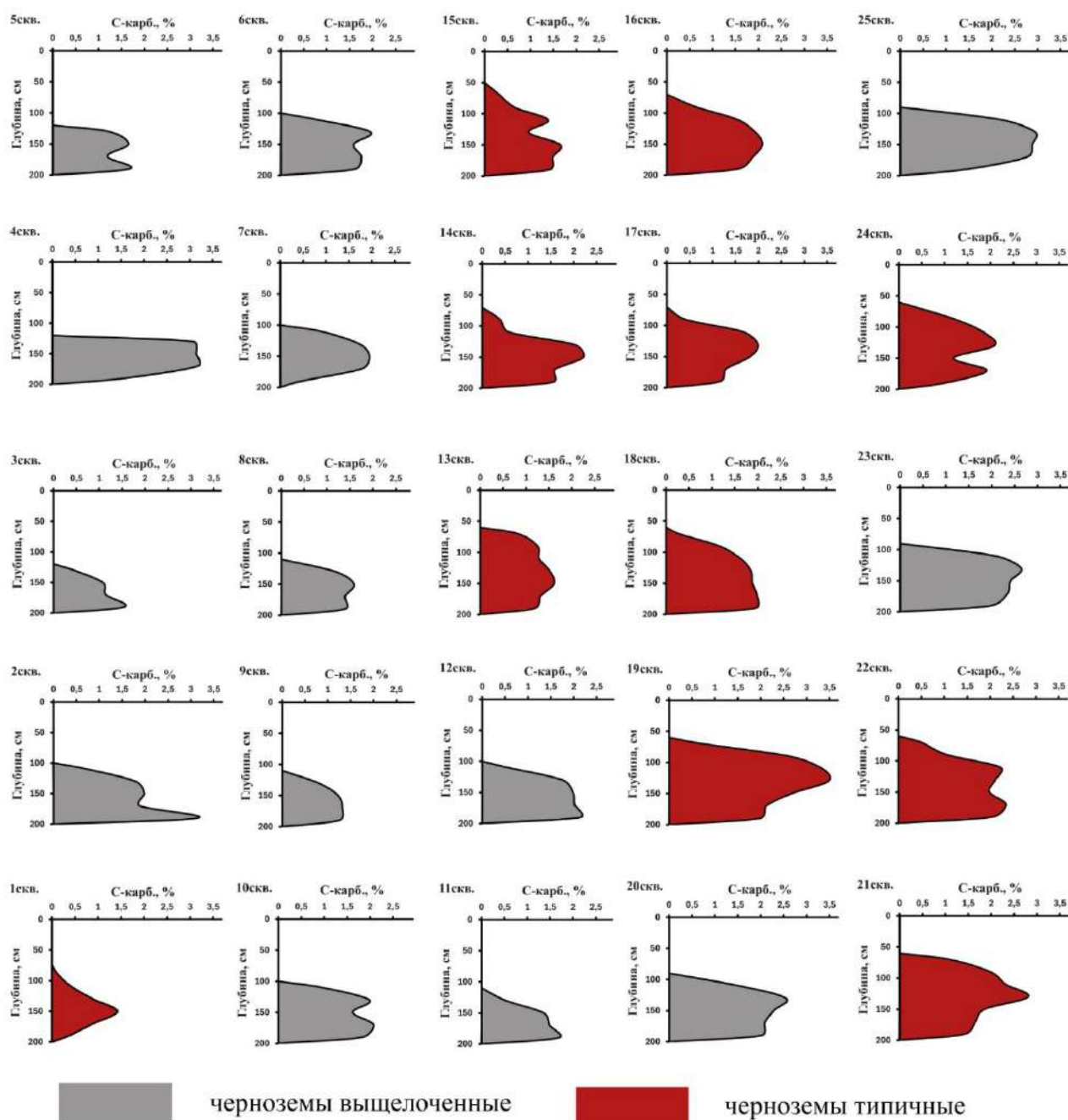


Рис. 7. Радиальное распределение содержания углерода карбонатов в профилях черноземов, изученных на участке «Верхососна». Точки исследования соответствуют своему местоположению в местах бурения почвенных скважин. Юг – внизу, север –верху

Fig. 7. Radial distribution of carbonate carbon content in chernozems profiles studied at the “Verkhososna” site. The study points correspond to their locations at the borehole drilling sites. The South is below, The North is above

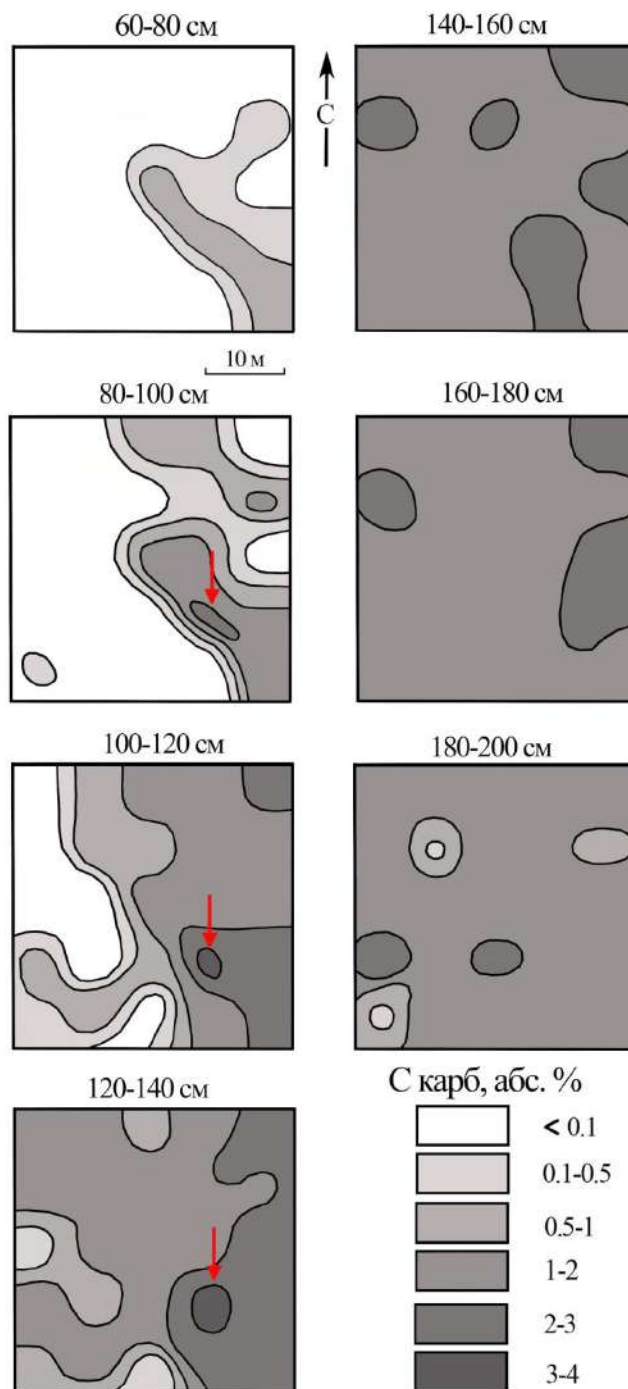


Рис. 8. Латеральное распределение содержания углерода карбонатов на разных глубинах почвенных профилей участка «Верхососна». Стрелкой показана область максимальной концентрации карбонатов, не поддающаяся исчерпывающему объяснению с точки зрения процессов современного почвообразования

Fig. 8. Lateral distribution of carbonate carbon content at different depths in the soil profiles of the “Verkhososna” site. The arrow shows the area of maximum carbonate concentration, which cannot be fully explained in terms of modern soil formation processes

Как видно на рис. 7, профильное распределение углерода карбонатов, как для черноземов выщелоченных, так и для черноземов типичных, не подчиняется какой-либо одной закономерности кроме выявляемых одного или двух максимумов содержания карбонатов, расположенных, главным образом, в слое 100–150 см почвенных профилей (см. рис. 7).

Своеобразие внутрипрофильного распределения углерода карбонатов в каждом из 25 изученных профилей на сравнительно небольшом пространстве (квадрат со стороной 30 м) и в пределах однородного рельефа (абсолютно ровная водораздельная поверхность) позволяет предположить специфическое формирование карбонатных профилей черноземов в условиях исходных различий карбонатно-литогенной матрицы, которая, по мнению некоторых исследователей, могла быть образована позднеплейстоценовыми процессами литогенеза и отразилась на формировании, по крайней мере, некоторых ареалов черноземов выщелоченных [Лебедева, Овечкин, 1988].

Анализ латеральной дифференциации содержания карбонатов в почвах на участке «Верхососна» (см. рис. 8) дополняет результаты рассмотрения радиальной дифференциации данного показателя (см. рис. 7). По мере увеличения глубины почвенных слоев, карбонаты первоначально появляются в восточной зоне участка, где присутствуют черноземы типичные, и эта зона с более высоким содержанием карбонатов отчетливо прослеживается в слое 60–180 см почв (см. рис. 8). В данной зоне, в слое 80–140 см отмечается локальная область особенно высокого содержания карбонатов (на рис. 8 показана стрелкой), происхождение которой сложнее объяснить с почвенной точки зрения и более логично искать объяснение с позиции литогенной неоднородности почвообразующих пород.

Заключение

Детальное картографирование автоморфных эталонно значимых фрагментов почвенного покрова на территории старых выгонов и сенокосов в лесостепной части юга Среднерусской возвышенности показало присутствие в структуре почвенного покрова комбинаций, состоящих из типичных и выщелоченных черноземов. Ареалы черноземов выщелоченных, как правило, встречаются вкраплениями среди главного фона, представленного черноземами типичными. На планах трех участков ареалы выщелоченных черноземов имеют округлую, овальную и вытянутую форму со средней площадью 37 м². В единичном случае был выявлен ареал чернозема выщелоченного площадью более 450 м². Ширина зоны перехода между ареалами типичных и выщелоченных черноземов (по изменению глубины вскипания) оценивается средней величиной 2,4±0,1 м. Подобные зоны перехода (из одного ареала почв в другой) рекомендуется показывать на детальных почвенных картах. На участках близкого расположения (10–25 м) друг к другу профилей черноземов выщелоченных и типичных сравнительный анализ показал более глубокое залегание максимума углерода карбонатов в черноземах выщелоченных (160 см) по сравнению с этим признаком в профилях черноземов типичных (125 см). Черноземы выщелоченные в слое 0–200 см содержат на 100 т/га углерода карбонатов меньше, чем черноземы типичные. Пространственное распределение двух рассматриваемых подтипов черноземов можно объяснить не только приуроченностью черноземов выщелоченных к микрозападинам (большинство изученных нами профилей приурочены к абсолютно ровным поверхностям водоразделов), но также исходной литологической неоднородностью содержания в почвообразующей породе карбонатов. Малокарбонатные почвообразующие породы могли стать триггерами формирования в позднем голоцене ареалов черноземов выщелоченных в структуре почвенного покрова лугово-степных ландшафтов лесостепи.

Список литературы

- Александровский А.Л., Александровская Е.И. 2005. Эволюция почв и географическая среда. М., Наука, 223 с.
- Афанасьева Е.А. 1966. Черноземы Среднерусской возвышенности. М., Наука, 224 с.
- Ахтырцев Б.П., Соловиченко В.Д. 1984. Почвенный покров Белгородской области: структура, районирование и рациональное использование. Воронеж, Издательство Воронежского университета, 267 с.
- Ахтырцев Б.П., Ахтырцев А.Б. 1993. Почвенный покров Среднерусского Черноземья. Воронеж, Издательство Воронежского университета, 215 с.
- Геннадиев А.Н., Жидкин А.П., Олсон К.Р., Качинский В.Л. 2010. Эрозия и потери органического углерода при распашке склонов. Вестник Московского университета. Серия 5: География, 6: 32–38.
- Грошева О.А. 2020. Эволюционное развитие черноземов и степей Евразии в исторической ретроспективе. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 12: 31–35. <https://doi.org/10.17513/mjpf.13156>
- Докучаев В.В. 1883. Русский чернозем. СПб., Типография Деклеропа и Евдокимова, 384 с.
- Жидкин А.П., Комиссаров М.А., Шамшурина Е.Н., Мищенко А.В. 2023. Эрозия почв на Среднерусской возвышенности (обзор). Почвоведение, 2: 259–272. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22600901>.
- Классификация и диагностика почв СССР. 1977. М., Колос, 221 с.
- Козлов Д.Н., Жидкин А.П., Лозбенев Н.И. 2019. Цифровое картографирование эрозионных структур почвенного покрова на основе имитационной модели смыва (северная лесостепь Среднерусской возвышенности). Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева, 100: 5–35. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-5-35>.
- Коковина Т.П., Лебедева И.И. 1986. Современные гидротермические режимы и генетико-географические особенности черноземов ЕТС. В кн.: Успехи почвоведения. М., Наука: 148–153.
- Лебедева И.И. 2002. Гидрологические профили миграционно-карбонатных (типичных) черноземов и агрочерноземов. Почвоведение, 10: 1214–1223.
- Лебедева И.И., Овечкин С.В. 1988. Полиморфизм черноземов выщелоченных и СПП лесостепи ЦЧО. Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева, 46: 40–41.
- Лукин С.В. 2023. Агроэкологическое состояние почв Центрально-Черноземного района. Белгород, КОНСТАНТА, 372 с.
- Новых Л.Л., Чендев Ю.Г., Нарожная А.Г. 2025. Эталонное качество почвенной структуры нативных черноземов на юге Среднерусской возвышенности. Региональные геосистемы, 49(4): 696–710. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2025-49-4-0-4>.
- Русаков А.В. 2012. Почвы и почвенный покров Ямской степи. СПб., Издательство Санкт-Петербургского университета, 216 с.
- Савин И.Ю. 2025. Методология крупномасштабного картографирования почв: подходы, проблемы и перспективы. Почвоведение, 10: 1243–1251. <https://doi.org/10.7868/S3034561825100011>.
- Серебрянная Т.А. 1992. Динамика границ Центральной лесостепи в голоцене. В кн.: Вековая динамика биогеоценозов. Чтения памяти академика В.Н. Сукачева. Х. М., Наука: 54–71.
- Смирнова М.А., Жидкин А.П., Лозбенев Н.И., Заздравных Е.А., Козлов Д.Н. 2020. Цифровое картографирование степени эродированности почв с использованием моделей фактор – свойство и фактор – процесс – свойство (юг Среднерусской возвышенности). Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева, 104: 158–198. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-158-198>.
- Тишков А.А. 2024. Новые подходы к сохранению степей староосвоенных черноземных регионов России. Вопросы степеведения, 1: 22–31. <https://doi.org/10.24412/2712-8628-2024-1-22-31>.
- Фридланд В.М., Белобров В.П., Дайнеко Е.К. 1969. Опыт статистического анализа морфологических свойств черноземов целинной степи. Почвоведение, 4: 12–24.
- Фридланд В.М. 1972. Структура почвенного покрова. М., Мысль, 423 с.
- Чендев Ю.Г. 2008. Эволюция лесостепных почв Среднерусской возвышенности в голоцене. М., ГЕОС, 212 с.
- Чендев Ю.Г., Хохлова О.С., Александровский А.Л. 2017. Агрогенная эволюция автоморфных

- черноземов. Почвоведение, 5: 515–531. <https://doi.org/10.7868/80032180X17050045>
- Чендев Ю.Г., Смирнова М.А., Геннадиев А.Н., Белеванцев В.Г. 2024. Нативные эталонно значимые черноземы в староосвоенной лесостепи: поиск сохранившихся ареалов и анализ свойств. Известия Русского географического общества, 156(4): 391–408. <https://doi.org/10.31857/S0869607124040107>.
- Чернова О.В., Присяжная А.А. 2024. Сохранение почвенного покрова степей на федеральных особо охраняемых природных территориях. Аридные экосистемы, 30(3(100)): 49–59.
- Щеглов Д.И. 1999. Черноземы центра Русской равнины и их эволюция под влиянием естественных и антропогенных факторов. М., Наука, 214 с.
- Chinilin A.V., Lozbenev N.I., Shilov P.M., Fil P.P., Levchenko E.A., Kozlov D.N. 2024. Synergetic Use of Bare Soil Composite Imagery and Multitemporal Vegetation Remote Sensing for Soil Mapping (A Case Study from Samara Region's Upland). Land, 13(12): 2229. <https://doi.org/10.3390/land13122229>.
- De Caires S.A., Martin C.S., Atwell M.A., Kaya F., Wuddivira G.A., Wuddivira M.N. 2025. Advancing Soil Mapping and Management Using Geostatistics and Integrated Machine Learning and Remote Sensing Techniques: A Synoptic Review. Discover Soil, 2(1): 53. <https://doi.org/10.1007/s44351-025-00053-9>.
- Khitrov N., Smirnova M., Lozbenev N., Levchenko E., Gribov V., ... Koroleva P. 2019. Soil Cover Patterns in the Forest-Steppe and Steppe Zones of the East-European Plain. Soil Science Annual, 70(3): 198–210. <https://doi.org/10.2478/ssa-2019-0018>.
- Lozbenev N., Smirnova M., Bocharnikov M., Kozlov D. 2019. Digital Mapping of Habitat for Plant Communities Based on Soil Functions: A Case Study in the Virgin Forest-Steppe of Russia. Soil Systems, 3(1): 19. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3010019>
- Lozbenev N., Yurova A., Smirnova M., Kozlov D. 2021. Incorporating Process-Based Modeling Into Digital Soil Mapping: a Case Study in the Virgin Steppe of the Central Russian Upland. Geoderma, 383(12): 114733. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114733>.
- Lukanina E., Shumilovskikh L., Novenko E. 2022. Vegetation and Fire History of the East-European Forest-Steppe Over the Last 14,800 Years: A Case Study from Zamostye, Kursk region, Russia. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 605(11): 111218. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.111218>
- Mikhailova E.A., Bryant R.B., Galbraith J.M., Wang Y., Post C.J., ... Shen Z. 2018. Pedogenic Carbonates and Radiocarbon Isotopes of Organic Carbon at Depth in the Russian Chernozem. Geosciences, 8(12): 458. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120458>.
- Pimenov V.E., Ponomarenko E.V., Chendev Y.G., Ershova E.G., Dergacheva M.I., Smirnova M.A. 2025. Rodent Burrows in Chernozems as a Paleoarchive of Vegetation Dynamics: A Case Study from the Central Chernozem Region of Russia. Geoderma Regional, 41: e00969. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2025.e00969>
- Suleymanov A., Suleymanov R., Gabbasova I., Saifullin I. 2024. Field-Scale Digital Mapping of Top- and Subsoil Chernozem Properties. Precision Agriculture, 25(3): 1636–1657. <https://doi.org/10.1007/s11119-024-10128-x>.
- Vysloužilová B., Ertlen D., Schwartz D., Šefrna L. 2016. Chernozem. From Concept to Classification: a Review. AUC Geographica, 51(1): 85–95. <https://doi.org/10.14712/23361980.2016.8>.

References

- Aleksandrovskii A.L., Aleksandrovskaya E. 2005. Evolutsiya pochv i geograficheskaya sreda [Soil Evolution and the Geographical Environment]. Moscow, Publ. Nauka, 223 p.
- Afanas'yeva E.A. 1966. Chernozemy Srednerusskoj vozvyshennosti [Chernozems of the Central Russian Upland]. Moscow, Publ. Nauka, 224 p.
- Akhtyrtev B.P., Solovichenko V.D. 1984. Pochvennyi pokrov Belgorodskoi oblasti: struktura, raiyonirovanie i ratsionalnoe ispolzovanie [Soil Cover of the Belgorod Region: Structure, Zoning and Rational Management]. Voronezh, Publ. Voronezh university, 267 p.
- Akhtyrtev B.P., Akhtyrtev A.B. 1993. Pochvennyi pokrov Tsentralnogo Chernozemya [Soil Cover of the Cenral Chernozem Region]. Voronezh, Publ. Voronezh university, 215 p.
- Gennadiyev A.N., Zhidkin A.P., Olson K.R., Kachinsky W.L. 2010. Erosion and Organic Carbon Loss from Soils During Slope Plowing. Lomonosov Geography Journal, 6: 32–38 (in Russian).

- Grosheva O.A. 2020. Evolutionary Development of Chernozems and Steppes of Eurasia in Historical Retrospective. *International journal of applied and fundamental research*, 12: 31–35 (in Russian). <https://doi.org/10.17513/mjpf.13156>
- Dokuchaev V.V. 1883. *Russkiy chernozem [Russian Chernozem]*. Saint Petersburg, Publ. Tipografiya Dekleropa i Evdokimova, 384 p.
- Zhidkin A.P., Komissarov M.A., Shamshurina E.N., Mishchenko A.V. 2023. Soil Erosion in the Central Russian Upland: A Review. *Eurasian Soil Science*, 56(2): 226–237 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S1064229322601743>.
- Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR [Classification and Diagnostics of Soils of the USSR]. 1977. Moscow, Publ. Kolos, 221 p.
- Kozlov D.N., Zhidkin A.P., Lozbenov N.I. 2019. Digital Mapping of Soil Cover Eroded Patterns on the Basis of Soil Erosion Simulation Model (Northern Forest-Steppe of the Central Russian Upland). *Dokuchaev Soil Bulletin*, 100: 5–35 (in Russian). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-5-35>.
- Kokovina T.P., Lebedeva I.I. 1986. *Sovremennye gidrotermicheskie rezhimy i genetiko-geograficheskie osobennosti chernozemov [Contemporary Hydrothermic Regimes and Genetic-Geographical Peculiarities of Chernozems in the European part of the Soviet Union]*. In: *Uspehi pochvovedeniya [Advances in Soil Science]*. Moscow, Publ. Nauka: 148–153.
- Lebedeva I.I. 2002. Hydrological profiles of Typical Chernozems and Agrochernozems with migrational forms of pedogenic carbonates. *Eurasian soil science*, 10: 1076–1084.
- Lebedeva I.I., Ovechkin S.V. 1988. Polimorfizm chernozemov vyshelochennykh i SPP lesostepi TsChO [Polimorphism of the Leached Chernozems and Structure of Soil Cover in the Forest-Steppe of the Central Chernozem Oblast]. *Dokuchaev Soil Bulletin*, 46: 40–41.
- Lukin S.V. 2023. *Agroekologicheskoe sostoznie pochv Tsentral'no-Chernozemnogo Raiona [Agroecological State of Soils in the Central Chernozem Region]*. Belgorod, Publ. KONSTANTA, 372 p.
- Novykh L.L., Chendev Yu.G., Narozhnaya A.G. 2025. Reference Quality of the Soil Structure of Native Chernozems in the South of the Central Russian Upland. *Regional geosystems*, 49(4): 696–710 (in Russian). <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2025-49-4-0-4>.
- Rusakov A.V. 2012. *Pochvy i pochvennyy pokrov Yamskoy stepi [Soils and Soil Cover of the Yamskaya Steppe]*. Sankt-Petersburg, Publ. Sankt-Petersburg university, 216 p.
- Savin I.Yu. 2025. Large-Scale Soil Mapping Methodology: Approaches, Challenges, and Prospects. *Eurasian Soil Science*, 58(10): 1–9 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S1064229325600897>.
- Serebryannaya T.A. 1992. *Dinamika granits Tsentralnoy lesostepi v golotsene [Dynamics of the Boundaries of Central Forest-Steppe in the Holocene]*. In: *Vekovaya dinamika biogeotsenozov. Chteniya pamyati akademika V.N. Sukacheva [Conference in Memoriam of Academician V.N. Sukachev "Century Dynamics of Biogeocenoses"]*. Moscow, Publ. Nauka: 54–71.
- Smirnova M.A., Zhidkin A.P., Lozbenov N.I., Zazdravnykh E.A., Kozlov D.N. 2020. Digital Mapping of Erosion Degree of Soils Using the Factor – Property and Factor – Process – Property Models (the South of the Central Russian Upland). *Dokuchaev Soil Bulletin*, 104: 158–198 (in Russian). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-158-198>.
- Tishkov A.A. 2024. New Approaches to the Conservation of Steppes in the Old-Developed Chernozem Regions of Russia. *Steppe Science*, 1: 22–31 (in Russian). <https://doi.org/10.24412/2712-8628-2024-1-22-31>.
- Fridland V.M., Belobrov V.P., Daineko E.K. 1969. *Opyt statisticheskogo analiza morfologicheskikh svoystv chernozemov tselinnoi stepi [An Experience of Statistical Analysis of Morphological Properties of Virgin Steppe Chernozems]*. *Pochvovedenie*, 4: 12–24.
- Fridland V.M. 1972. *Struktura pochvennogo pokrova [The Structure of Soil Cover]*. Moscow, Publ. Mysl': 423 p.
- Chendev Yu.G. 2008. *Evolution of Forest-Steppe Soils of the Central Russian Upland in the Holocene*. Moscow, Publ. GEOS, 212 p. (in Russian).
- Chendev Yu.G., Khokhlova O.S., Alexandrovskiy A.L. 2017. Agrogenic Evolution of Automorphic Chernozems in the Forest-Steppe Zone (Belgorod Oblast). *Eurasian Soil Science*, 50(5): 499–514 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/80032180X17050045>.

- Chendev Yu.G., Smirnova M.A., Gennadiev A.N., Belevantsev V.G. 2024. Benchmark Native Chernozems in the Old-Settled Forest-Steppe: Search for Remaining Areas and Properties Analysis. *Proceedings of the Russian Geographical Society*, 156(4): 391–408 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0869607124040107>.
- Chernova O.V., Prisyazhnaya A.A. 2024. Conservation of Steppe Soil Cover in Federal Specially Protected Natural Areas. *Arid Ecosystems*, 30(3(100)): 49–59 (in Russian).
- Shcheglov D.I. 1999. Chernozemy centra Russkoy ravniny i ih evolyuciya pod vliyaniem estestvennyh i antropogennyh faktorov [Chernozems of the Center of Russian Plain and Their Evolution Under the Influence of Natural and Anthropogenic Factors]. Moscow, Publ. Nauka, 214 p.
- Chinilin A.V., Lozbenov N.I., Shilov P.M., Fil P.P., Levchenko E.A., Kozlov D.N. 2024. Synergetic Use of Bare Soil Composite Imagery and Multitemporal Vegetation Remote Sensing for Soil Mapping (A Case Study from Samara Region's Upland). *Land*, 13(12): 2229. <https://doi.org/10.3390/land13122229>.
- De Caires S.A., Martin C.S., Atwell M.A., Kaya F., Wuddivira G.A., Wuddivira M.N. 2025. Advancing Soil Mapping and Management Using Geostatistics and Integrated Machine Learning and Remote Sensing Techniques: A Synoptic Review. *Discover Soil*, 2(1): 53. <https://doi.org/10.1007/s44351-025-00053-9>.
- Khitrov N., Smirnova M., Lozbenov N., Levchenko E., Gribov V., ... Koroleva P. 2019. Soil Cover Patterns in the Forest-Steppe and Steppe Zones of the East-European Plain. *Soil Science Annual*, 70(3): 198–210. <https://doi.org/10.2478/ssa-2019-0018>.
- Lozbenov N., Smirnova M., Bocharnikov M., Kozlov D. 2019. Digital Mapping of Habitat for Plant Communities Based on Soil Functions: A Case Study in the Virgin Forest-Steppe of Russia. *Soil Systems*, 3(1): 19. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3010019>.
- Lozbenov N., Yurova A., Smirnova M., Kozlov D. 2021. Incorporating Process-Based Modeling Into Digital Soil Mapping: a Case Study in the Virgin Steppe of the Central Russian Upland. *Geoderma*, 383(12): 114733. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114733>.
- Lukanina E., Shumilovskikh L., Novenko E. 2022. Vegetation and Fire History of the East-European Forest-Steppe Over the Last 14,800 Years: A Case Study from Zamostye, Kursk region, Russia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 605(11): 111218. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.111218>.
- Mikhailova E.A., Bryant R.B., Galbraith J.M., Wang Y., Post C.J., ... Shen Z. 2018. Pedogenic Carbonates and Radiocarbon Isotopes of Organic Carbon at Depth in the Russian Chernozem. *Geosciences*, 8(12): 458. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120458>.
- Pimenov V.E., Ponomarenko E.V., Chendev Y.G., Ershova E.G., Dergacheva M.I., Smirnova M.A. 2025. Rodent Burrows in Chernozems as a Paleoarchive of Vegetation Dynamics: A Case Study from the Central Chernozem Region of Russia. *Geoderma Regional*, 41: e00969. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2025.e00969>.
- Suleymanov A., Suleymanov R., Gabbasova I., Saifullin I. 2024. Field-Scale Digital Mapping of Top- and Subsoil Chernozem Properties. *Precision Agriculture*, 25(3): 1636–1657. <https://doi.org/10.1007/s11119-024-10128-x>.
- Vysloužilová B., Ertlen D., Schwartz D., Šefrna L. 2016. Chernozem. From Concept to Classification: a Review. *AUC Geographica*, 51(1): 85–95. <https://doi.org/10.14712/23361980.2016.8>.

*Поступила в редакцию 08.07.2026;
поступила после рецензирования 19.08.2026;
принята к публикации 02.09.2026*

*Received July 08, 2026;
Revised August 19, 2026;
Accepted September 02, 2026*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чендев Юрий Георгиевич, доктор географических наук, профессор, профессор кафедры природопользования и земельного кадастра Института наук о Земле, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Геннадиев Александр Николаевич, доктор географических наук, профессор, профессор кафедры геохимии ландшафтов и географии почв, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Смирнова Мария Андреевна, кандидат географических наук, доцент кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Талджеббини Абдульраззак, магистрант кафедры природопользования и земельного кадастра Института наук о Земле, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Юй Сяоюй, магистрант кафедры природопользования и земельного кадастра Института наук о Земле, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yury G. Chendev, Doctor Geographical Sciences, Professor, Professor of the Department of Natural Resources and Land Cadastre, Institute of Earth Sciences, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Alexander N. Gennadiev, Doctor Geographical Sciences, Professor, Professor of the Department of Environmental Geochemistry and Geography of Soils, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Maria A. Smirnova, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor at the Department of Environmental Geochemistry and Geography of Soils, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Abdulrazzaq Taljebbini, Master's student of the Department of Natural Resources and Land Cadastre, Institute of Earth Sciences, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Xiaoyu Yu, Master's student of the Department of Natural Resources and Land Cadastre, Institute of Earth Sciences, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

УДК 504.453 (470.325)
DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-3-573-590
EDN NCOTUD

Геоморфологические факторы расположения истоков рек Белгородской области

Украинский П.А., Нарожняя А.Г., Хомутовская А.Г.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85
pa.ukrainski@gmail.com, narozhnyaya_a@bsuedu.ru, khomutovskaya@gmail.com

Аннотация. Почти все реки Белгородской области начинаются на ее территории. Но география истоков рек, несмотря на их многочисленность, остается недостаточно исследованной. На распределение истоков рек по территории Белгородской области влияет рельеф, климатические и гидрогеологические особенности территории. Это исследование посвящено одному из этих факторов – рельефу. Цель работы – оценка согласованности геоморфометрических параметров с расположением истоков рек на исследуемой территории. Анализируемая выборка представляет собой истоки рек и случайным образом сгенерированные точки их отсутствия. По цифровой модели рельефа *FABDEM* были рассчитаны 22 геоморфометрических параметров. Затем были рассчитаны коэффициенты бисериальной корреляции между геоморфометрическими параметрами и наличием истоков рек. Среди полученных коэффициентов корреляции максимальное абсолютное значение равно 0,7. У 10 из 19 параметров абсолютное значение коэффициента корреляции лежит в диапазоне от 0,3 до 0,5. С наличием истоков рек сильнее всего коррелируют геоморфометрические параметры, описывающие форму поверхности (выпуклая или вогнутая), положение на склоне и расчлененность рельефа. Такие параметры рельефа как высота, уклон и экспозиция на наличие истоков реки влияют слабо. Наличие истоков рек всегда отрицательно коррелирует с положением на склоне. С индексами формы поверхности корреляция у истоков рек чаще отрицательная, а с показателями пересеченности рельефа – чаще положительная. Полученные результаты могут быть востребованы при выборе предикторов для построения моделей расположения истоков рек.

Ключевые слова: водотоки, рельеф, *FABDEM*, геоморфометрические параметры, корреляционный анализ, бинарные данные, бисериальная корреляция

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания FZWG-2025-0006.

Для цитирования: Украинский П.А., Нарожняя А.Г., Хомутовская А.Г. 2026. Геоморфометрические факторы размещения истоков рек Белгородской области. Региональные геосистемы, 50(3): 573–590. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-573-590 EDN: NCOTUD

Geomorphologic Factors of the Location of River Sources in the Belgorod Region

Pavel A. Ukrainskiy, Anastasia G. Narozhnyaya, Anna G. Khomutovskaya

Belgorod State National Research University,
85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia

E-mail: pa.ukrainski@gmail.com, narozhnyaya_a@bsuedu.ru, khomutovskaya@gmail.com

Abstract. Almost all of the rivers in the Belgorod Region originate within its territory. However, despite their abundance, the geography of these river sources remains understudied. The distribution of river

© Украинский П.А., Нарожняя А.Г., Хомутовская А.Г., 2026

sources across the region is influenced by topography, climatic conditions, and hydrogeological features. This study focuses on one of these factors – topography. The aim of the work is to quantify how geomorphometric parameters are related to the location of river sources. The analyzed sample consists of river sources and randomly generated points of absence. Twenty-two geomorphometric parameters were calculated using the *FABDEM* digital elevation model. Biserial correlation coefficients were then calculated between the geomorphometric parameters and the presence of river sources. Among the obtained correlation coefficients, the highest absolute value is 0.7. For 10 of the 19 parameters, the absolute value of the correlation coefficient lies in the range from 0.3 to 0.5. The strongest correlations with the presence of river sources are geomorphometric parameters describing surface shape (convex or concave), position on a slope, and relief ruggedness. Relief parameters such as elevation, slope, and aspect have a weak influence on the presence of river sources. The presence of river sources is always negatively correlated with position on a slope. The correlation with surface convexity is often negative, while that with ruggedness is often positive. The obtained results can be used in selecting predictors for constructing river source location models.

Keywords: watercourses, relief, *FABDEM*, geomorphometric parameters, correlation analysis, binary data, biserial correlation

Acknowledgements: This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of State Assignment No. FZWG-2025-0006.

For citation: Ukrainskiy P.A., Narozhnyaya A.G., Khomutovskaya A.G. 2026. Geomorphometric Factors of the Location of River Sources in the Belgorod Region. *Regional Geosystems*, 50(3): 573–590 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-573-590 EDN: HCOTUD

Введение

Примечательной способностью Белгородской области является то, что почти все реки начинаются в ее границах. Исключение составляют р. Оскол, р. Убля и одиннадцать малых рек [Лисецкий и др., 2015]. Такая особенность обусловлена рельефом области, а именно ее положением на Среднерусской возвышенности.

Для территории Белгородской области существует ряд работ, посвященных изучению густоты речной сети [Дмитриева, Фолимонова, 2016; Нарожная, 2023; Украинский, Нарожная, 2025] и ее изменению в историческом прошлом [Чендев, Гончаров, 2000; Белеванцев, 2013; Кузьменко и др., 2013; Петин и др., 2015; Шевченко, 2019]. Во всех этих работах объектом исследования выступают водотоки – русла рек и ручьев. А вот истоки рек как отдельный объект исследования для Белгородской области до сих пор не рассматривались. Они частично попадали в поле зрения исследователей в контексте состояния родников. Но в таких работах уделялось внимание преимущественно качеству воды в родниках, их дебиту, эстетической привлекательности и рекреационному использованию [Петин, Новых, 2009; Новых и др., 2022; Раевская, 2023]. А вот закономерности размещения истоков рек и связь их с ландшафтными факторами не изучались.

На положение истоков рек влияет совокупность разнородных факторов. Прежде всего, это рельеф местности, характеристики климата, геологические и гидрогеологические характеристики территории. Влияние этих факторов имеет сложный и комплексный характер, а потому каждый из них заслуживает отдельного и пристального изучения. Начинать такое изучение следует с рельефа, так как именно по этому фактору благодаря современным цифровым моделям рельефа (ЦМР) имеются наиболее полные, точные и детальные пространственные данные [Florinsky, 2025].

Целью работы являлась количественная оценка согласованности характеристик рельефа (геоморфометрических параметров) с расположением истоков рек Белгородской области. В ходе исследования рассчитаны корреляции между наличием истоков рек и

геоморфометрическими параметрами. Выполнено сравнение различных групп геоморфометрических параметров по силе корреляции с наличием истоков рек. Отдельное внимание уделено изучению различий влияния геоморфометрических параметров на локальном и субрегиональном уровне.

Объекты и методы исследования

Работа состояла из трех этапов. На первом этапе выполнен сбор сведений о расположении истоков рек. На втором этапе проведен сбор сведений о рельефе. На третьем этапе осуществлен статистический анализ собранных данных.

Инвентаризация истоков рек проведена в программе ArcGIS 10.5. В качестве источника данных о расположении истоков рек использованы топографические карты масштаба 1 : 100 000 [Топографические..., 2026], по которым отвекторизованы все реки Белгородской области [Украинский, Нарожная, 2025]. В таблицу атрибутов созданного линейного слоя рек были внесены сведения о длине рек. Затем были отобраны реки длиной с округлением до десятых свыше 3,0 км и расставлены точки их истоков. В эту выборку попали как постоянные, так и пересыхающие реки или участки рек (рис. 1).



Рис. 1. Истоки рек и случайно сгенерированные точки отсутствия истоков

Fig. 1. River sources and randomly generated points of absence of sources

Помимо сведений о локализации истоков рек для анализа необходимы сведения о местах, где истоков рек нет (точки отсутствия). Они были сгенерированы случайным образом за пределами буферной зоны в 4,5 км вокруг истоков рек (см. рис. 1). Размер буферной зоны выбран равным среднему расстоянию между истоками. Количество точек отсутствия задано равным количеству истоков. Таким образом, была получена выборка из 338 истоков и 338 точек отсутствия, которые были объединены в один точечный слой (см. рис. 1). В таблице атрибутов этого слоя создано целочисленное поле, в которое для истоков внесены значения 1, а для точек отсутствия – значения 0. В результате наличие

истоков рек было представлено в количественном выражении в виде бинарных (дихотомических) данных.

В качестве источника сведений о рельефе выбрана ЦМР *FABDEM (forest and buildings removed Copernicus DEM)* [Hawker, Neal, 2021; Hawker et al., 2022]. Исследования последних лет показывают, что *FABDEM* наиболее точная ЦМР из существующих сейчас свободно распространяемых ЦМР [Мальцев и др., 2025]. Анализ рельефа выполняли с помощью программы *SAGA* (расчет геоморфометрических параметров) [Olaya, Conrad, 2009; Passy, Théry, 2018] и частично с помощью *ArcGIS 10.5* (предварительная обработка ЦМР и извлечение зональной статистики).

Исходное пространственное разрешение используемой ЦМР составляло 30 м/пиксель. Для ускорения обработки она была понижена до 100 м/пиксель. Тайлы ЦМР, покрывающую территорию Белгородской области, были сшиты в единую мозаику и обрезаны по границам области. Далее в программе *SAGA 9.11.1* с помощью инструментов из группы *Terrain Analysis* (набора *Morphometry*) были созданы растры следующих геоморфометрических параметров (в скобках названия параметров в *SAGA* и используемые в этой статье аббревиатуры):

- абсолютная высота (*height*),
- уклон (*slope*),
- косинус экспозиции или «северность» (*northness*),
- профильная или вертикальная кривизна (*profile curvature*),
- плановая или горизонтальная кривизна (*plan curvature*),
- общая кривизна (*general curvature*),
- глубина долин (*Valley Depth – VD*),
- относительное положение на склоне (*Relative Slope Position – RSP*),
- индекс топографической позиции (*Topographic Position Index – TPI*),
- индекс морфометрической защищенности (*Morphometric Protection Index – MPI*),
- топографический индекс расчлененности (*Terrain Ruggedness Index – TRI*),
- индекс конвергенции (*Convergence Index – CI*),
- выпуклость поверхности местности (*Terrain Surface Convexity – TSC*),
- текстура поверхности местности (*Terrain Surface Texture – TST*)
- мультимасштабный индекс плоскостности дна долин (*Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness – MRVBF*),
- мультимасштабный индекс плоскостности вершин хребтов (*Multiresolution Index of the Ridge Top Flatness – MRRTF*).

При вычислении общей, плановой и профильной кривизны в настройках *SAGA*, был выбран метод, предложенный И.В. Флоринским [Florinsky, 2009]. Вычисление косинуса было проведено, чтобы вместо циркулярных данных получить непрерывные. Это обусловлено требованиями к данным, предъявляемым используемыми методами статистического анализа.

При вычислении части геоморфометрических параметров используется радиус поиска. Такие параметры называют вторичными, в отличие от первичных параметров, вычисляемых без извлечения данных в пределах радиуса поиска. К вторичным параметрам относятся индексы *TPI*, *MPI*, *TRI*, *CI*, *TSC*, *TST*. Мы использовали два варианта радиуса поиска – 1 км и 25 км. Чтобы различать индексы, построенные с разным радиусом поиска, далее по тексту к их аббревиатуре будет прибавляться цифра 1 или 25 (например, *TPI-1* и *TPI-25*). В случаях, когда имеются в виду оба варианта индекса сразу, цифра к аббревиатуре прибавляться не будет. Радиус поиска в 1 км – это расстояние, сопоставимое с длиной местного склона, т.е. склона поднимающегося от эрозионного вреза до водораздела звена эрозионной сети первого порядка. Радиус поиска в 25 км – это расстояние сопоставимое с длиной речных бассейнов 4 и 5 порядков, составляющих более 90 % бассейнов области. Индексы, построенные с радиусом поиска 1 км, показывают

различие рельефа на локальном уровне. Это же относится к параметрам, при построении которых радиус поиска не используется. Индексы, построенные с радиусом поиска 25 км, показывают различия рельефа на субрегиональном уровне. Здесь термины «локальный» и «субрегиональный» употребляются нами относительно размеров исследуемой территории. В таком смысле их употребление ближе к практике ландшафтоведения, чем к практике геоморфометрии.

Из растров геоморфометрических параметров при помощи инструмента зональной статистики были извлечены значения в истоках рек и в точках отсутствия. Затем извлеченные значения были присоединены к таблице атрибутов точечного слоя истоков рек и точек отсутствия. Эта таблица атрибутов скопирована в *Excel* и сохранена в виде csv-файла для передачи в *R* и последующего анализа.

Статистическая обработка собранных данных выполнена в среде для статистических вычислений *R* 4.1.0 [R Core Team, 2021] с использованием дополнительных пакетов *polycor* (корреляционный анализ) [Fox, 2022] и *ggplot2* (статистическая визуализация) [Wickham, 2016].

В *R* при помощи функции *polyserial* из пакета *polycor* проведен корреляционный анализ. Рассчитаны коэффициенты бисериальной корреляции, показывающие связь между дихотомической переменной (наличие или отсутствие истоков рек) и непрерывными переменными (геоморфометрические параметры). С помощью инструментов из пакета *ggplot2* выполнена статистическая визуализация результатов – созданы диаграммы размахов (боксплоты) для сравнения геоморфометрических параметров в истоках рек и в точках отсутствия.

Результаты и их обсуждение

Все рассмотренные геоморфометрические параметры для удобства интерпретации результатов корреляционного анализа можно разделить на пять групп:

- первичные базовые параметры – высота, уклон, косинус экспозиции;
- параметры, описывающие форму поверхности – общая кривизна, профильная кривизна, плановая кривизна, *CI*, *TSC*;
- параметры, описывающие положение на склоне – *TPI*, *RSP*;
- параметры, описывающие пересеченность (расчлененность) и защищенность (закрытость) рельефа – *TRI*, *MPI*, *TST*;
- параметры, описывающие принадлежности к днищам долин и вершинам водоразделов – глубина долин, *MRVBF*, *MRRTF*.

Результаты корреляционного анализа показаны в табл. 1. В этой таблице геоморфометрические параметры отсортированы в порядке убывания абсолютного значения коэффициента бисериальной корреляции. Из 22 геоморфометрических параметров статистически значимую корреляцию с наличием истоков рек имеют 19 параметров. Для трех параметров – уклона, *TPI*-25 и глубины долин, корреляция статистически значимой не является.

Из тех 19 геоморфометрических параметров, которые имеют статистически значимую корреляцию с наличием истоков рек, 12 параметров имеют положительный коэффициент бисериальной корреляции. Это *MPI*-1, *MPI*-25, *CI*-25, *TST*-1, *MRRTF*, косинус экспозиции, *TSC*-25, высота, *TST*-25, *TRI*-1, *TSC*-1, *MRVBF*. Семь имеют отрицательный коэффициент бисериальной корреляции. Это *TPI*-1, общая кривизна, *CI*-1, профильная кривизна, *RSP*, *TRI*-25, плановая кривизна. Характерно, что параметры, отрицательно коррелирующие с наличием истоков рек, имеют большую тесноту связи, чем положительно коррелирующие. Так для первых коэффициент бисериальной корреляции изменяется от –0,20 до –0,70, а для вторых от 0,11 до 0,53.

Таблица 1
Table 1

Корреляция между наличием истоков рек и геоморфометрическими параметрами
Correlation between the presence of river sources and geomorphometric parameters

Геоморфометрические параметры	Группа параметров	Коэффициент бисериальной корреляции ρ_{bs}	p-значение
<i>TPI-1</i>	Положение на склоне	–0,70	$5,08 \times 10^{-171}$
Общая кривизна, m^{-1}	Форма поверхности	–0,64	$8,46 \times 10^{-110}$
<i>CI-1</i>	Форма поверхности	–0,64	$1,27 \times 10^{-100}$
<i>MPI-1</i>	Пересеченность местности	0,53	$3,54 \times 10^{-57}$
<i>MPI-25</i>	Пересеченность местности	0,50	$6,24 \times 10^{-47}$
Профильная кривизна, m^{-1}	Форма поверхности	–0,45	$4,53 \times 10^{-28}$
<i>CI-25</i>	Форма поверхности	0,36	$4,06 \times 10^{-17}$
<i>RSP</i>	Положение на склоне	–0,35	$3,13 \times 10^{-17}$
<i>TRI-25</i>	Пересеченность местности	–0,33	$5,12 \times 10^{-14}$
<i>TST-1</i>	Пересеченность местности	0,32	$2,22 \times 10^{-13}$
<i>MRRTF</i>	Долины и водоразделы	0,27	$1,42 \times 10^{-9}$
Косинус экспозиции	Базовые первичные	0,27	$1,89 \times 10^{-9}$
<i>TSC-25</i>	Форма поверхности	0,24	$2,02 \times 10^{-6}$
Плановая кривизна, m^{-1}	Форма поверхности	–0,20	$3,83 \times 10^{-6}$
Высота, м	Базовые первичные	0,18	0,0002
<i>TST-25</i>	Пересеченность местности	0,17	0,0003
<i>TRI-1</i>	Пересеченность местности	0,16	0,001
<i>TSC-1</i>	Форма поверхности	0,12	0,01
<i>MRVFB</i>	Долины и водоразделы	0,11	0,03
Глубина долин, м	Долины и водоразделы	0,04	0,36
<i>TPI-25</i>	Положение на склоне	–0,03	0,51
Уклон, °	Базовые первичные	0,02	0,68

Качественную интерпретацию величины корреляции обычно дают по шкале Чеддока. Так очень высокая теснота связи (абсолютные значения коэффициента корреляции от 0,9 до 1,0) ни для одного из рассмотренных геоморфометрических параметров не обнаружена. Высокая теснота связи (абсолютные значения от 0,7 до 0,9) обнаружена только для *TPI-1*. Средняя теснота связи (абсолютные значения коэффициента корреляции от 0,5 до 0,7) выявлена для четырех параметров – общей кривизны, *CI-1*, *MPI-1*, *MPI-25*. Умеренная теснота связи (абсолютные значения коэффициента корреляции от 0,3 до 0,5) выявлено для пяти параметров – профильная кривизна, *CI-25*, *RSP*, *TRI-25*, *TST-1*. Среди параметров, показавших высокую, среднюю или умеренную корреляцию с наличием истоков рек, оказались параметры, описывающие положение на склоне, форму поверхности и пересеченность местности. Базовые первичные параметры и параметры, описывающие принадлежность к днищам долин или водоразделам, среди них отсутствуют.

12 (54 %) геоморфометрических параметров показали слабую корреляцию с наличием истоков рек (абсолютные значения коэффициента корреляции от 0,0 до 0,3). Среди них есть представители всех пяти групп параметров.

Обобщение коэффициентов корреляции по группам морфометрических параметров представлено в табл. 2. В среднем, наиболее сильную корреляцию показывают параметры, описывающие положение на склоне. Затем идут параметры, описывающие пересеченность рельефа, и на третьем месте – параметры, описывающие форму поверхности. В этих трех группах параметров, показывающих наиболее сильную корреляцию с наличием истоков рек, встречаются параметры, показывающие отрицательную корреляцию. А вот в двух остальных группах, встречаются параметры только с положительной корреляцией. Именно этим (физическим смыслом групп параметров) и объясняется описанный выше факт, что отрицательно коррелирующие параметры имеют большую тесноту связи с наличием рек.

Таблица 2
Table 2

Обобщение коэффициентов корреляции по группам морфометрических параметров
Generalization of correlation coefficients for groups of morphometric parameters

Группа параметров	Средний $ \rho_{bs} $	Диапазон $ \rho_{bs} $	Знак корреляции
Базовые	0,16	0,25	положительная
Положение на склоне	0,36	0,67	отрицательная
Форма поверхности	0,29	0,52	Положительная или отрицательная
Пересеченность рельефа	0,34	0,37	Положительная или отрицательная
Принадлежность к долинам и плакорам	0,14	0,23	положительная

Помимо физического смысла параметра на силу корреляции с наличием источников рек влияет также радиус поиска. Он задается при расчете *TPI*, *MPI*, *TRI*, *CI*, *TST* и *TSC*. Для четырех (*TPI*, *MPI*, *CI*, *TST*) из этих шести индексов более сильная корреляция с наличием истоков рек наблюдается при радиусе поиска 1 км. Это говорит о том, что локальное варьирование рельефа, описываемое этими параметрами, сказывается на размещении истоков рек сильнее, чем различие рельефа в масштабах бассейна. Но для двух параметров (*TRI* и *TSC*) закономерность обратная – корреляции сильнее при радиусе поиска в 25 км.

На рисунках 2–6 с помощью диаграмм размахов (боксплотов) показано, как различаются значения геоморфометрических параметров для истоков рек и для случайно сгенерированных точек отсутствия. На рис. 2 показаны различия в первичных базовых параметрах. К первичным базовым параметрам мы отнесли высоту, уклон и экспозицию склона. Базовыми мы их называем в том смысле, что они наиболее распространены в исследованиях и обязательно присутствуют в любых программных продуктах, обеспечивающих хотя бы минимальные возможности обработки ЦМР. К первичным же параметрам в геоморфометрии принято относить те, что вычисляются напрямую из пикселей ЦМР без привлечения сведений о пикселях в заданном радиусе поиска.

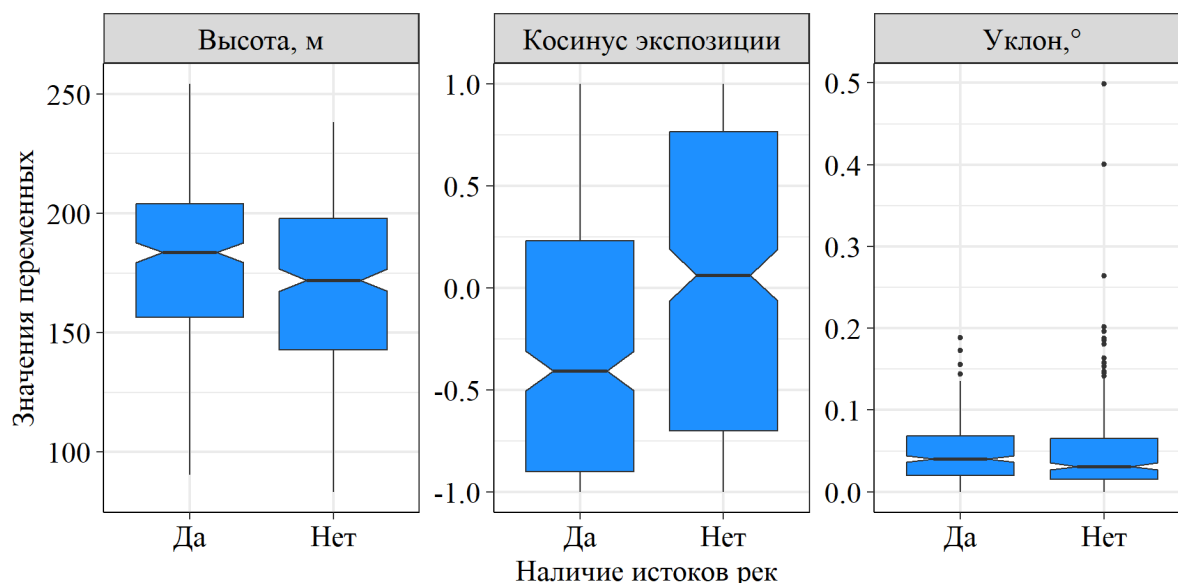


Рис. 2. Диаграммы размахов для базовых первичных геоморфометрических параметров
Fig. 2. Boxplots for basic primary geomorphometric parameters

Среди базовых первичных параметров наибольшие различия истоков рек и точек отсутствия обнаруживаются для косинуса экспозиции склона (см. рис. 2). Положительные значения этого параметра указывают на склоны северных экспозиций, а отрицательные – на склоны южных экспозиций. На территории Белгородской области истоки рек тяготеют к более южным экспозициям склонов (см. рис. 2). Для горных территорий аналогичное наблюдение было сделано в работе [Mocior et al., 2015]. Они указывают, что в Бещадах (Восточные Карпаты) наибольшая плотность родников отмечается на склонах юго-западной экспозиции. Ozdemir [2011] указывал, что на исследованном участке в турецкой провинции Конья большинство родников находится на склонах с экспозицией 112,5–292,5°.

Второй по силе корреляции среди базовых первичных параметров идет абсолютная высота. Для истоков рек она в среднем выше, чем для точек отсутствия. Истоки рек занимают в пределах речных бассейнов высокие участки местности, расположенные чаще всего там, где плакоры сменяются пологими прибалочными склонами (см. рис. 1). Интересно то, что влияние высоты обнаруживается в равнинных условиях, в то время как в литературе чаще упоминается влияние высоты на размещение родников в горах [Williams, Vondracek, 2010; Ozdemir, 2011; Pourtaghi, Pourghasemi, 2014; Mocior et al., 2015].

Уклон для истоков рек на территории Белгородской области в среднем немного больший, чем для точек отсутствия. Но как написано выше, корреляция между уклоном и наличием истоков рек статистически значимой не является. Стоит отметить, что такое наблюдение сделано на возвышенности (Среднерусской возвышенности), но все-таки в условиях равнины. Для горных территорий ряд исследований показал, что уклон влияет на встречаемость родников [Williams, Vondracek, 2010; Ozdemir, 2011; Pourtaghi, Pourghasemi, 2014; Niraula et al., 2021; Paudel, Subedi, 2025; Ghalley et al., 2026].

На рис. 3 для истоков рек и точек отсутствия показаны различия в положении на склоне. Положение точки на склоне описывается геоморфометрическими параметрами *RSP* и *TPI*. *RSP* изменяется от 0 до 1,0. Значение 0,5 указывает на середину склона. Верхняя часть склона имеет *RSP* более 0,5, нижняя – менее 0,5. Для *TPI* верхняя и нижняя граница диапазона четко не установлена, а середине склона соответствует нулевое значение. Положительные значения *TPI* соответствуют верхней части склона, а отрицательные – нижней [De Reu et al., 2013].

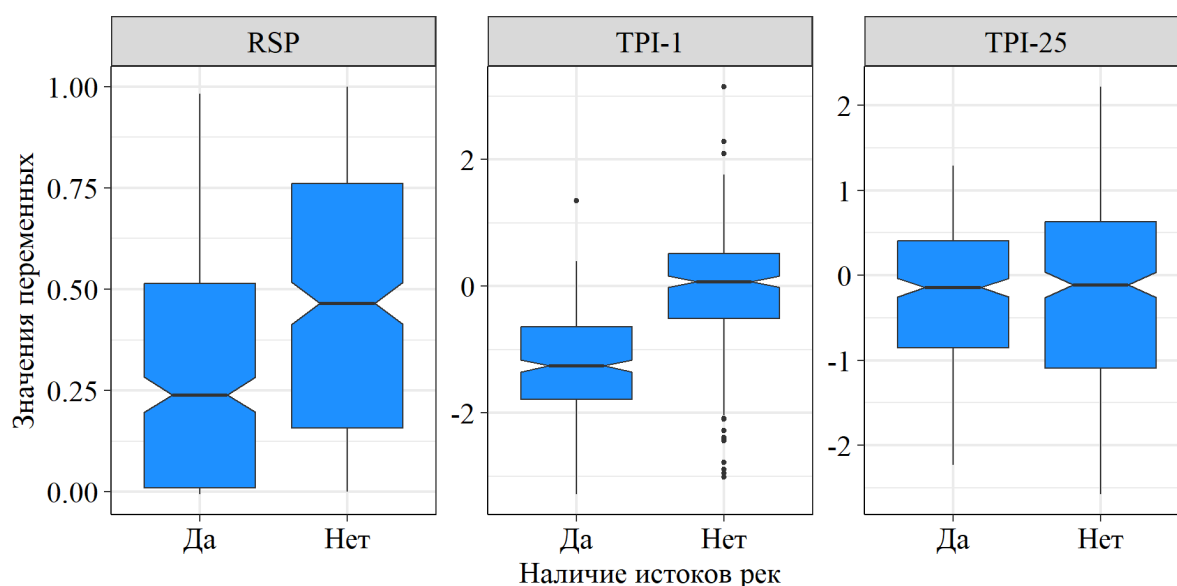


Рис. 3. Диаграммы размахов для геоморфометрических параметров, описывающих положение на склоне

Fig. 3. Boxplots for geomorphometric parameters of slope position

Истоки рек тяготеют к более нижним частям склонов. На это указывают пониженные значения *RSP*, *TPI-1* и *TPI-25* у истоков рек по сравнению с точками отсутствия. Сильнее такая закономерность выражена на локальном уровне, то есть на уровне отдельных местных склонов. Поэтому для *TPI-1* и *RSP* наблюдается более высокая корреляция с наличием истоков рек, чем для *TPI-25*. На субрегиональном уровне такая закономерность практически незаметна – для *TPI-25* разница медиан у истоков и точек отсутствия очень мала, а корреляция с наличием истоков рек статистически незначима (см. рис. 3). В исследовании [Rahmati et al., 2018], проведенном в аридной горной местности иранской провинции Северный Хорасан, также установлена значимость этих показателей для оценки значимости выхода грунтовых вод.

На рис. 4 для истоков рек и точек отсутствия показаны различия в форме поверхности. Геоморфометрические параметры позволяют количественно разделить форму поверхности на два типа – выпуклая и вогнутая поверхность. Из семи параметров, представленных на этом рисунке, три относятся к первичным параметрам – это общая, профильная и плановая кривизна. Отрицательные значения этих параметров указывают на вогнутые поверхности, а положительные – на выпуклые.

Все три показателя кривизны поверхности указывают на то, что истоки рек на локальном уровне тяготеют к вогнутым поверхностям. Аналогичные выводы о роли общей, профильной и плановой кривизны в распределении родников сделали Martinić и Čanjevac [2024] для территории Хорватии и Moghaddam и соавторами [2020] для территории иранской провинции Западный Азербайджан. Pourtaghi и Pourghasemi [2014] отдельно описывали влияние плановой кривизны на размещение родников. В условиях Белгородской области вогнутыми поверхностями, к которым тяготеют истоки рек, являются днища верхних звеньев эрозионной сети. При этом общая кривизна – второй по силе корреляции параметр из 22 рассмотренных нами.

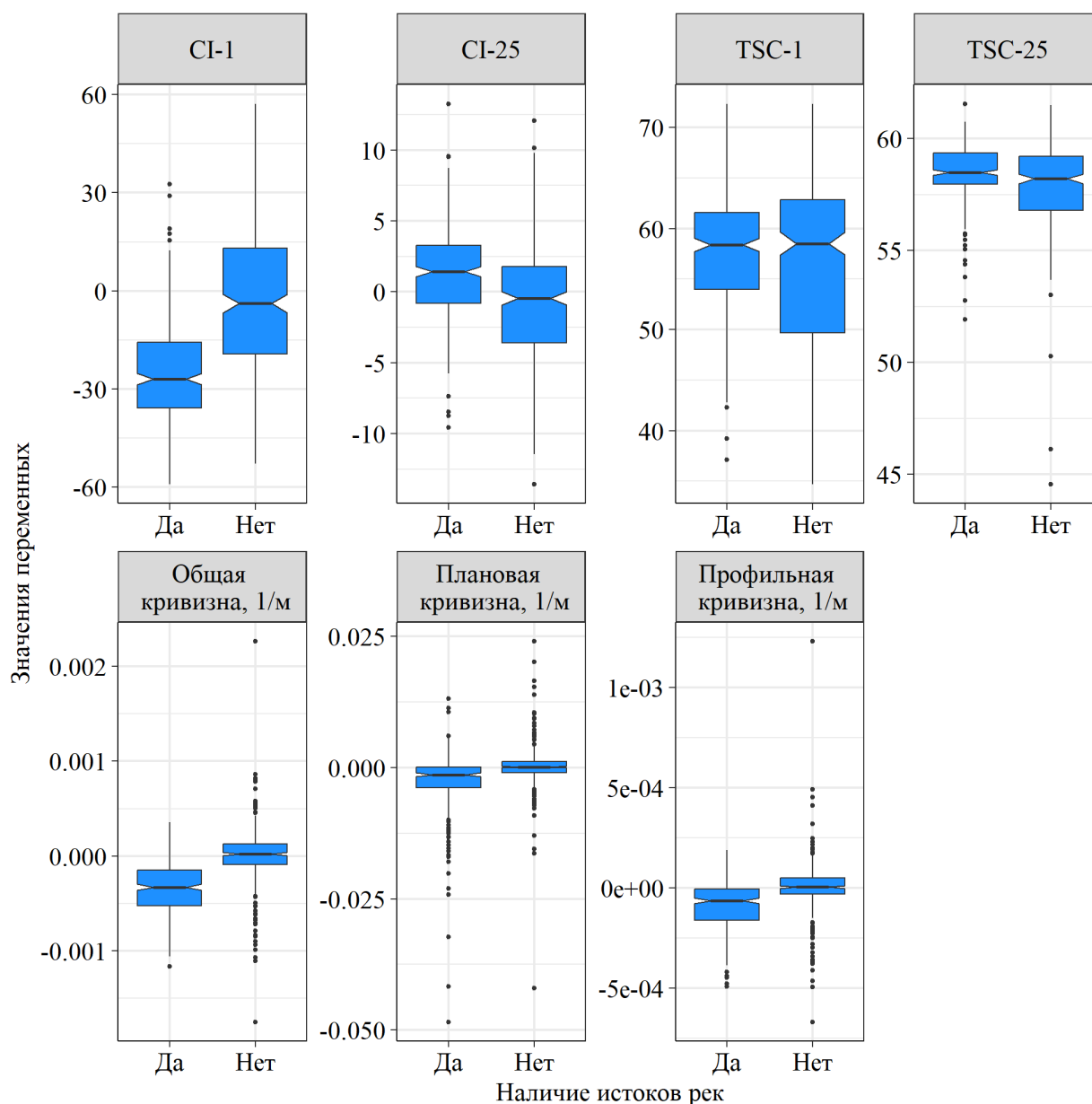


Рис. 4. Диаграммы размахов для геоморфометрических параметров, описывающих форму поверхности

Fig. 4. Boxplots for geomorphometric parameters of surface convexity

Индекс конвергенции *CI* показывает, как ведут себя склоны вокруг анализируемого пикселя ЦМР. Склоны могут сходиться (конвергировать) или расходиться (дивергировать). В первом случае поверхность вогнутая (на это указывают отрицательные значения), а во втором – выпуклая (на это указывают положительные значения). На локальном уровне для истоков рек характерен более низкий *CI*, чем для точек отсутствия. На субрегиональном уровне наоборот, точки истоков имеют более высокий *CI*, т.е. тяготеют к выпуклым поверхностям. Выпуклые формы рельефа субрегионального уровня – это пологие прибалочные склоны.

Индекс выпуклости поверхности *TSC* показывает в пределах радиуса поиска долю «выпуклых» пикселей ЦМР, то есть пикселей, возвышенных относительно центрального пикселя. Он принимает значения от 0 до 100 %. Чем ниже значение *TSC*, тем вогнутее поверхность, чем больше – тем выпуклее [Iwahashi, Pike, 2007]. На территории Белгородской области для истоков рек характерен меньший межквартильный размах *TSC*, чем у точек

отсутствия (см. рис. 4). При этом медианные значения TSC на локальном уровне слабо различаются, а на субрегиональном уровне выше, чем у точек отсутствия. Принадлежность истоков на субрегиональном уровне для TSC объясняется так же, как и для CI .

На рис. 5 для истоков рек и точек отсутствия показаны различия в геоморфометрических параметрах, описывающих пересеченность местности (расчлененность рельефа). Индекс текстуры поверхности местности TST описывает шероховатость поверхности. Чем ниже значения TST , тем ровнее поверхность. Чем выше значения TST , тем поверхность изрезаннее [Iwahashi, Pike, 2007]. Для истоков рек значения TST выше, чем для точек отсутствия. Такое соотношение наблюдается как при радиусе поиска 1 км, так и при радиусе поиска 25 км. Это указывает на приуроченность истоков рек расчлененному рельефу.

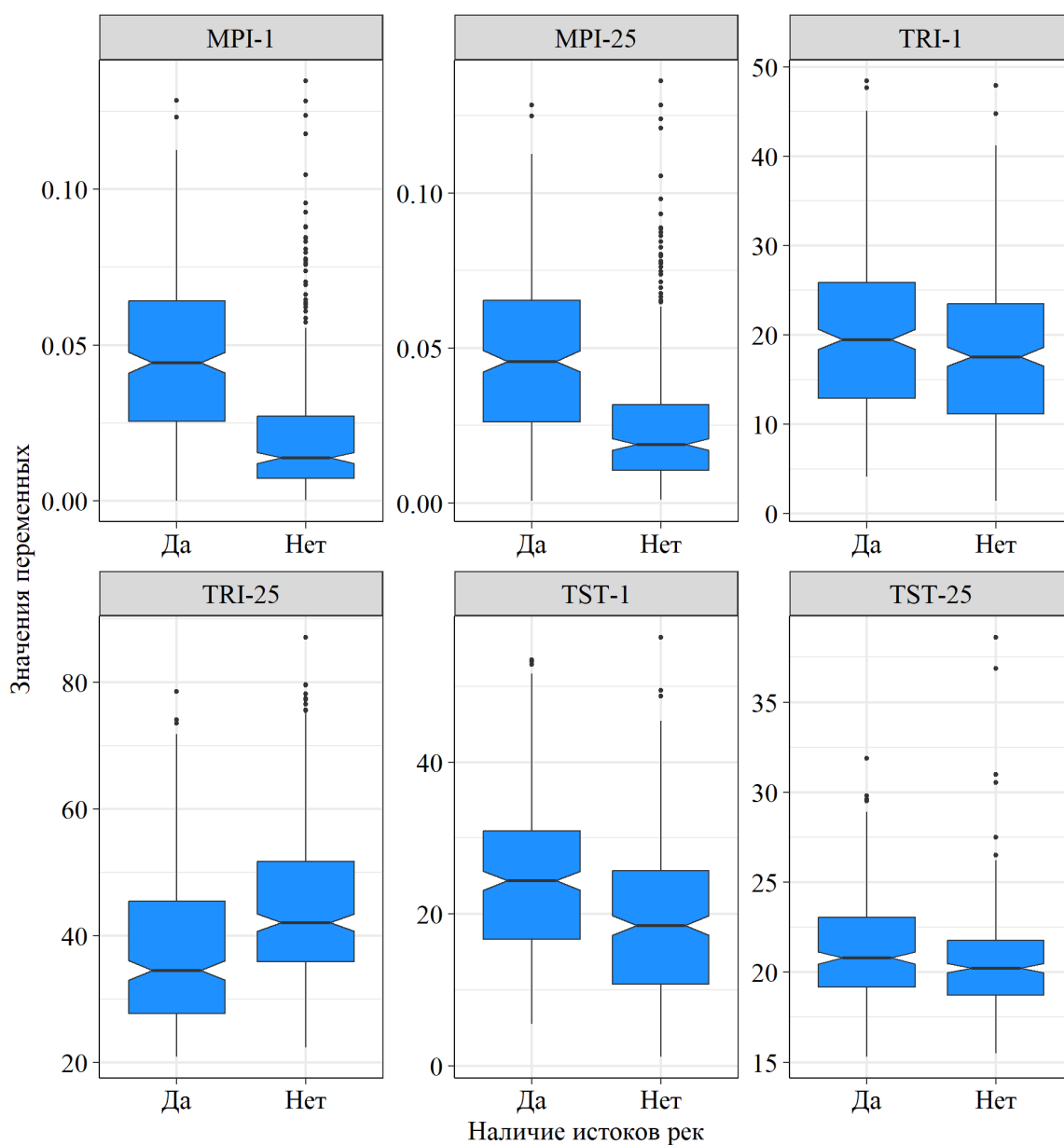


Рис. 5. Диаграммы размахов для геоморфометрических параметров, описывающих пересеченность рельефа

Fig. 5. Boxplots for geomorphometric parameters of relief ruggedness

Индекс морфометрической защищенности *MPI* усредняет максимальные вертикальные углы по разным направлениям между анализируемым пикселем и его соседями в заданном радиусе поиска. Высокие значения указывают на рельеф, закрывающий по периметру анализируемый пиксель. А низкие значения *MPI* указывают на открытый рельеф. Для истоков рек на исследуемой территории характерны более высокие значения *MPI*, чем для точек отсутствия. Это наблюдается как при радиусе поиска 1 км, так и при радиусе поиска 25 км.

Топографический индекс расчлененности *TRI* характеризует усредненный перепад высот в заданном радиусе поиска. Низкие значения *TRI* свидетельствуют о сглаженном и выровненном рельефе, высокие – о расчлененном рельефе. В отличие от *MPI* и *TST*, для исследуемой территории *TRI* при радиусах поиска 1 км и 25 км имеют обратную зависимость. Так на локальном уровне истоки рек тяготеют к участкам с высоким *TRI*, а на субрегиональном – к участкам с низким *TRI*. Т.е. на водосборах с большим вертикальным расчленением меньше вероятность нахождения истока реки, чем в речных бассейнах с меньшим расчленением, но отдельно взятые элементы эрозионной сети с большим перепадом высот имеют большую вероятность нахождения истока.

На рис. 6 для истоков рек и точек отсутствия показаны различия в геоморфометрических параметрах, описывающих принадлежность к долинам или водораздельным поверхностям. Это параметры *MRVBF*, *MRRTF* и глубина долин.

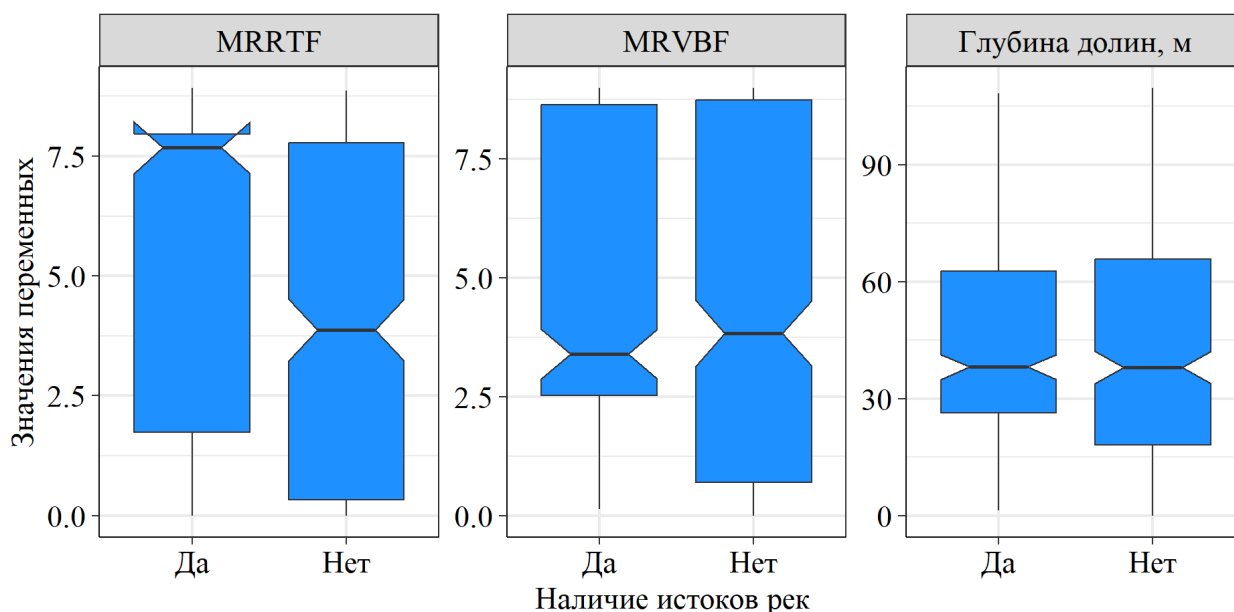


Рис. 6. Диаграммы размахов для геоморфометрических параметров, описывающих принадлежность к днищам долин или водоразделам

Fig. 6. Boxplots for geomorphometric parameters of belonging to valley bottoms or watersheds

Наиболее простой в вычислении параметр – глубина долин, не позволяет разделять истоки рек и точки отсутствия. Корреляции с ним наличия истоков рек не является статистически значимой, а медианные значения для истоков и точек отсутствия практически одинаковые. Это связано с тем, что глубина верховий речных долин сильно различается в разных речных бассейнах. Те значения, которые в одном бассейне соответствуют днищу долины, в другом бассейне будут соответствовать придолинному склону.

Индекс *MRVBF* предназначен для автоматизированного выделения днищ долин. Чем выше его значение, тем больше участок похож на выположенное дно долины [Gallant, Dowling, 2003]. Для истоков рек значения *MRVBF* в среднем больше, чем для точек отсутствия. Индекс *MRRTF* предназначен для автоматизированного выделения плоских водораздельных поверхностей. Чем выше его значение, тем больше участок похож на плоский водораздел [Gallant, Dowling, 2003]. Для истоков рек в среднем его значение ниже, чем для точек отсутствия. При этом у истоков рек межквартильный размах *MRVBF* и *MRRTF* меньше, чем у точек отсутствия. Это связано с тем, что истоки находятся обычно в верховьях эрозионной сети. А точки отсутствия при генерации случайным образом были размещены и на плакорах, и на пологих прибалочных склонах, и в днищах речных долин.

Заключение

Для территории Белгородской области характерны следующие закономерности влияния рельефа на расположение истоков рек:

1. Рельеф оказывает влияние на наличие истоков рек. При этом наблюдается теснота связи не выше средней. Для наиболее сильно влияющих параметров (*TPI-1*, *CI-1*, *MPI-1*, *MPI-25*) абсолютное значение коэффициента корреляции не превышает 0,7.

2. На наличие истоков рек сильнее всего влияют такие характеристики рельефа как форма поверхности (выпуклая или вогнутая), положение на склоне и расчлененность рельефа. Такие параметры рельефа как высота, уклон и экспозиция на наличие истоков реки влияют слабо.

3. С положением на склоне у наличия истоков рек наблюдается отрицательная бисериальная (двухрядная) корреляция для всех геоморфометрических параметров, описывающих эту особенность рельефа. С индексами формы поверхности корреляция у истоков рек чаще отрицательная, а с показателями пересеченности рельефа – чаще положительная.

4. Из параметров, описывающих положения на склоне, сильнее всего влияет индекс топографической позиции *TPI*, рассчитанный с радиусом поиска 1 км ($\rho_{bs} = -0,70$). Из параметров, описывающих форму рельефа, сильнее всего влияет общая кривизна ($\rho_{bs} = -0,64$). Из параметров, описывающих расчлененность рельефа, сильнее всего влияет морфометрический индекс защищенности *MPI-1*, рассчитанный с радиусом поиска 1 км ($\rho_{bs} = -0,53$).

5. Большая часть геоморфометрических параметров оказывает схожее влияние на локальном и субрегиональном уровне, но для отдельных параметров характер влияния противоположный. Это наблюдается для индекса конвергенции *CI* и индекса выпуклости поверхности *TSC*. Локально истоки рек тяготеют к вогнутым поверхностям овражно-балочно-долинной сети, а на субрегиональном уровне – к выпуклым поверхностям, состоящим из плакоров и продолжающих их пологих прибалочных склонов, прорезаемых эрозионной сетью.

Полученные в ходе этой работы сведения будут полезны при моделировании расположения истоков рек. Они позволяют выбирать среди множества геоморфометрических параметров оптимальные предикторы для включения в ансамбли статистических моделей.

Список источников

- Топографические карты Белгородской области. Масштаб 1:100000. Состояние местности на 1981–1990 год. Электронный ресурс. URL: <https://satmaps.info> (дата обращения 11.02.2026).
- R Core Team. 2021. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing. Electronic resource. URL: <https://www.R-project.org/> (date of access 11.02.2026)
- Hawker L., Neal J. 2021. FABDEM V1-0. Bristol, United Kingdom, University of Bristol. Electronic resource. URL: <https://data.bris.ac.uk/data/dataset/25wfy0f9ukoge2gs7a5mqpq2j7> (date of access 11.02.2026)
- Fox J. 2022. Polycor: polychoric and polyserial correlations. R package version 0.8-1. Electronic resource. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=polycor> (date of access 11.02.2026)

Список литературы

- Белеванцев В.Г. 2013. Сравнительный анализ изменения речной сети в бассейнах Ворсклы и Тихой Сосны за историческое время: Белгородская область. Современные проблемы науки и образования, 6: 941.
- Дмитриева В.А., Фолимонова Ю.С. 2016. Речная сеть и ресурсы рек Белгородской области. В кн.: Актуальные вопросы гидрологии и геоэкологии. Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию ПГНИУ, Пермь, 17–18 октября 2016. Пермь, ПГНИУ: 121–125.
- Кузьменко Я.В., Лисецкий Ф.Н., Кириленко Ж.А., Григорьева О.И. 2013. Обеспечение оптимальной водоохранной лесистости при бассейновой организации природопользования. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 15(3–2): 652–657.
- Лисецкий Ф.Н., Дегтярь А.В., Буряк Ж.А., Павлюк Я.В., Нарожная А.Г., ... Маринина О.А. 2015. Реки и водные объекты Белогорья. Белгород, КОНСТАНТА, 362 с.
- Мальцев К.А., Талипова С.Н., Магзянов И.И., Сомов А.А., Мальцева Т.С. 2025. Сравнение современных свободно распространяемых цифровых моделей рельефа и их применимости для эрозионного моделирования. Известия Русского географического общества, 157(1): 79–98. <https://doi.org/10.7868/S3034538325010067>
- Нарожная А.Г. 2023. Структура речной сети Белгородской области. В кн.: Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах. Материалы X Международной научной конференции, Белгород, 24–27 октября 2023. Белгород, НИУ «БелГУ»: 173–178.
- Новых Л.Л., Раевская М.В., Орехова Г.А. 2022. Некоторые особенности использования родников (на примере Белгородской области). Региональные геосистемы, 46(4): 624–634. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-4-624-634.3>
- Петин А.Н., Новых Л.Л. 2009. Родники Белогорья. Белгород, КОНСТАНТА, 219 с.
- Петин А.Н., Петина М.А., Лебедева М.Г., Белеванцев В.Г. 2015. Применение ГИС-технологий в историческом анализе речных систем на примере Белгородской области. ИнтерКарто. ИнтерГИС, 21: 241–246. <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2015-1-21-241-246>
- Раевская М.В. 2023. Родники как индикаторы экологического состояния окружающей среды: возможности и проблемы. Геология, география и глобальная энергия, 4(91): 86–92. https://doi.org/10.54398/20776322_2023_4_86
- Украинский П.А., Нарожная А.Г. 2025. Распределение густоты речной сети Белгородской области вдоль географических градиентов. Региональные геосистемы, 49(3): 533–547. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2025-49-3-533-547>.
- Чендев Ю.Г., Гончаров Н.Е. 2000. Деградация речной сети Белгородской области. В кн.: Экологическая безопасность и здоровье людей в XXI веке. VI Всероссийская научно-практическая конференция, Белгород, 10–12 октября 2000. Белгород, Издательский центр «Логия»: 70–73.
- Шевченко В.Н. 2019. Трансформация гидрографической сети урбанизированных территорий Белгородской области. Вектор ГеоНаук, 2(4): 22–25. <https://doi.org/10.24411/2619-0761-2019-10042>

- Florinsky I.V. 2025. Digital Terrain Analysis. London, Elsevier, Academic Press, 478 p.
<https://doi.org/10.1016/C2023-0-51092-4>
- Florinsky I.V. 2009. Computation of the Third Order Partial Derivatives from a Digital Elevation model. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(2): 213–231.
<https://doi.org/10.1080/13658810802527499>
- Gallant J.C., Dowling T.I. 2003. A Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness for Mapping Depositional Areas. *Water Resources Research*, 39(12): 1347–1359.
<https://doi.org/10.1029/2002WR001426>
- Ghalley R.K., Tantane S., Nusit K., Chidburee P., Soonthornnonda P., Tai C.H. 2026. A GIS-Based Logistic Regression Model for Groundwater Spring Potential Mapping in the Gamri Chhu basin, Bhutan. *International Journal of Geoinformatics*, 22(5): 36–58.
<https://doi.org/10.52939/ijg.v22i5.4979>
- Hawker L., Uhe P., Neal J., Paulo L. Sosa J., ... Sampson C. 2022. A 30 m Global Map of Elevation with Forests and Buildings Removed. *Environmental Research Letters*, 17(2): 024017.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
- Iwahashi J., Pike R.J. 2007: Automated Classifications of Topography from DEMs by an Unsupervised Nested-Means Algorithm and a Three-Part Geometric Signature. *Geomorphology*, 86(3): 409–440.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012>
- Martinić I., Čanjevac I. 2024. Distribution and Characteristics of Springs in Two Neighboring Areas of Different Morphogenic Relief Type – Example of SW Medvednica Mountain (Central Croatia). *Water*, 16(7): 994. <https://doi.org/10.3390/w16070994>
- Mocior E., Rzonca B., Siwek J., Plenzler J., Placzowska E., ... Zdziebko D. 2015. Determinants of the Distribution of Springs in the Upper Part of a Flysch Ridge in the Bieszczady Mountains in Southeastern Poland. *Episodes Journal of International Geoscience*, 38(1): 21–30.
<https://doi.org/10.18814/epiiugs/2015/v38i1/003>
- Moghaddam D.D., Rahmati O., Haghizadeh A., Kalantari Z. 2020. A Modeling Comparison of Groundwater Potential Mapping in a Mountain Bedrock Aquifer: QUEST, GARP, and RF Models. *Water*, 12(3): 679. <https://doi.org/10.3390/w12030679>
- Niraula R.R., Sharma S., Pokharel B.K., Paudel U. 2021. Spatial Prediction of Spring Locations in Data Poor Region of Central Himalayas. *Hydrology Research*, 52(2): 492–505.
<https://doi.org/10.2166/nh.2020.223>
- Olaya V., Conrad O. 2009. Geomorphometry in SAGA. In: *Developments in soil science*. Ed. by T. Hengl, H.I. Reuter. Amsterdam, Elsevier: 293–308. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00012-3](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00012-3)
- Ozdemir A. 2011. Using a Binary Logistic Regression Method and GIS for Evaluating and Mapping the Groundwater Spring Potential in the Sultan Mountains (Aksehir, Turkey). *Journal of Hydrology*, 405(1): 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.015>
- Passy P., Théry S. 2018. The Use of SAGA GIS Modules in QGIS. In: *QGIS and Generic Tools*. Ed. by N. Baghdadi, C. Mallet, M. Zribi. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, Inc.: 107–149.
<https://doi.org/10.1002/9781119457091.ch4>
- Paudel M., Subedi D.S. 2025. Spatial Distribution of Spring Water Resources: a Study of Waling municipality, Nepal. *The Himalayan Geographers*, 16(1): 83–94.
<https://doi.org/10.3126/thg.v16i1.92614>
- Pourtaghi Z.S., Pourghasemi H.R. 2014. GIS-Based Groundwater Spring Potential Assessment and Mapping in the Birjand Township, Southern Khorasan Province, Iran. *Hydrogeology Journal*, 22(3): 643–662. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1089-6>
- Rahmati O., Naghibi S.A., Shahabi H., Bui D.T., Pradhan B., ... Melesse A.M. 2018. Groundwater Spring Potential Modelling: Comprising the Capability and Robustness of Three Different Modeling Approaches. *Journal of Hydrology*, 565: 248–261.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.027>
- De Reu J., Bourgeois J., Bats M., Zwertvaegher A., Gelorini V., ... Crombé P. 2013. Application of the Topographic Position Index to Heterogeneous Landscapes. *Geomorphology*, 186(15): 39–49.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.015>
- Wickham H. 2016. *Ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis* (2nd Edition). New York, Springer-Verlag, 260 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>

Williams M.A., Vondracek B. 2010. Spring Distributions and Relationships with Land Cover and Hydrogeologic Strata in a Karst Landscape in Winona County, Minnesota, USA. *Carbonates and Evaporites*, 25(4): 333–347. <https://doi.org/10.1007/s13146-010-0037-y>

References

- Belevantsev V.G. 2013. The Comparative Analysis of the River Network Change in the Basins of Vorskla and Tikhaya Sosna Rivers for Historical Time: Belgorod Oblast. *Modern Problems of Science and Education*, 6: 941 (in Russian).
- Dmitrieva V.A., Folimonova Yu.S. 2016. River Net and Water Resources of Rivers at Belgorod Oblast. In: *Current Issues in Hydrology and Geocology. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 100th Anniversary of PSNRU*, Perm, 17–18 October 2016. Perm, Publ. PSNRU: 121–125 (in Russian).
- Kuzmenko Ya.V., Lisetskiy F.N., Kirilenko Zh.A., Grigorieva O.I. 2013. Providing the Optimum Water Protection Forests Amount at Basin Organization of Nature Management. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 15(3–2): 652–657 (in Russian).
- Lisetskiy F.N., Degtyar' A.V., Buryak Zh.A., Pavlyuk Ya.V., Narozhnyaya A.G., ... Marinina O.A. 2015. *Reki i vodnye ob'ekty Belgor'ya* [Rivers and Water Bodies of Belogorye]. Belgorod, Publ. CONSTANTA, 362 p.
- Maltsev K.A., Talipova S.N., Magzyanov I.I., Somov A.A., Maltseva T.S. 2025. Accuracy Analysis of New Freely Available Digital Terrain Models in the European Territory of Russia. *Proceedings of the Russian Geographical Society*, 157(1): 79–98 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S3034538325010067>
- Narozhnyaya A.G. 2023. *Struktura rechnoy seti Belgorodskoy oblasti* [Structure of the River Network of the Belgorod Region]. In: *Problemy prirodopol'zovaniya i ekologicheskaya situatsiya v Evropeyskoy Rossii i sopredel'nykh stranakh* [Problems of Nature Management and the Ecological Situation in European Russia and Neighboring Countries]. *Proceedings of the X International Scientific Conference*, Belgorod, 24–27 October 2023. Belgorod, Publ. BelSU: 173–178.
- Novykh L.L., Raevskaya M.V., Orekhova G.A. 2022. Some Types of Spring Use (Belgorod Region). *Regional Geosystems*, 46 (4): 624–634 (in Russian). <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-4-624-634>
- Petin A.N., Novykh L.L. 2009. *Rodniki Belgor'ya* [Springs of Belogorye]. Belgorod, Publ. CONSTANTA, 219 p.
- Petin A.N., Petina M.A., Lebedeva M.G., Belevantsev V.G. 2015. Application of GIS Technologies in Historical Analysis of River Systems on an Example Belgorod Region. *InterCarto. InterGIS*, 21: 241–246 (in Russian). <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2015-1-21-241-246>
- Raevskaya M.V. 2023. Springs as Environmental Indicators: Opportunities and Challenges. *Geology, geography and global energy*, 4(91): 86–92 (in Russian). https://doi.org/10.54398/20776322_2023_4_86
- Ukrainsky P.A., Narozhnyaya A.G. 2025. Distribution of River Network Density Along Geographical Gradients in the Belgorod Region. *Regional Geosystems*, 49(3): 533–547 (in Russian). <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2025-49-3-533-547>
- Chendev Yu.G., Goncharov N.E. 2000. Degradatsiya rechnoy seti Belgorodskoy oblasti [Degradation of the River Network of the Belgorod Region]. In: *Ekologicheskaya bezopasnost' i zdorov'e lyudey v XXI veke* [Environmental Safety and Human Health in the 21st Century]. VI All-Russian Scientific and Practical Conference, Belgorod, 10–12 October 2000. Belgorod, Publ. Logia: 70–73.
- Shevchenko V.N. 2019. Transformation of a Hydrographic Network of Urbanized Territories of the Belgorod Region. *Vektor GeoNauk*, 2(4): 22–25 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/2619-0761-2019-10042>
- Florinsky I.V. 2025. *Digital Terrain Analysis*. London, Elsevier, Academic Press, 478 p. <https://doi.org/10.1016/C2023-0-51092-4>
- Florinsky I.V. 2009. Computation of the Third Order Partial Derivatives from a Digital Elevation model. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(2): 213–231. <https://doi.org/10.1080/13658810802527499>
- Gallant J.C., Dowling T.I. 2003. A Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness for Mapping Depositional Areas. *Water Resources Research*, 39(12): 1347–1359. <https://doi.org/10.1029/2002WR001426>

- Ghalley R.K., Tantane S., Nusit K., Chidburee P., Soonthornnonda P., Tai C.H. 2026. A GIS-Based Logistic Regression Model for Groundwater Spring Potential Mapping in the Gamri Chhu basin, Bhutan. *International Journal of Geoinformatics*, 22(5): 36–58. <https://doi.org/10.52939/ijg.v22i5.4979>
- Hawker L., Uhe P., Neal J., Paulo L. Sosa J., ... Sampson C. 2022. A 30 m Global Map of Elevation with Forests and Buildings Removed. *Environmental Research Letters*, 17(2): 024017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>.
- Iwahashi J., Pike R.J. 2007: Automated Classifications of Topography from DEMs by an Unsupervised Nested-Means Algorithm and a Three-Part Geometric Signature. *Geomorphology*, 86(3): 409–440. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012>.
- Martinić I., Čanjevac I. 2024. Distribution and Characteristics of Springs in Two Neighboring Areas of Different Morphogenic Relief Type – Example of SW Medvednica Mountain (Central Croatia). *Water*, 16(7): 994. <https://doi.org/10.3390/w16070994>
- Mocior E., Rzonca B., Siwek J., Plenzler J., Placzowska E., ... Zdziebko D. 2015. Determinants of the Distribution of Springs in the Upper Part of a Flysch Ridge in the Bieszczady Mountains in Southeastern Poland. *Episodes Journal of International Geoscience*, 38(1): 21–30. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2015/v38i1/003>
- Moghaddam D.D., Rahmati O., Haghizadeh A., Kalantari Z. 2020. A Modeling Comparison of Groundwater Potential Mapping in a Mountain Bedrock Aquifer: QUEST, GARP, and RF Models. *Water*, 12(3): 679. <https://doi.org/10.3390/w12030679>
- Niraula R.R., Sharma S., Pokharel B.K., Paudel U. 2021. Spatial Prediction of Spring Locations in Data Poor Region of Central Himalayas. *Hydrology Research*, 52(2): 492–505. <https://doi.org/10.2166/nh.2020.223>
- Olaya V., Conrad O. 2009. Geomorphometry in SAGA. In: *Developments in soil science*. Ed. by T. Hengl, H.I. Reuter. Amsterdam, Elsevier: 293–308. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00012-3](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00012-3)
- Ozdemir A. 2011. Using a Binary Logistic Regression Method and GIS for Evaluating and Mapping the Groundwater Spring Potential in the Sultan Mountains (Aksehir, Turkey). *Journal of Hydrology*, 405(1): 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.015>
- Passy P., Théry S. 2018. The Use of SAGA GIS Modules in QGIS. In: *QGIS and Generic Tools*. Ed. by N. Baghdadi, C. Mallet, M. Zribi. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, Inc.: 107–149. <https://doi.org/10.1002/9781119457091.ch4>
- Paudel M., Subedi D.S. 2025. Spatial Distribution of Spring Water Resources: a Study of Waling municipality, Nepal. *The Himalayan Geographers*, 16(1): 83–94. <https://doi.org/10.3126/thg.v16i1.92614>
- Pourtaghi Z.S., Pourghasemi H.R. 2014. GIS-Based Groundwater Spring Potential Assessment and Mapping in the Birjand Township, Southern Khorasan Province, Iran. *Hydrogeology Journal*, 22(3): 643–662. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1089-6>
- Rahmati O., Naghibi S.A., Shahabi H., Bui D.T., Pradhan B., ... Melesse A.M. 2018. Groundwater Spring Potential Modelling: Comparing the Capability and Robustness of Three Different Modeling Approaches. *Journal of Hydrology*, 565: 248–261. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.027>
- De Reu J., Bourgeois J., Bats M., Zwertvaegher A., Gelorini V., ... Crombé P. 2013. Application of the Topographic Position Index to Heterogeneous Landscapes. *Geomorphology*, 186(15): 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.015>
- Wickham H. 2016. *Ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis* (2nd Edition). New York, Springer-Verlag, 260 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>.
- Williams M.A., Vondracek B. 2010. Spring Distributions and Relationships with Land Cover and Hydrogeologic Strata in a Karst Landscape in Winona County, Minnesota, USA. *Carbonates and Evaporites*, 25(4): 333–347. <https://doi.org/10.1007/s13146-010-0037-y>

*Поступила в редакцию 29.06.2026;
поступила после рецензирования 20.07.2026;
принята к публикации 07.09.2026*

*Received June 29, 2026;
Revised July 20, 2026;
Accepted September 07, 2026*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Украинский Павел Александрович, кандидат географических наук, доцент кафедры географии, геоэкологии и безопасности жизнедеятельности, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

Нарожняя Анастасия Григорьевна, кандидат географических наук, доцент кафедры природопользования и земельного кадастра, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

Хомутовская Анна Григорьевна, магистрант, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pavel A. Ukrainskiy, Associate Professor of the Department of Geography, Geoecology and Life Safety, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Anastasia G. Narozhnyaya, Associate Professor of the Department of Nature Management and Land Cadastre Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Anna G. Khomutovskaya, Master's Student, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Методология исследования геосистем Methodology of Geosystems Research

УДК 504.5+550.3

DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-3-591-603

EDN IFVAUV

Целевой эколого-геофизический комплекс диагностики загрязнения геологической среды в техногенных ландшафтах

Гусев А.П.

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,
Республика Беларусь, 246028, г. Гомель, ул. Советская, 104
andi_gusev@mail.ru

Аннотация. Цель исследований – разработка и апробация эколого-геофизического комплекса методов при решении геоэкологических задач. Состав целевого комплекса: электроразведка методом сопротивлений (вертикальное электрическое зондирование, электрическое профилирование, резистивиметрия) и методом естественного электрического поля, многозональная космическая съемка, наземная фитоиндикация. Методы комплекса дополняют друг друга и позволяют оперативно оценить состояние геологической среды. Решаемые комплексом задачи: картирование загрязнения компонентов геологической среды, определение направления движения загрязненных вод, определение источников загрязнения. Выявлены эмпирические взаимосвязи между геоэлектрическими параметрами и загрязнением компонентов геологической среды, между геоэлектрическими параметрами и экологическими индикаторами. Рассмотрены примеры применения целевого эколого-геофизического комплекса для изучения загрязнения в зонах влияния экологически опасных объектов (склад технического сырья, полигон твердых коммунальных отходов, коллектор ливневой канализации).

Ключевые слова: загрязнение геологической среды, целевой эколого-геофизический комплекс, электроразведка, удельное электрическое сопротивление, *NDVI*

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № X25Y3B-079).

Для цитирования: Гусев А.П. 2026. Целевой эколого-геофизический комплекс диагностики загрязнения геологической среды в техногенных ландшафтах. Региональные геосистемы, 50(3): 591–603. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-591-603 EDN: IFVAUV

Task-Specific Ecological-Geophysical Complex for Diagnosing Pollution of the Geological Environment in Technogenic Landscapes

Andrei P. Gusev

F. Skorina Gomel State University
104 Sovetskaya St., Gomel 246028, Republic of Belarus,
andi_gusev@mail.ru

Abstract. The objective of this research is to develop and test an ecological-geophysical complex of methods for solving geoecological problems. The target complex includes electrical prospecting using the resistivity method (vertical electrical sounding, electrical profiling, resistivity metering) and the natural electric field method, multi-zone satellite imaging, and ground-based phytoindication. The methods of the complex complement each other and allow for a rapid assessment of the state of the geological environment. The tasks solved by the complex include mapping the pollution of components of the geological environment, determining the direction of movement and contaminated water, and identifying pollution sources. We have established empirical relationships between geoelectric parameters and pollution of components of the geological environment, and between geoelectric parameters and environmental indicators. The paper describes examples of the application of the targeted ecological-geophysical complex to studying pollution in zones affected by environmentally hazardous facilities (a warehouse for industrial raw materials, a landfill for municipal solid waste, a storm sewer collector).

Keywords: pollution of the geological environment, task-specific ecological-geophysical complex, electrical exploration, specific electrical resistance, *NDVI*

Acknowledgements: The research was carried out with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project No. X25UZB-079)

For citation: Gusev A.P. 2026. Task-Specific Ecological-Geophysical Complex for Diagnosing Pollution of the Geological Environment in Technogenic Landscapes. *Regional Geosystems*, 50(3): 591–603 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-591-603 EDN: IFVAUV

Введение

Геологическая среда представляет собой открытую термодинамическую систему, являющуюся важнейшей приповерхностной частью литосферы, от которой зависит жизнедеятельность человека и биосферы в целом. Состояние геологической среды можно рассматривать как интегральный показатель взаимодействия разнообразных природных и техногенных факторов и процессов. В качестве компонентов геологической среды выступают горные породы, подземные воды, природные газы, биота, а также физические поля [Королев, 2020].

Загрязнение геологической среды – острая экологическая проблема, которая в значительной степени проявляется на урбанизированных и промышленных территориях. Высокой актуальностью характеризуются технологии оперативной диагностики загрязнения геологической среды, среди которых важное место занимают геофизические методы. Анализ научной литературы показывает, что геофизические методы успешно используются при мониторинге утечек через дамбы хранилищ токсичных отходов, для изучения полигонов и свалок бытовых отходов, полигонов промышленных отходов, при исследовании засоления почв, для изучения нефтяного загрязнения [Гапонов, 2010; Федорова, Шестаков, 2011; Фоменко, 2016; Боровский и др., 2020; Оленченко и др., 2022; Sanuade, 2022; Давыдов, Горшков, 2022; Bernardo et al., 2022; Федорова, Горшков, 2023; Igboama et al., 2023; Мингалева и др., 2023; Nguyen et al., 2025; Зырянова и др., 2025]. Комплекс электроразведки и многозональной космической съемки использован для изучения химического загрязнения компонентов геологической среды в зоне влияния отвалов токсичных отходов и складов сырья химического производства минеральных удобрений [Гусев, 2023; 2024].

Основные преимущества геофизических методов: объективность информации о геофизических полях, создаваемых объектами и процессами геологической среды; объемность информации; возможность изучения подземных объектов и процессов на различных глубинах; относительно низкие затраты; возможность изучения без нарушения сплошности среды, без разрушения объектов исследований; возможность выполнять повторные наблюдения с нужной периодичностью; возможность дистанционных исследований; высокая производительность.

Целевой эколого-геофизический комплекс – комплекс методов, объединенных решаемой геоэкологической задачей. Формирование целевого эколого-геофизического комплекса при решении конкретной геоэкологической задачи учитывает: 1) детальность исследований; 2) временные ограничения исследований (сезон, сроки, оперативность); 3) разрешающую способность геофизических методов в приповерхностных условиях; 4) техногенные помехи и ограничения; 5) последовательность применения методов.

Цель наших исследований – разработка и апробация целевого эколого-геофизического комплекса методов при решении геоэкологических задач, связанных с диагностикой химического загрязнения компонентов геологической среды. В ходе исследований решались задачи: 1) изучение взаимосвязей между геоэлектрическими параметрами и загрязнением, между геоэлектрическими параметрами и экологическими показателями; 2) обоснование набора методов для оперативной диагностики загрязнения; 3) апробация целевого эколого-геофизического комплекса на экологически опасных промышленных объектах и городской территории.

Объекты и методы исследования

Район исследования – город Гомель (Республика Беларусь). Численность населения – 537 тыс. чел. На его территории расположены крупные предприятия – ОАО «Гомельский химический завод», ОАО «Гомсельмаш», ОАО «Гомельстекло», ОАО «Гомельдрев», Гомельский завод литья и нормалей, ОАО «Гомельстройматериалы» и другие. Гомель – крупный транспортный узел международного значения. Энергетический комплекс представлен ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2, а также котельными.

Верхняя часть геологического разреза (ВЧР) на территории района исследований представлена четвертичной системой (мощность 20–25 м). Четвертичные отложения сформированы среднелейстоценовыми водноледниковыми (мелко- и тонкозернистые пески) и моренными (супеси, суглинки с включениями гравия, гальки) породами. С поверхности залегают голоценовые и позднеплейстоценовые аллювиальные отложения (пески). Четвертичная система подстилается морскими отложениями палеогеновой системы (алевроиты, пески, песчаники, глины).

Объектами исследования являлись: зона влияния склада технического сырья (самородной серы); зона влияния полигона твердых коммунальных отходов (ТКО); коллектор ливневой канализации.

Методика исследований включала: геофизические исследования – электрическое профилирование (ЭП) и вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) методом сопротивлений, резистивиметрию вод и почвогрунтов, съемка методом потенциала естественного электрического поля (ЕП); магниторазведка; дистанционную и наземную фитоиндикацию. Дистанционная фитоиндикация основана на использовании вегетационного индекса (*NDVI*), который характеризует состояния растительного покрова [Гусев, 2020]. *NDVI* определяли на основе данных съемки спутников *Sentinel-2*. Наземная фитоиндикация выполнялась на пробных площадках. Определялись общее проективное покрытие растительности, виды-индикаторы, оценивалось жизненное состояние древесных насаждений. Для оценки жизненного состояния использовали индекс:

$$L_n = (100 \times n_1 + 70 \times n_2 + 40 \times n_3 + 5 \times n_4) / N,$$

где n_1 – количество здоровых деревьев; n_2 – количество ослабленных деревьев; n_3 – количество сильно ослабленных деревьев; n_4 – количество усыхающих деревьев; N – все деревья (включая сухостой) [Пугачевский и др., 2007].

С помощью дистанционной и наземной фитоиндикации выделялись техногенные модификации геосистем, характеризующие различные уровни химического загрязнения (ТМ-1, ТМ-2 и фоновая геосистема), оценивался экологический эффект загрязнения. Геофи-

зические работы проводились в пределах ареалов выделенных техногенных модификаций.

Для проведения геоэлектрических работ использована электроразведочная аппаратура *ERA-MAX*. Определение минерализации вод и удельного электрического сопротивления почв, грунтов и пород проводилось с помощью портативных резистивиметров. Для магнитометрической съемки использован протонный прецизионный магнитометр *G-857*. Для интерпретации результатов ВЭЗ использован программный продукт *IPI2Win*. Для обработки и атмосферной коррекции космических снимков, расчета вегетационных индексов, выделения ареалов техногенных модификаций использована геоинформационная система *QGIS*. Для статистической обработки – программы *MS Excel* и *STATISTICA*.

Результаты и их обсуждение

Наиболее важным геофизическим показателем, который может служить индикатором химического загрязнения компонентов геологической среды, является удельное электрическое сопротивление (УЭС). Известно, что УЭС воды зависит от ее минерализации и состава растворенных веществ, а УЭС рыхлых грунтов – от минерализации воды в порах и глинистости [Огильви, 1990]. Среди многочисленных и разнообразных работ в области инженерной и экологической геофизики отсутствуют работы по изучению взаимосвязи между УЭС и собственно экологическими показателями. На живые организмы влияет не само УЭС, а коррелирующее с ним содержание химических веществ (растворимых солей). Надежными экологическими показателями, тесно связанных с продуктивностью и фитомассой экосистем, являются вегетационные индексы, которые определяются на основе многозональной космической съемки. Среди вегетационных индексов наиболее популярен и понятен в интерпретации – нормализованный разностный вегетационный индекс (*NDVI*). На тестовом объекте (зона влияния отвалов фосфогипса [Гусев, 2023; 2024]) была изучена взаимосвязь между пространственными изменениями электрического сопротивления геологической среды на разных глубинах (коррелирует со степенью их химического загрязнения) и величин *NDVI*. Изменения сопротивления проводили по профилю, пересекающему зону загрязнения, вызванного поверхностным стоком с отвалов (минерализация 1300–3500 мг/дм³). ЭП выполнено на серии разносов питающие линии АВ (3, 10 и 30 м). Такие разносы определяют глубинность исследования от 0,15–0,4 до 3–7,5 м (от почвогрунтов до горизонта грунтовых вод включительно). Поскольку геологический разрез неоднороден по своим электрическим свойствам, то результатом измерений является кажущееся электрическое сопротивление (КЭС). Шаг профилирования – 30 м. Длина профиля 500 м. Расчет *NDVI* производился по серии космических снимков спутника *Sentinel-2* (август 2018, август 2020). Обнаружено, что в зоне загрязнения имеет место снижение КЭС относительно фона в 10 и более раз, которое проявляется по всей изучаемой глубине разреза, т.е. загрязнение охватывает почвогрунты, всю зону аэрации и грунтовый водоносный горизонт. Это подтверждается данными отбора грунтовых вод в скважине (расположена примерно в центре геоэлектрической аномалии), где отмечена минерализация 3–4 г/дм³. КЭС на всех разносах АВ положительно коррелируют с величиной *NDVI*. В зависимости от используемых снимков коэффициент ранговой корреляции Спирмена между *NDVI* и КЭС на разносе АВ = 30 м составляет 0,71–0,77 ($p < 0,01$), на разносе АВ = 10 м – 0,61–0,82 ($p < 0,01$), на разносе АВ = 3 м – 0,65–0,79 ($p < 0,01$), на разносе АВ = 1,5 м – 0,70–0,81 ($p < 0,01$).

Корреляционная связь между КЭС и *NDVI* объясняется на рис. 1. Эти два параметра зависят от содержания растворимых солей в верхней части разреза. Аномально низкие значения КЭС индицируют уровень загрязнения, вызывающий деградацию растительного покрова, проявляющуюся в его спектральных характеристиках.

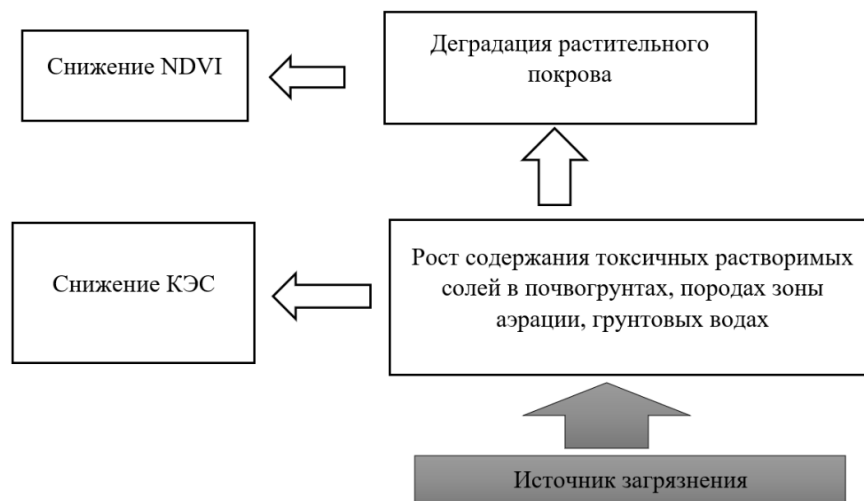


Рис. 1. Схема взаимосвязи кажущегося электрического сопротивления (КЭС) и *NDVI*
Fig. 1. Diagram of the relationship between apparent electrical resistivity (AER) and *NDVI*

Фитоиндикаторы (в данном случае *NDVI*) позволяют уточнить природу геоэлектрических аномалий. Так, например, электрическое сопротивление массива пород зависит от влажности, на которую влияет глубина залегания грунтовых вод. Увеличение влажности при подъеме уровня грунтовых вод к земной поверхности вызывает уменьшение величины изменяемого электрического сопротивления. Увеличение влажности само по себе, как правило, не влияет на проективное покрытие растительности (и на значения *NDVI*). Следует особо подчеркнуть, что связь *NDVI* – растительный покров – сопротивление почв и грунтов носит опосредованный и косвенный характер, может меняться в зависимости характера растительности, свойств почв, рельефа, сезона года и т.д.

Для изучения экологического значения УЭС как показателя техногенного засоления почв были выполнены исследования на улицах города Гомеля (обочины дорог, газоны, скверы) с помощью пробных площадок, на которых производилась серия измерений УЭС почв и оценка жизненного состояния деревьев (учитывались только лиственные деревья с диаметром не менее 10 см на уровне 1,5 м). Лесные геосистемы, находящиеся за городской чертой, были приняты за фоновые. Полученные для городских почв значения УЭС сопоставлялись с величиной индекса L_n . В результате исследований было показано, что УЭС почв отрицательно коррелирует с индексом L_n (коэффициент Спирмена составил 0,84 при $p < 0,0001$). То есть уменьшение сопротивления указывает на рост засоления, которое негативно влияет на древесные насаждения.

На основе изученных взаимосвязей обоснована возможность использования геоэлектрических параметров геологической среды для изучения химического загрязнения ее компонентов. В целевой эколого-геофизический комплекс были отобраны методы, дополняющие друг друга и позволяющие оперативно дать всестороннюю оценку загрязнения на урбанизированных и промышленных территориях. В комплекс включены: космическая многозональная съемка (индикатор – *NDVI*), наземная фитоиндикация (индикатор – проективное покрытие, индекс жизненного состояния древостоя); электроразведка (резистивиметрия, ЭП, ВЭЗ, ЕП). В качестве дополнительных методов – магниторазведка, каппаметрия, термометрия. Рассмотрим применение данного целевого эколого-геофизического комплекса на следующих примерах.

Склад технического сырья. На прилегающей к складу серы (находится на территории промплощадки одно из крупнейших предприятия химической промышленности Беларуси) территории обнаружена деградация растительного покрова, вызванная вероятным загрязнением почв. Находящаяся на открытом воздухе сера окисляется, частично раство-

ряется осадками и в виде сульфатов мигрирует в грунтовые воды. Выделены техногенные модификации: ТМ-2 – участок с мозаичным тростниково-березовым фитоценозом; ТМ-1 – участок, с сильно деградированным растительным покровом. За фоновую геосистему принят соседний мелколиственный лес на дерново-глеевых супесчаных почвах, отделенный от техногенных модификаций насыпью железной дороги. Каждая техногенная модификация характеризуется определенным диапазоном величин *NDVI*. Наиболее низкие значения *NDVI* приурочены к участку ТМ-1 – в 2,25 раза ниже, чем в фоновой геосистеме (табл. 1). На участке ТМ-2 – в 1,33 раза. Загрязнение обнаруживается в поверхностных водах (лужи и канавы): в участке ТМ-1 минерализация вод в среднем составляет 7,25 г/дм³ (в 24,4 раза выше фона), а pH = 3–3,5 единицы. На участке ТМ-2 минерализация поверхностных вод превышает фон в 1,71 раза, pH = 5–5,5 единицы.

Таблица 1
Table 1

Изменения индикаторов по градиенту химического загрязнения
в зоне влияния склада серы (средние значения)
Changes in indicators along the chemical pollution gradient in the impact zone
of the sulfur storage facility (average values)

Показатель	ТМ-1	ТМ-2	Фоновая геосистема
<i>NDVI</i>	0,343	0,580	0,773
Минерализация поверхностных вод, мг/дм ³	7,250	0,509	0,297
УЭС почвогрунтов, Ом×м	4,0	70,4	720,5
КЭС (AB = 3 м), Ом×м	3,3	62,8	51,4
КЭС (AB = 10 м), Ом×м	2,9	23,0	31,1
КЭС (AB = 30 м), Ом×м	15,4	93,3	180,9

На основе ЕП и ВЭЗ были определены участки инфильтрации и разгрузки грунтовых вод, а также направление миграции загрязняющих вещества в ВЧР. В естественном электрическом поле повышенной инфильтрации с поверхности в грунтовые воды соответствуют отрицательные аномалии потенциала, а зонам разгрузки подземных вод – положительные аномалии потенциала [Огильви, 1990]. На участке ТМ-1 в ходе исследований обнаружена положительная аномалия потенциала ЕП, имеющая амплитуду до +15 мВ. Остальная территория характеризуется отрицательными значениями потенциала ЕП, т.е. здесь имеет место инфильтрация поверхностных вод в грунтовые воды. Таким образом, поток загрязняющих вещества на территории склада серы направлен в грунтовый водоносный горизонт. Загрязненные грунтовые воды разгружаются на участке ТМ-1 и вызывают засоление почвогрунтов, которое приводит к деградации растительного покрова (проявляется в значительном снижении величины *NDVI*). Для участка ТМ-2 характерна нисходящая инфильтрация осадков в грунтовые воды, и, как следствие, влияние загрязненных грунтовых вод на растительность проявляется слабо.

На рис. 2 показан разрез кажущегося электрического сопротивления, по которому прослеживается загрязнение зоны аэрации и грунтовых вод в зоне ТМ-1. Видно, что на участке ТМ-1 загрязнение, выраженное в низких значениях КЭС (менее 5 Ом×м), фиксируется по всему разрезу, охватывая как зону аэрации, так и грунтовый водоносный горизонт.

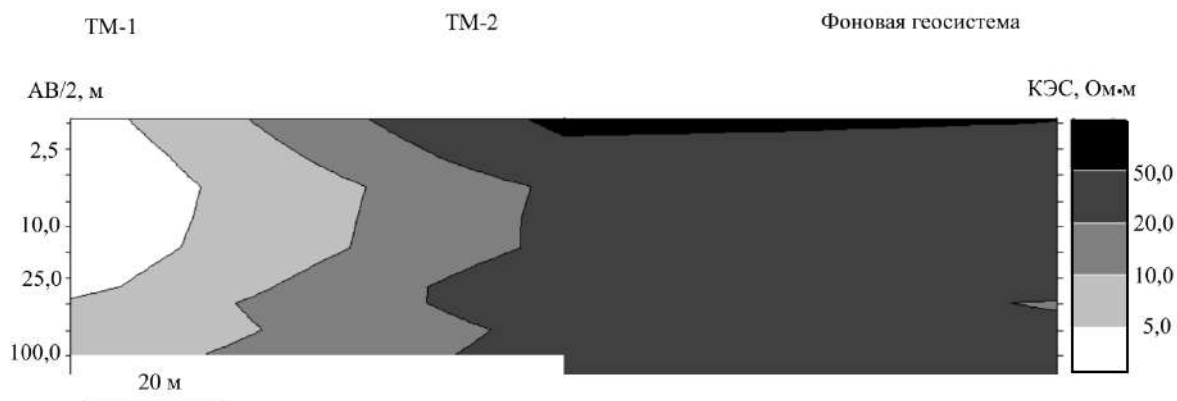


Рис. 2. Разрез кажущегося электрического сопротивления (КЭС) через зону влияния склада серы
Fig. 2. Apparent electrical resistivity (AER) section through the sulfur storage facility impact zone

На основе интерпретации кривых ВЭЗ установлено, что в зоне ТМ-1 геоэлектрический разрез характеризуется низким УЭС до глубины 16 м. На участке ТМ-2 загрязнение фиксируется в грунтовых водах, но отсутствует в зоне аэрации.

Комплексный анализ полученных результатов показывает, что загрязняющие вещества с поверхности на участке склада серы поступают в грунтовые воды. Поток загрязненных грунтовых вод направляется к зоне разгрузки (участок ТМ-1), где загрязненные грунтовые воды подходят к земной поверхности и вызывают деградацию растительности. На участке ТМ-2 загрязняющие вещества мигрируют в грунтовом водоносном горизонте, а к поверхности (корнеобитаемому слою почв) не подходят. Это объясняет незначительные нарушения растительности.

Полигон ТКО. Складирование ТКО вызывает развитие негативных процессов в сопредельных геосистемах. На примере Гомельского полигона ТКО показаны особенности распространения загрязнения фильтрационными водами с отвалов. Вблизи отвалов за счет избыточного поверхностного стока развивается процесс подтопления территории, под воздействием которого на месте смешанного лиственного леса сформировались техногенные модификации: ТМ-2 – зона умеренного подтопления (ухудшение жизненного состояния древостоя); ТМ-1 – зона сильного подтопления (массовое усыхание древостоя). Ареалы распространения техногенных модификаций определяются по величине *NDVI* (табл. 2). На участке ТМ-1 среднее значение *NDVI* снижается в 1,83 раза, в зоне ТМ-2 – в 1,16 раза по сравнению с фоновой геосистемой. По данным резистивиметрии минерализация поверхностных вод (лужи) на участке ТМ-1 значительно увеличивается (в 6,24 раза по сравнению с фоновой геосистемой).

Таблица 2
Table 2

Изменения индикаторов по градиенту подтопления загрязненными водами
в зоне влияния полигона ТКО (средние значения)
Changes in indicators along the chemical pollution gradient
in the solid waste landfill impact zone (average values)

Показатель	ТМ-1	ТМ-2	Фоновая геосистема
<i>NDVI</i>	0,480	0,760	0,880
<i>L_n</i> , балл	12,7	60,5	91,0
Минерализация поверхностных вод, мг/дм ³	1,060	0,464	0,170
УЭС почвогрунтов, Ом×м	5,8	183,3	1924,1

Резистивиметрические исследования почв и ЭП на разносах АВ = 3, 10, 30 м выявили закономерные изменения кажущегося электрического сопротивления по градиенту воздействия. Для зоны ТМ-1 характерно значительное снижение средней величины УЭС почв (в 331,7 раза) и КЭС на всех используемых разносах (рис. 3). В наибольшей степени различия проявляются на небольшой глубине (на разносе АВ = 3 м, что соответствует глубинности исследований 0,3–0,75 м). Сравнение профилирований на разных разносах показывает, что в зоне ТМ-1 изменения КЭС с глубиной менее выражены: весь изученный разрез характеризуется относительно низкими КЭС. Таким образом, влияние загрязнения фиксируется как в зоне аэрации, так в грунтовом водоносном горизонте (на глубине, соответствующей разносу АВ = 30 м, которая составляет 3–7,5 м).

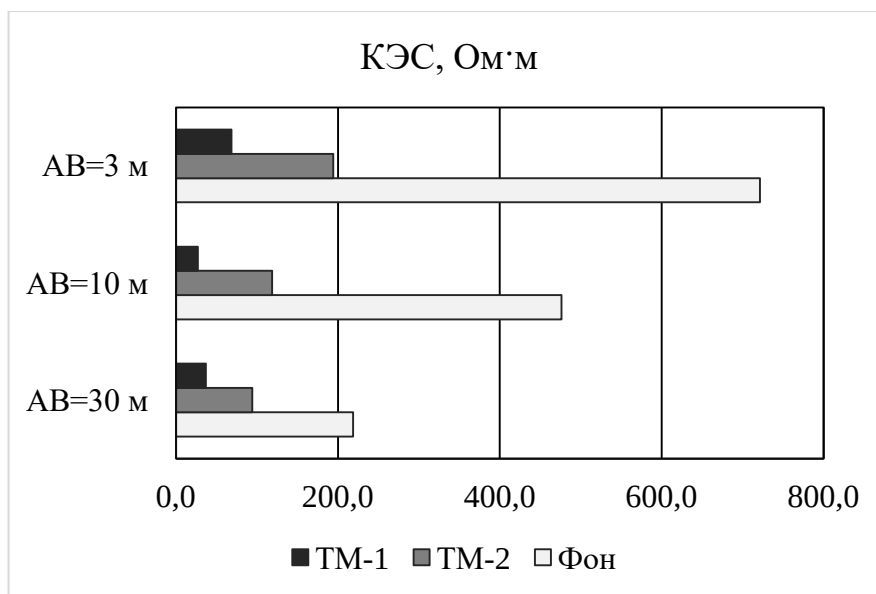


Рис. 3. Изменения КЭС на разной глубине в зоне влияния полигона ТКО

Fig. 3. Changes in the AER at different depths in the impact zone of the solid waste landfill

Территории полигона ТКО выступает источником загрязнения, что отражается в геофизических полях. Так, территория полигона характеризуется хаотичными пилообразными колебаниями геомагнитного поля (амплитуда от десятков до нескольких сотен нТл), магнитной восприимчивости и УЭС почвогрунтов. Такая пространственная неоднородность этих параметров обусловлена замусоренностью верхней части зоны аэрации железными предметами. Колебания УЭС почвогрунтов обусловлены мозаичным микрорельефом и вариабельностью содержания водорастворимых компонентов. В среднем величина УЭС почвогрунтов на территории полигона в 10 раз ниже, чем в соседних лесных геосистемах (что указывает на высокую степень их засоления). Величина магнитной восприимчивости (зависит от содержания железа и положительно коррелирует с содержанием тяжелых металлов [Водяницкий, Шоба, 2015]) превышает фоновые значения в десятки раз. По данным опробования скважин на территории полигона минерализация грунтовых вод составляет 3–10 г/дм³ (химический состав хлоридно-натриево-карбонатный).

Таким образом, с территории полигона поллютанты поступают в грунтовые воды, которые разгружаются на земной поверхности на участке ТМ-1 и вызывают деградацию древесной растительности (индекс жизненного состояния древостоя снижается в 7,2 раза по сравнению с фоновой геосистемой). В зоне ТМ-2 воздействие токсичных грунтовых вод снижается и соответственно деградация древесной растительности проявляется в меньшей степени (индекс жизненного состояния снижается в 1,5 раза).

Коллектор ливневой канализации. Негативными последствиями утечек из коллектора являются: ухудшение санитарно-гигиенических показателей грунтовых и поверхностных вод; увеличение риска коррозии подземных сооружений; развитие процесса подтопления городской территории. Изучаемый коллектор ливневой канализации проходит через несколько жилых микрорайонов и промышленных зон, служит приемником условно очищенных сточных вод нескольких предприятий. По данным резистивиметрии минерализация воды в коллекторе в 1,65 раза выше фоновой, а УЭС береговых почв коллектора в 2,24 раза ниже, чем у фоновых водоемов. Токсичность воды проявляется в деградации древесной растительности на берегах водоема-отстойника (величина индекса L_n снижается до 35,0 баллов (в целом для участка L_n находится в пределах 50–80 баллов). Для локализации мест утечек были выполнены электроразведочные исследования по профилю вдоль коллектора. Выявлены отрицательные (пикеты 10–14) и положительные (пикеты 21–22 и 29) аномалии потенциала ЕП. Положительные аномалии отмечены в 1–2 точках и, вероятно, имеют техногенную природу. Отрицательная аномалия в поперечнике имеет около 20 м (рис. 4).

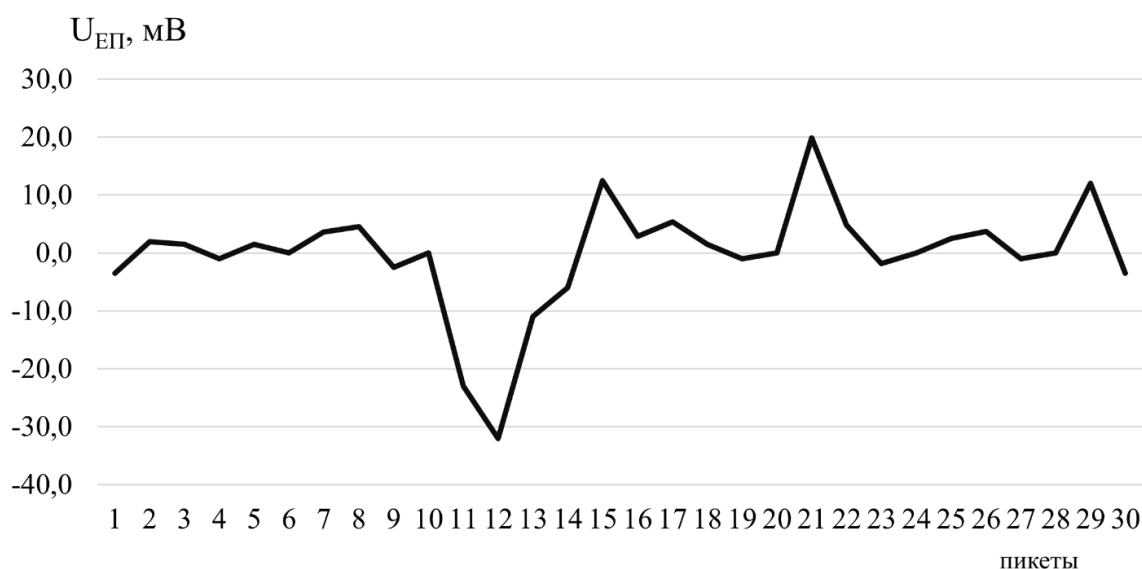


Рис. 4. Изменения потенциала ЕП вдоль коллектора ливневой канализации

Fig. 4. Changes in the potential of the natural electric field (NEF) along the storm sewer collector

На графике КЭС (разнос $AB = 10$ м – соответствует глубинности исследования 1–2,5 м) в районе 10–14 пикетов имеет место существенного снижения КЭС до 39–85 Ом×м (рис. 5). Отрицательная аномалия потенциала ЕП и аномалия пониженного КЭС пространственно совпадают. Предполагается, что отрицательные аномалии ЕП, имеющие геофильтрационное происхождение, указывают на инфильтрацию поверхностных вод в грунтовый горизонт [Огильви, 1990]. Интерпретация графика ЕП показывает, что глубина возмущающего объекта составляет примерно 3,6–5,0 м. Снижение КЭС может объясняться как увеличением влажности, так и увеличением минерализации фильтрующейся воды. Сопряженные в пространстве снижение КЭС и отрицательная аномалия ЕП обусловлены инфильтрацией воды из коллектора в грунтовый водоносный горизонт на данном участке.

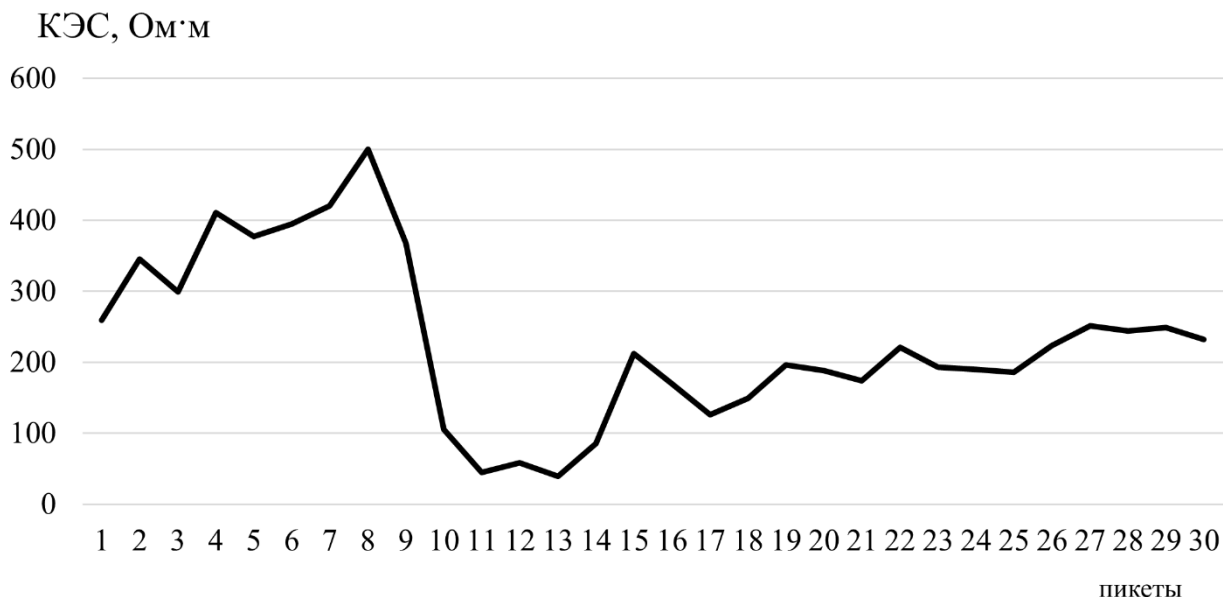


Рис. 5. Изменения кажущегося электрического сопротивления ($AB = 10$ м)
вдоль коллектора ливневой канализации
Fig. 5. Changes in apparent electrical resistance ($AB = 10$ m) along a sewer collector

Таким образом, утечки коллектора ливневой канализации фиксируются по изменениям УЭС и ЕП в зоне его влияния. Установлено, что такие аномалии имеют в поперечнике ширину в первые десятки метров, сопряжены друг с другом в пространстве, амплитуда изменения ЕП составляет 10–30 мВ, КЭС снижается в 3,5–6 раз соседних участков.

Закключение

Таким образом, разработанный целевой эколого-геофизический комплекс позволяет оперативно получить достаточно полную характеристику загрязнения геологической среды:

- с помощью наземной фитоиндикации и космической съемки выделить и картировать зоны техногенной трансформации, дать экологическую оценку процессам загрязнения;
- по результатам резистивиметрии и ЭП на малых разносах ($AB = 3, 10$ м) изучить особенности загрязнения поверхностных вод, почвогрунтов и зоны аэрации, уточнить пространственную структуру загрязнения;
- по данным метода потенциала ЕП определить особенности питания и разгрузки грунтовых вод в зонах техногенной трансформации;
- по данным ВЭЗ и ЭП на разносе $AB = 30$ м оценить распространение загрязнения по ВЧР в глубину.

Областью применения целевого комплекса являются любые техногенные объекты, которые оказывают воздействие на геологическую среду, характеризующееся ростом минерализации вод и засолением почвогрунтов.

Список источников

- Огильви А.А. 1990. Основы инженерной геофизики. М., Недра, 501 с.
Фоменко Н.Е. 2016. Комплексирование геофизических методов при инженерно-экологических изысканиях. Ростов-на-Дону, Изд-во Южного федерального университета, 292 с.

Список литературы

- Боровский М.Я., Шакуро С.В., Борисов А.С., Богатов В.И. 2020. Полигоны твердых бытовых отходов и свалки как дополнительные источники углеводородного сырья и объекты экологического мониторинга. Управление техносферой, 3(2): 191–206. <https://doi.org/10.34828/UdSU.2020.26.81.003>
- Водяницкий Ю.Н., Шоба С.А. 2015. Магнитная восприимчивость как индикатор загрязнения тяжелыми металлами городских почв. Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение, 1: 13–20.
- Гапонов Д.А. 2010. Исследования полигонов и свалок: геофизические методы. Твердые бытовые отходы, 7(49): 38–41.
- Гусев А.П. 2020. Изменения NDVI как индикатор динамики экологического состояния ландшафтов (на примере восточной части Полесской провинции). Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 1: 101–107. <https://doi.org/10.17308/geo.2020.1/2667>
- Гусев А.П. 2023. Комплексирование космической съемки и геоэлектрических методов при диагностике химического загрязнения геологической среды. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология, 3: 133–140. <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/3/133-140>
- Гусев А.П. 2024. Комплексирование геоэлектрических методов и дистанционного зондирования Земли при оценке состояния окружающей среды в зоне влияния экологически опасных объектов. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 335(10): 134–145. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/10/4528>
- Давыдов В.А., Горшков В.Ю. 2022. Геофизическое обследование плотины старого Демидовского завода. Уральский геофизический вестник, 1(47): 17–24. <https://doi.org/10.25698/UGV.2022.1.3.17>
- Зырянова Е.С., Елохина С.Н., Худяков А.А. 2025. Комплексирование геофизических методов при изучении ареала загрязнения подземных вод нефтепродуктами в пгт. Верх-Нейвинский. Известия Уральского государственного горного университета, 1(77): 104–115. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2025-1-104-115>
- Королев В.А. 2020. Экологическая геокибернетика. М., ООО «Сам Полиграфист», 440 с.
- Мингалева Т.А., Шакуро С.В., Сенчина Н.П., Егоров А.С. 2023. Применение RGB-синтеза для комплексной интерпретации данных геофизических методов при изучении территорий, загрязненных нефтепродуктами. Геосистемы переходных зон, 7(1): 75–85. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.1.075-085>
- Оленченко В.В., Бортникова С.Б., Девятова А.Ю. 2022. Применение электроразведочных методов при исследовании техногенных тел (складированных отходов горнорудной промышленности). Обзор. Геофизические технологии, 4: 23–40. <https://doi.org/10.18303/2619-1563-2022-4-23>
- Пугачевский А.В., Кравчук Л.А., Судник А.В., Моложавский А.А. 2007. Методические подходы к оценке и картографированию состояния и устойчивости к антропогенным нагрузкам насаждений городов. Природные ресурсы, 3: 33–44.
- Федорова О.И., Горшков В.Ю. 2023. Геоэлектрический мониторинг состояния грунтовой плотины пруда-отстойника шахтных вод. Управление техносферой, 6(2): 205–221. <https://doi.org/10.34828/UdSU.2023.29.73.007>
- Федорова О.И., Шестаков А.Ф. 2011. Геоэлектрический мониторинг при инженерно-экологических исследованиях в районе накопителей промстоков. Разведка и охрана недр, 12: 51–56.
- Bernardo B., Candeias C., Rocha F. 2022. Integration of Electrical Resistivity and Modified DRASTIC Model to Assess Groundwater Vulnerability in the Surrounding Area of Hulene-B Waste Dump, Maputo, Mozambique. Water, 14(11): 1746. <https://doi.org/10.3390/w14111746>
- Igboama W.N., Aroyehun M.T., Amosun J.O., Ayanda O.S., Hammed O.S., Olowofela J.A. 2023. Review of Geoelectrical Methods in Geophysical Exploration. Nigerian Journal of Physics, 32(3): 141–158.

- Nguyen V.H., Germer J., Pham T.D., Asch F. 2025. Mapping Saline Groundwater Under Rice-Paddy Fields in Vietnam's Mekong Delta. *Near Surface Geophysics*, 23(2): 121–133. <https://doi.org/10.1002/nsg.70001>
- Sanuade O.A., Arowoogun K.I., Amosun J.O. 2022. A Review on the Use of Geoelectrical Methods for Characterization and Monitoring of Contaminant Plumes. *Acta geophysics*, 70: 2099–2117. <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00858-9>

References

- Borovsky M.Ya., Shakuro S.V., Borisov A.S., Bogatov V.I. 2020. Solid Waste Landfills and Landfills as Additional Sources of Hydrocarbon Gas and Environmental Monitoring Facilities. *Management of the Technosphere*, 3(2): 191–206 (in Russian). <https://doi.org/10.34828/UdSU.2020.26.81.003>
- Vodyanitsky Yu.N., Shoba S.A. 2015. Magnetic Susceptibility as an Indicator of Heavy Metal Contamination of Urban Soils. *Moscow University Soil Science Bulletin*, 70(1): 10–16 (in Russian).
- Gaponov D.A. 2010. Issledovaniya poligonov i svalok: geofizicheskiye metody [Landfill and Dump Surveys: Geophysical Methods]. *Tverdye bytovyye otkhody*, 7(49): 38–41.
- Gusev A.P. 2020. NDVI Changes as an Indicator of the Dynamics of the Ecological State of Landscapes (on the Example of the Eastern Part of the Polesie Province). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 1: 101–107 (in Russian). <https://doi.org/10.17308/geo.2020.1/2667>
- Gusev A.P. 2023. Integration of Satellite Imagery and Geoelectric Methods in the Diagnosis of Chemical Pollution of the Geological Environment *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 3: 133–140 (in Russian). <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/3/133-140>
- Gusev A.P. 2024. Integration of Geoelectric Methods and Remote Sensing in Assessing the Environment State in the Area of Impact of Ecologically Hazardous Objects. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 335(10): 134–145 (in Russian). <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/10/4528>
- Davydov V.A., Gorshkov V.Yu. 2022. Geophysical Investigation of the Dam of the Old Demidov's Factory. *Ural'skiy geofizicheskiy vestnik*, 1(47): 17–24 (in Russian). <https://doi.org/10.25698/UGV.2022.1.3.17>
- Zyryanova E.S., Elokhina S.N., Khudyakov A.A. 2025. Integration of Geophysical Methods in Studying the Area of Groundwater Pollution by Oil Products in Verkh-Neyvinsky Village. *News of the Ural State Mining University*, 1(77): 104–115 (in Russian). <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2025-1-104-115>
- Korolev V.A. 2020. *Ekologicheskaya geokibernetika [Ecological Geocybernetics]*. Moscow, Publ. Sam Poligrafist, 440 p.
- Mingaleva T.A., Shakuro S.V., Senchina N.P., Egorov A.S. 2023. Application of RGB-Synthesis for Complex Interpretation of Geophysical Data in the Study of Areas Contaminated by Oil Products. *Geosystems of Transition Zones*, 7(1): 75–85 (in Russian). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.075-085>
- Olenchenko V.V., Bortnikova S.B., Devyatova A.Yu. 2022. Application of Electrical Prospecting Methods for Technogenic Bodies (Stored Wastes of the Mining Industry) Studies: Review. *Russian Journal of Geophysical Technologies*, 4: 23–40 (in Russian). <https://doi.org/10.18303/2619-1563-2022-4-23>
- Pugachevsky A.V., Kravchuk L.A., Sudnik A.V., Molozhavsky A.A. 2007. Metodicheskiye podkhody k otsenke i kartografirovaniyu sostoyaniya i ustoychivosti k antropogennym nagruzkami nasazhdeniy gorodov [Methodological Approaches to Assessing and Mapping the Condition and Resistance of Urban Plantings to Anthropogenic Loads]. *Prirodnyye resursy*, 3: 33–44.
- Fedorova O.I., Gorshkov V.Yu. 2023. Geoelectric Monitoring of the Ground Dam Condition of Mine Water Retention Pond. *Management of the Technosphere*, 6(2): 205–221 (in Russian). <https://doi.org/10.34828/UdSU.2023.29.73.007>
- Fedorova O.I., Shestakov A.F. 2011. Geoelectrical Monitoring in Engineering and Environmental Research in the Area of Industrial Wastewater Stores. *Prospect and protection of mineral resources*, 12: 51–56 (in Russian).

- Bernardo B., Candeias C., Rocha F. 2022. Integration of Electrical Resistivity and Modified DRASTIC Model to Assess Groundwater Vulnerability in the Surrounding Area of Hulene-B Waste Dump, Maputo, Mozambique. *Water*, 14(11): 1746. <https://doi.org/10.3390/w14111746>
- Igboama W.N., Aroyehun M.T., Amosun J.O., Ayanda O.S., Hammed O.S., Olowofela J.A. 2023. Review of Geoelectrical Methods in Geophysical Exploration. *Nigerian Journal of Physics*, 32(3): 141–158.
- Nguyen V.H., Germer J., Pham T.D., Asch F. 2025. Mapping Saline Groundwater Under Rice-Paddy Fields in Vietnam's Mekong Delta. *Near Surface Geophysics*, 23(2): 121–133. <https://doi.org/10.1002/nsg.70001>
- Sanuade O.A., Arowoogun K.I., Amosun J.O. 2022. A Review on the Use of Geoelectrical Methods for Characterization and Monitoring of Contaminant Plumes. *Acta geophysics*, 70: 2099–2117. <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00858-9>

*Поступила в редакцию 05.11.2025;
поступила после рецензирования 26.01.2026;
принята к публикации 02.03.2026*

*Received November 05, 2025;
Revised January 26, 2026;
Accepted March 02, 2026*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Гусев Андрей Петрович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий кафедрой геологии и географии, Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, г. Гомель, Беларусь

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Andrei P. Gusev, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Geology and Geography, F. Skorina Gomel State University, Gomel, Belarus

УДК 911.3:654.022 (470+571)
DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-3-604-618
EDN IPPCYM

Телекоммуникационная связанность российских регионов: оценка с помощью геопространственного искусственного интеллекта

Блануца В.И.

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН
Россия, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1
blanutsa@list.ru

Аннотация. Построена система геопространственного искусственного интеллекта в виде графа знаний, базы данных, базы знаний и четырех вспомогательных блоков. Для оценки телекоммуникационной связанности регионов России использовались данные *ComNews* о магистральной сети связи России в 2020–2024 гг., уточненные по авторской базе данных о трассировке оптоволоконных линий связи. Связанность 85 российских регионов проанализирована в трех аспектах – надежность линейно-узловой структуры, положение региона в сети и каркас магистральной связи. Выявлено 17 проблемных регионов по надежности. Проведена оценка телекоммуникационно-сетевого положения каждого региона по двум версиям. Идентифицирован каркас магистральной сети связи в виде одного центра, трех субцентров и соединяющих их регионов.

Ключевые слова: общественная география, магистральная линия связи, надежность сети, телекоммуникационно-сетевое положение, территориальная структура связи, граф знаний, Российская Федерация

Благодарности. Работа выполнена за счет средств государственного задания Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (FWEM-2026-0006) «Общественно-географические основы анализа территориальных структур Сибири в контексте новой восточной политики России и усиления евразийской континентальной интеграции» № 126020516552-3.

Для цитирования: Блануца В.И. 2026. Телекоммуникационная связанность российских регионов: оценка с помощью геопространственного искусственного интеллекта. Региональные геосистемы, 50(3): 604–618. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-604-618 EDN: IPPCYM

Telecommunications Connectivity of Russian Regions: Assessment Using Geospatial Artificial Intelligence

Viktor I. Blanutsa

Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
1 Ulan-Batorskaya St., Irkutsk 664033, Russia
blanutsa@list.ru

Abstract. The purpose of the study was to create a geospatial artificial intelligence system and apply it to assess the telecommunications connectivity of Russia's regions. The study employed ComNews data on Russia's backbone communication network in 2020–2024, which was updated using the author's database on fiber-optic communication lines. The architecture of the built-in system is based on a knowledge graph (85 vertices and 3570 edges that allow for transformations and generalizations), which manages the

© Блануца В.И., 2026

database and knowledge base with the support of the classifier, router, rule generator, and interpreter subsystems. The connectivity of 85 Russian regions has been analyzed in three aspects: the reliability of the linear-node structure, the region's position in the network, and the backbone communication framework. Five types of reliability for the telecommunications connection between regions are proposed. Problem regions were identified using stress testing on the knowledge graph. The telecommunications-network position of all Russian regions was assessed using two versions. The regions have been distributed between the center, the semi-periphery, the near-periphery, and the far-periphery. The backbone communication network has been identified as a single center, three sub-centers, and the regions connecting them.

Keywords: human geography, backbone network, network reliability, telecommunications-network position, territorial communication structure, knowledge graph, Russian Federation

Acknowledgements. The work was carried out at the expense of the state assignment of the Sochava Institute of Geography of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (FWEM-2026-0006) «Socio-geographical foundations of the analysis of Siberia's territorial structures in the context of Russia's new Eastern policy and the strengthening of Eurasian continental integration» No. 126020516552-3.

For citation: Blanutsa V.I. 2026. Telecommunications Connectivity of Russian Regions: Assessment Using Geospatial Artificial Intelligence. *Regional Geosystems*, 50(3): 604–618 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-604-618 EDN: IPPCYM

Введение

Связанность, понимаемая как специфика соединения разных территорий в единое социально-экономическое пространство, является общественно-географической характеристикой линейно-узловых структур человеческой деятельности [Полякова, Симарова, 2014; Bailey et al., 2020; Tang, 2020; Черкашина и др., 2023; Boto-García, Pérez, 2023; Tsiotas, 2025], включая обеспечение электросвязи между удаленными местами [Rutherford et al., 2004; Tranos, Gillespie, 2011; Foster, 2023]. В нашем исследовании рассматриваются субнациональные территории (субъекты Российской Федерации, называемые регионами) и соединяющие их магистральные (межрегиональные) телекоммуникационные каналы, представленные волоконно-оптическими линиями связи (ВОЛС) и аналогичными подводными линиями (ПВОЛС). Количество и географическое распределение этих линий между регионами обеспечивают телекоммуникационную связанность на физическом уровне, уникальную для каждого государства с большой территорией. Применительно к России такая связанность ранее не изучалась. Известны только оценки оптоволоконной связанности городов [Блануца, 2019], что недостаточно для понимания специфики соединения регионов и экономической связанности регионов (экономические отношения между операторами связи из разных регионов) [Блануца, 2019], что является производным от физического уровня. В качестве производных уровней также выступают социальная и цифровая связанности [Блануца, 2019], которые не рассматриваются в нашем исследовании. По другим государствам в международных библиографических базах данных не зафиксированы публикации по общественно-географическому изучению оптоволоконного соединения регионов.

Для оценки связанности обычно используется инструментарий теории графов [Попков, 2000; Jazdzewska, 2021; Chen, Tong, 2022; Hashemi et al., 2024]. Однако для территориально распределенных объектов (вершин) многие характеристики графа не могут применяться по причине искажения географических взаимодействий и местоположения [Laita et al., 2011; Moilanen, 2011], а также нецелесообразности сравнения с полным графом (каждая вершина соединена ребрами со всеми остальными вершинами графа). Например, связанность изучаемого графа как отношение количества ребер в нем к числу ребер в соответствующем полном графе не позволяет судить о специфике

соединения регионов, которые посредством ВОЛС передают данные сначала в соседние регионы и только после них в последующие территории до выхода к границам государства. При этом поддержание связи между российскими регионами через трансграничные оптоволоконные переходы и зарубежных операторов [Блануца, 2019] не анализируется в нашем исследовании (в том числе из-за геополитических рисков блокирования транзитных линий в недружественных государствах). Не исключая теоретико-графовый подход, необходимо разрабатывать новые показатели для оценки телекоммуникационной связанности регионов. Желательно, чтобы подобные оценки минимизировали субъективность исследователей и при автоматической обработке больших объемов данных позволяли принимать решения в режиме реального времени. Этому в настоящее время соответствуют алгоритмы искусственного интеллекта [Korczevska, 2022; Das et al., 2023; Prawira et al., 2025].

Учет географических особенностей при анализе взаимодействий между разными территориями привел к формированию специализированной группы алгоритмов в виде геопространственного искусственного интеллекта (ГеоИИ) [Gao et al., 2023; Prasad et al., 2024; Darwish, Chemingui, 2025; Mai et al., 2025; Saleh et al., 2025]. Для эффективной верификации и интерпретации этих алгоритмов, изначально представленных искусственной нейронной сетью как «черным ящиком» (известны только вход и выход без разъяснения процесса обработки данных), формируется объяснимый ГеоИИ [Papadakis et al., 2022; Xing, Sieber, 2023; Liu et al., 2024; Rajabi, Etmnani, 2024]. Он создается, в том числе, на основе графа знаний [Bernard et al., 2022; Mai et al., 2022; Han et al., 2023] и правил логического вывода [Nowak-Brzezińska, Horyń, 2020; Kierner et al., 2023; Блануца, 2025a]. С учетом уточнений, представленных выше, целью нашего исследования стало построение системы геопространственного искусственного интеллекта для оценки телекоммуникационной связанности регионов и апробация этой системы на примере субъектов Российской Федерации. При изложении результатов исследования основное внимание уделено архитектуре ГеоИИ и географическим характеристикам телекоммуникационной связанности, а описание вычислительного процесса сведено к минимуму.

Объекты и методы исследования

Информация о ВОЛС и ПВОЛС считывалась со схемы «Магистральные сети связи в России», отражающей ситуацию на октябрь 2024 г. [Интерактивная карта..., 2024]. Для анализа изменений учтены аналогичные схемы за предыдущие четыре года [Интерактивная карта ..., 2020; 2021; 2022; 2023]. Трассировка маршрутов и их функционирование уточнялись по авторской базе данных «Линии электросвязи Российской Федерации». К примеру, с 2022 г. [Интерактивная карта ..., 2022; 2023; 2024] на схемах отмечен участок Териберка (Мурманская область) – Амдерма (Ненецкий автономный округ) ПВОЛС «Полярный экспресс» (Мурманск – Диксон – Тикси – Певек – Анадырь – Петропавловск-Камчатский – Южно-Сахалинск – Владивосток), но на самом деле этот участок еще не функционирует в постоянном режиме (по состоянию на октябрь 2024 г.). Проанализированы 85 из 89 регионов России, так как отсутствовали данные по Донецкой Народной Республике, Луганской Народной Республике, Запорожской и Херсонской областям. В качестве дополнительных сведений привлечены данные Росстата о численности постоянного населения в российских регионах [Оценка численности ..., 2024].

При создании системы (вычислительного комплекса) ГеоИИ учитывались рекомендации общего характера [Papadakis et al., 2022; Gao et al., 2023; Xing, Sieber, 2023; Liu et al., 2024; Prasad et al., 2024] и особенности функционирования графа знаний [Yan, 2019; Fensel et al., 2020; Guo et al., 2021; Bernard et al., 2022; Wilke, Ngonga Ngomo, 2023; Han et al., 2025]. Архитектуру построенной системы можно представить в виде нескольких блоков (рис. 1). Основным блоком является граф знаний, управляющий всеми

операциями. Применительно к нашему исследованию граф знаний представляет собой 85 вершин (регионов) с прикрепленными к ним атрибутами, качественно и количественно характеризующими анализируемые регионы, и соединяющие эти вершины 3570 ребер (отношений между регионами). В граф встроены операции по управлению ГеоИИ и обобщению графа (производных графов) [Yan, 2019]. Для выявления неявных отношений между регионами использовалась программа *AugGKG* [Han et al., 2023]. Работа системы осуществлялась следующим образом: в базу данных и базу знаний загружались, соответственно, геопространственные количественные данные и знания (текст, правила, закономерности и другая неформализованная информация); через блок «Запросы» вводилась исследовательская задача; в графе знаний анализировалась (с учетом имеющейся информации) возможность получения ответа на запрос; в случае такой возможности производились необходимые вычисления, после чего формулировалось заключение. К графу знаний подключены четыре аналитических блока: «Классификатор» проводит типологию и кластеризацию вершин или ребер; «Маршрутизатор» [Blanutsa, 2024] определяет все возможные оптоволоконные пути между двумя регионами; «Генератор правил» [Блануца, 2025a] позволяет формализовать качественный анализ; «Интерпретатор» переводит внешние знания в структуру, сопоставимую с графом знаний по телекоммуникационной связанности. В случае необходимости привлечения дополнительной информации происходит поиск в сети Интернет с помощью ключевых слов, нейропоиска или расширения семантического поля при машинном обучении [Блануца, 2025б].

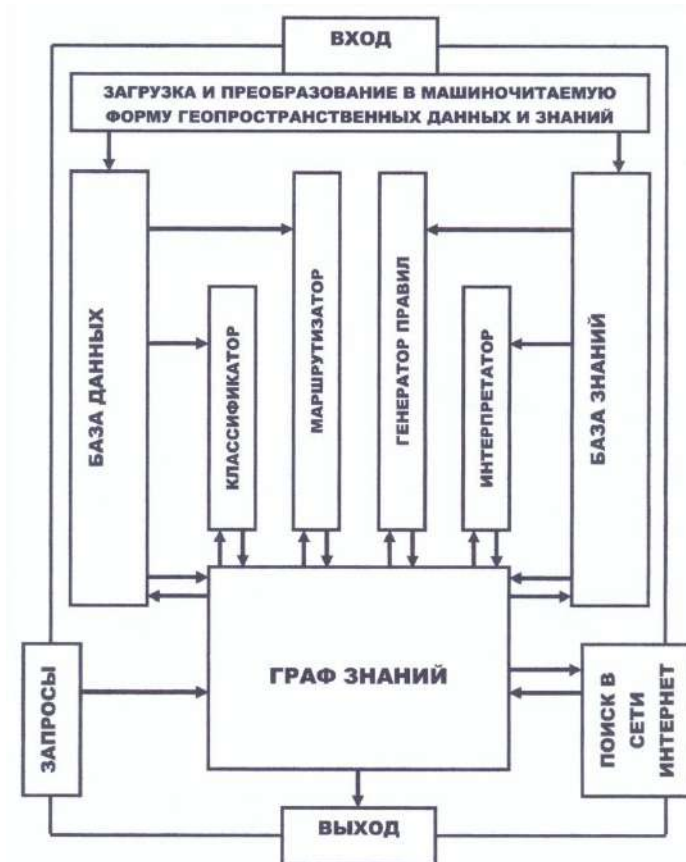


Рис. 1. Система геопространственного искусственного интеллекта для оценки телекоммуникационной связанности регионов (составлено автором)
Fig. 1. Geospatial artificial intelligence system for assessing telecommunications connectivity of regions (compiled by the author)

Результаты и их обсуждение

Общественно-географическое понимание специфики соединения регионов в единую сеть с помощью магистральных линий связи основано на анализе главных проявлений связанности. К таковым, по мнению автора, относятся надежность (отказоустойчивость) линейно-узловой структуры, положение каждого региона в сети и существование каркаса магистральной связи.

Надежность линейно-узловой структуры может быть проанализирована с помощью различных методов [Zang et al., 2024], количественно оценивающих отказоустойчивость сети. Возможно также проведение стресс-тестирования [Tóth et al., 2022], когда имитируется отключение отдельных элементов сети с последующей проверкой сохранения или нарушения связанности. Ранее такая имитация была проведена для выявления критической телекоммуникационной инфраструктуры России [Blanutsa, 2024], но там рассматривались города, а не регионы. Подобная работа полностью не автоматизирована и зависит от когнитивных способностей человека-исследователя. Чтобы снизить субъективность, повысить точность и скорость принятия решений по оценке надежности телекоммуникационной сети в государствах с большой территорией целесообразно использовать ГеоИИ (см. рис. 1).

Соединение регионов с помощью ВОЛС и ПВОЛС является более сложным по надежности, чем соединение городов, так как необходимо учитывать множество межрегиональных связей, а не только связь между двумя городами. Поэтому предлагается специальная типология соединения регионов в зависимости от количества линий связи, их территориальной концентрации (несколько линий, параллельно проложенных на небольшом расстоянии друг от друга, могут быть повреждены в результате одного случайного или преднамеренного действия [Blanutsa, 2024]; такая полоса линий названа направлением) и разнообразия операторов связи. Для оценки надежности по каждой из трех позиций достаточно учитывать наличие единственного или множественного числа. В результате пересечения трех бинарных позиций получается восемь типов, из которых три не могут существовать.

Определение типа соединения двух регионов проводилось в блоке «Классификатор» (см. рис. 1). В сокращенном виде эту операцию можно представить в виде следующего набора правил ($P_{тип}$):

$P_{тип1}$: ЕСЛИ между регионами R_i и R_j проложена одна линия (L_k) одного оператора (O_m), ТО имеет место одно направление (D_n) И *type 1*;

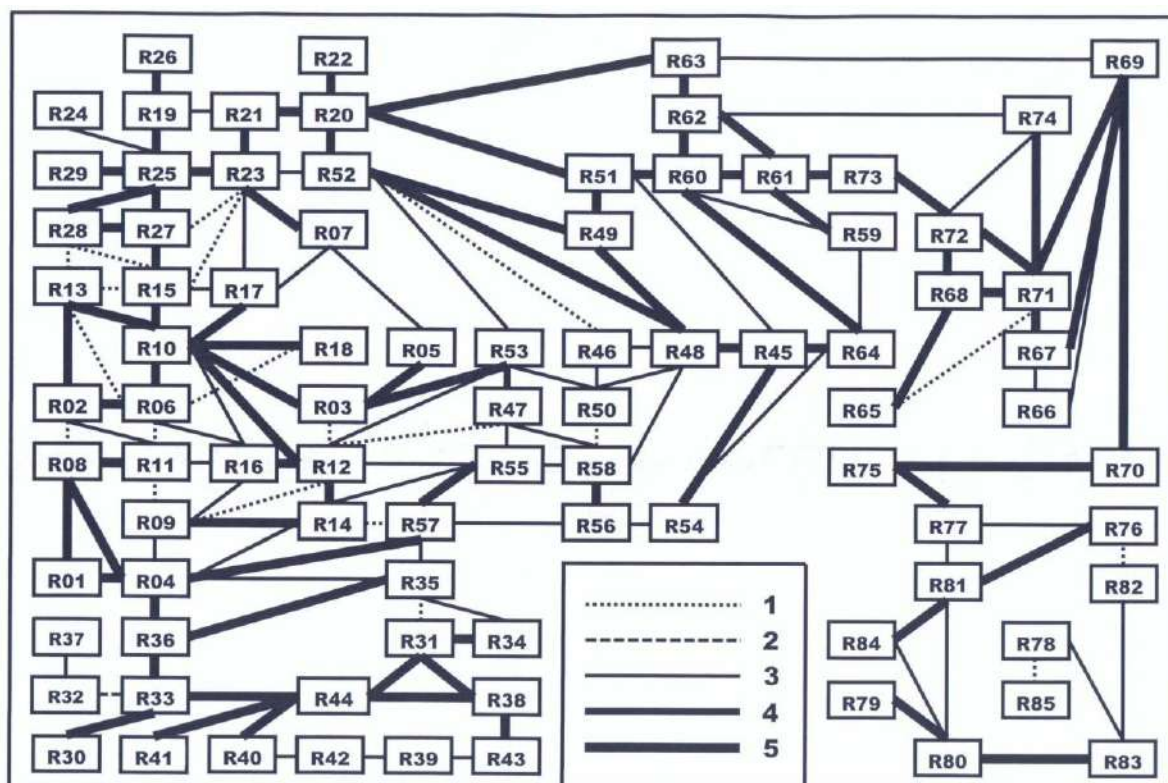
$P_{тип2}$: ЕСЛИ проложены несколько линий ($L_k, L_{k+1}, \dots$) И O_m И D_n , ТО *type 2*;

$P_{тип3}$: ЕСЛИ ($L_k, L_{k+1}, \dots$) И ($O_m, O_{m+1}, \dots$) И D_n , ТО *type 3*;

$P_{тип4}$: ЕСЛИ ($L_k, L_{k+1}, \dots$) И O_m И ($D_n, D_{n+1}, \dots$), ТО *type 4*;

$P_{тип5}$: ЕСЛИ ($L_k, L_{k+1}, \dots$) И ($O_m, O_{m+1}, \dots$) И ($D_n, D_{n+1}, \dots$), ТО *type 5*.

Эта операция проводилась по каждой паре из 85 регионов России для каждого года. Например, в 2020 г. связь между Белгородской и Курской областями осуществляли 8 компаний (операторов) по 9 линиям направления Белгород – Курск и одной линии Старый Оскол – Курск (компания «ТрансТелеКом»). На основе этих сведений в блоке «Классификатор» определен тип соединения между указанными регионами, зафиксированный в виде формальной записи: $R01 \& R08 (2020) \rightarrow type 5$. После 2020 г. происходило мало изменений в типах соединения, но все они учитывались «Классификатором» и заносились в граф знаний, последняя версия которого относится к 2024 г. (рис. 2).



Регионы: R01 – Белгородская обл., R02 – Брянская обл., R03 – Владимирская обл., R04 – Воронежская обл., R05 – Ивановская обл., R06 – Калужская обл., R07 – Костромская обл., R08 – Курская обл., R09 – Липецкая обл., R10 – Московская обл., R11 – Орловская обл., R12 – Рязанская обл., R13 – Смоленская обл., R14 – Тамбовская обл., R15 – Тверская обл., R16 – Тульская обл., R17 – Ярославская обл., R18 – город федерального значения Москва, R19 – Республика Карелия, R20 – Республика Коми, R21 – Архангельская обл., R22 – Ненецкий автономный округ, R23 – Вологодская обл., R24 – Калининградская обл., R25 – Ленинградская обл., R26 – Мурманская обл., R27 – Новгородская обл., R28 – Псковская обл., R29 – город федерального значения Санкт-Петербург, R30 – Республика Адыгея, R31 – Республика Калмыкия, R32 – Республика Крым, R33 – Краснодарский край, R34 – Астраханская обл., R35 – Волгоградская обл., R36 – Ростовская обл., R37 – город федерального значения Севастополь, R38 – Республика Дагестан, R39 – Республика Ингушетия, R40 – Кабардино-Балкарская Республика, R41 – Карачаево-Черкесская Республика, R42 – Республика Северная Осетия-Алания, R43 – Чеченская Республика, R44 – Ставропольский край, R45 – Республика Башкортостан, R46 – Республика Марий Эл, R47 – Республика Мордовия, R48 – Республика Татарстан, R49 – Удмуртская Республика, R50 – Чувашская Республика, R51 – Пермский край, R52 – Кировская обл., R53 – Нижегородская обл., R54 – Оренбургская обл., R55 – Пензенская обл., R56 – Самарская обл., R57 – Саратовская обл., R58 – Ульяновская обл., R59 – Курганская обл., R60 – Свердловская обл., R61 – Тюменская обл., R62 – Ханты-Мансийский автономный округ-Югра, R63 – Ямало-Ненецкий автономный округ, R64 – Челябинская область, R65 – Республика Алтай, R66 – Республика Тыва, R67 – Республика Хакасия, R68 – Алтайский край, R69 – Красноярский край, R70 – Иркутская обл., R71 – Кемеровская обл., R72 – Новосибирская обл., R73 – Омская обл., R74 – Томская обл., R75 – Республика Бурятия, R76 – Республика Саха (Якутия), R77 – Забайкальский край, R78 – Камчатский край, R79 – Приморский край, R80 – Хабаровский край, R81 – Амурская обл., R82 – Магаданская обл., R83 – Сахалинская обл., R84 – Еврейская автономная обл., R85 – Чукотский автономный округ.

Рис. 2. Типы соединения российских регионов с помощью магистральных линий связи на октябрь 2024 года (составлено автором)

Типы: 1 – одна линия одного оператора в одном направлении, 2 – несколько линий одного оператора в одном направлении, 3 – несколько линий нескольких операторов в одном направлении, 4 – несколько линий одного оператора в нескольких направлениях, 5 – несколько линий нескольких операторов в нескольких направлениях

Fig. 2. Types of connection between Russian regions using backbone networks as of October 2024 (compiled by the author)

Types: 1 – one line of one operator in one direction, 2 – several lines of one operator in one direction, 3 – several lines of several operators in one direction, 4 – several lines of one operator in several directions, 5 – several lines of several operators in several directions

Наиболее уязвимы регионы, имеющие первые три типа соединения только с одним соседним регионом. В России три таких региона – Калининградская область, г. Севастополь и Чукотский автономный округ (см. рис. 2). Однако проблемы могут возникнуть и при соединении с несколькими соседними регионами в зависимости от количества одновременно нарушенных направлений. Для оценки такой отказоустойчивости телекоммуникационной сети России в ГеоИИ предусмотрена имитация отключения направлений. С помощью генератора случайных чисел каждому направлению (за исключением множества направлений от Москвы и Санкт-Петербурга) присвоен случайный номер от 1 до 282 (столько всего направлений). Затем случайным образом выбиралось одно направление, которые условно отключалось, и с помощью блока «Маршрутизатор» имитировалась возможность прохождения сигнала во все российские регионы. Если потоки данных можно было перенаправить в обход отключенного направления, то связанность сохранялась. В противном случае определялся регион (регионы), потерявший связь с остальными субъектами Российской Федерации.

Чтобы исключить ошибки, случайный выбор одного направления выполнялся 1000 раз. Более сложной является ситуация одновременного отключения двух и более направлений. Для этого также случайным образом отбирались два, потом три и так до 28 направлений (одновременное отключение более 10 % направлений не рассматривалось из-за маловероятности этого в мирных условиях) и по каждой ситуации выполнялось 1000 отборов. После проведения всех имитаций был составлен список из 17 регионов (на октябрь 2024 г.), межрегиональная связь которых может быть прервана при одновременном случайном отключении до 28 направлений: Республики Адыгея, Алтай, Ингушетия, Крым, Северная Осетия-Алания и Тыва, Кабардино-Балкарская, Карачаево-Черкесская и Чеченская Республики, Камчатский и Приморский край, Калининградская, Магаданская и Мурманская области, Ненецкий и Чукотский автономные округа, г. Севастополь. Таким образом, единая оптоволоконная сеть связи Российской Федерации не является надежной. Для сохранения связанности российских регионов на ГеоИИ можно имитировать создание новых направлений с определением необходимого их количества, обеспечивающего целостность сети при различных сценариях негативного воздействия.

Положение региона в сети

В полном графе, где каждая вершина соединена ребрами со всеми остальными вершинами, не может быть вершин, занимающих более (менее) выгодное положение. Однако в реальных сетях, состоящих из древовидных и кольцеобразных структур соединения регионов, каждая вершина характеризуется специфическим положением, отражающим достигнутый уровень связанности на пути к пределу в виде полного графа. Применительно к рассматриваемой проблематике такое положение региона можно назвать телекоммуникационно-сетевым. Для его оценки предлагается использовать методику определения соседского экономико-географического положения [Блануца, 2025б]: относительно каждого региона определяются соседи первого порядка как территории, граничащие с рассматриваемым регионом; идентифицируются соседи второго, третьего и других порядков как соседи регионов предыдущего порядка; вводится коэффициент значимости соседства для каждого порядка (принят вариант двукратного уменьшения значимости при переходе к соседям следующего порядка); количество соседей одного порядка умножается на соответствующий коэффициент; суммируются результаты по всем порядкам, что дает количественную оценку положения региона в сети. Например, Белгородская область ($R01$) по магистральным линиям связи (см. рис. 2) имеет 2 соседа первого порядка ($R04$ и $R08$), 7 – второго (соседи $R04$ и $R08$), 9 – третьего порядка и т.д. Суммирование результатов умножения количества соседей на коэффициент по каждому порядку (относительно $R01$ имеется 16 порядков) дает итоговую оценку положения Белгородской области:

$$(2 \times 1) + (7 \times 0,5) + (9 \times 0,25) + \dots + (1 \times 0,00003051757) = 10,79$$

(округление до двух знаков после запятой)

Этот вариант оценки обозначим $TСП_1$. Другой вариант – $TСП_2$ – рассчитывается аналогичным образом с добавлением значимости связи через тип соединения регионов (умножение на количество баллов, соответствующее номеру типа; см. рис. 2). Для R01 получается:

$$(1 \times (5 + 5)) + (0,5 \times (1 + 5 + 3 + 3 + 5 + 3 + 5)) + (0,25 \times (5 + 5 + 3 + 5 + 5 + 3 + 1 + 3 + 5)) + \dots + (0,00003051757 \times 1) = 42,01$$

Ранжирование полученных значений позволяет определить место региона в телекоммуникационной сети России (результаты расчетов по одному федеральному округу приведены в таблице).

Телекоммуникационно-сетевое положение регионов Центрального федерального округа по двум версиям ($TСП_1$ и $TСП_2$) на октябрь 2024 года (составлено автором)
Telecommunications-network position (TNP) of the Central Federal Districts regions according to two versions (TNP_1 and TNP_2) as of October 2024 (compiled by the author)

Коды	Регионы	$TСП_1$		$TСП_2$	
		Значения	Ранги	Значения	Ранги
R01	Белгородская область	10,79	50	42,01	52
R02	Брянская область	13,44	32	47,13	48
R03	Владимирская область	16,12	13	66,75	8
R04	Воронежская область	17,37	6	67,56	7
R05	Ивановская область	10,76	51	43,19	50
R06	Калужская область	14,56	23	49,25	38
R07	Костромская область	12,70	40	50,37	34
R08	Курская область	13,46	31	51,18	33
R09	Липецкая область	16,52	10	55,07	29
R10	Московская область	18,43	3	77,51	2
R11	Орловская область	13,77	30	48,17	43
R12	Рязанская область	13,21	35	48,41	42
R13	Смоленская область	15,77	17	55,85	27
R14	Тамбовская область	16,82	9	60,90	16
R15	Тверская область	17,02	8	62,29	12
R16	Тульская область	16,47	11	63,34	10
R17	Ярославская область	15,83	15	62,08	13
R18	Город Москва	10,90	49	41,57	53

Сравнение в графе знаний рангов по двум версиям (по состоянию на октябрь 2024 г.) предоставляет возможность оценить влияние значимости (типа) соединения регионов. Более высокое место по $TСП_2$ демонстрирует эффективность реализации потенциала связей с другими территориями, а более высокое по $TСП_1$ – неиспользование регионом потенциальных возможностей. Первая ситуация характерна для 42, а вторая – для 34 регионов (9 регионов имели одинаковые ранги по обоим вариантам). В этом смысле наиболее эффективным оказался Пермский край (ранг 9 вместо 21), а наименее эффективными – Липецкая (29 вместо 10) и Калининградская (63 вместо 44) области. Для обобщения ранги можно перевести в квартили K1–K4 с местами, соответственно, 1–21, 22–42, 43–63 и 64–85. Это позволяет выделить в отечественной телекоммуникационной сети центр (регионы K1), полупериферию (K2), ближнюю периферию (K3) и дальнюю периферию (K4). Распределение регионов по квартилям $TСП_2$ указывает на территориальную структуру, идентифицированную в блоке «Интерпретатор» (см. рис. 1):

центральное размещение регионов $K1$ с ядром из семи территорий (от $R52$ ядро последовательно распространяется в направлении на $R53$, $R03$ и $R10$, а также в трех направлениях на $R20$, $R23$ и $R48$), смещение дальней периферии на восток (весь Дальневосточный федеральный округ, а также Республики Алтай и Тыва) и юг ($R30$, $R32$, $R37$ и $R39$ – $R43$) с единичным проявлением на севере России ($R26$), кольцеобразно-прерывистое расположение $K2$ вокруг $K1$ (северо-западный «разрыв» при переходе от $K1$ к $R19$, $R22$ и $R24$ при включенности $R29$ в $R25$, а также отдельные разрывы при переходах к $R01$, $R05$, $R11$, $R18$ и $R46$) и $K3$ вокруг $K2$ (переход от $K2$ сразу к $K4$ в соединениях $R33$ & $R32$, $R33$ & $R30$, $R69$ & $R66$, $R71$ & $R65$).

Распределение регионов по квартилям $ТСП_2$ (2024 г.) можно сравнить в графе знаний с другими аналогичными распределениями этих же регионов. Например, с соседским положением регионов по схеме административно-территориального деления Российской Федерации [Блануца, 20256], которое через «Интерпретатор» переведено в сопоставимые кварталы (89 регионов разделены на 4 группы с рангами 1–21, 22–42, 43–65 и 66–89). При этом более высокий ранг региона по $ТСП_2$ указывает на эффективное использование потенциала, заложенного в соседском положении, что характерно для $R15$, $R16$, $R17$, $R21$, $R25$, $R47$, $R49$ и $R55$ (все имели $K1$ вместо $K2$), $R06$, $R27$, $R28$, $R31$, $R33$, $R64$ и $R71$ ($K2$ вместо $K3$), $R24$, $R29$, $R34$, $R38$, $R68$ и $R72$ ($K3$ вместо $K4$), а наибольший «взлет» зафиксирован у $R63$ (Ямало-Ненецкий автономный округ; $K1$ вместо $K3$). При сравнении со значениями $ТСП_2$ в предыдущие годы выясняется, что «взлет» $R63$ произошел в 2021 г.

Каркас магистральной связи.

Неодинаковая связанность регионов друг с другом и их социально-экономическая неравнозначность порождают некоторую территориальную структуру в виде каркаса (остова, основы) как цепочки регионов, обеспечивающих надежное функционирование большей части сети. Остальные регионы, не вошедшие в каркас, являются дополнительными элементами, расширяющими территориальный охват сети. Выявление территориальной структуры является сложной эвристической операцией, зависящей от когнитивных способностей исследователя. Машинная имитация таких способностей наиболее эффективна при идентификации простых территориальных структур. Например, структура распределения регионов по квартилям $ТСП_2$, охарактеризованная выше, определялась путем задания в блоке «Интерпретатор» понятий «центр» ($R52$, окруженный регионами с $K1$), «север», «юг», «запад», «восток» и промежуточных понятий («северо-запад» и др.) с последующим позиционированием регионов $K2$ – $K4$ относительно этих понятий. Более сложной задачей является выявление каркаса в запутанном множестве телекоммуникационных соединений в магистральной сети связи [Интерактивная карта ..., 2024]. Для этого потребовалось привлечь данные о численности населения регионов [Оценка численности ..., 2024] и скорректировать список регионов. Последнее сделано для устранения противоречий связанности при размещении одних территорий внутри других. Так в нашем исследовании появились объединенные регионы $R(10, 18)$, $R(25, 29)$, $R(30, 33)$ и $R(32, 37)$. Позиционирование регионов осуществлялось путем введения понятия «центр» – $R(10, 18)$ – и понятий о четырех сторонах света относительно центра. Дополнительно выделялись субцентры на каждой стороне света как регионы с наибольшей людностью. По данным Росстата [Оценка численности ..., 2024], численность населения $R(10, 18)$ как «центра» составила 14,92 % от числа всех россиян, на север от центра наибольшая людность (5,22 %) была у $R(25, 29)$, на юг (4,33 %) – у $R(30, 33)$, на восток (2,89 %) – у $R60$, а на западе не нашлось региона, сопоставимого по людности с перечисленными субцентрами.

При такой постановке задачи определение каркаса заключалось в выявлении и сравнении между собой всех возможных цепочек регионов между центром и тремя субцентрами. В качестве критериев отбора цепочки выступали минимизация расстояния

по линиям электросвязи, а также максимизация людности, линий связи и типа соединения регионов. В графе знаний вся необходимая информация прикреплялась к вершинам, а затем по имеющейся схеме соединения регионов (см. рис. 2) определялись все цепочки и выбирались оптимальные варианты. В итоге ГеоИИ определил следующий каркас магистральной связи в России: северная ветвь от центра в виде последовательности *R15, R27, R(25, 29)*, южная ветвь как *R16, R09, R04, R36, R(30, 33)* и восточная ветвь в виде *R03, R53, R50, R48, R45, R64, R60*. На 19 регионов каркаса приходится 46,37 % населения России. Связь с остальными регионами не менее важна, но осуществляется через периферийное подключение к каркасу. Аналогичные расчеты по 2020–2023 гг. идентифицировали такой же каркас, что свидетельствует об его относительной устойчивости (по крайней мере, для анализируемой пятилетки).

Полученные данные и знания по трем аспектам телекоммуникационной связанности российских регионов предоставляют возможность задавать вопросы ГеоИИ по рассматриваемой проблематике. Например, на вопрос «Какие регионы в 2024 г. имели наибольший и наименьший порядок соседства в телекоммуникационной сети России?» получен ответ «Наименьший порядок (10) был у Республики Коми и Ханты-Мансийского автономного округа, а наибольший порядок (20) – у Чукотского автономного округа, Республик Ингушетия и Северная Осетия-Алания».

Заключение

Построение и применение системы геопространственного искусственного интеллекта позволило проанализировать телекоммуникационную связанность российских регионов. Установлено, что отечественная сеть магистральной связи не является устойчивой к случайному или преднамеренному отключению некоторых межрегиональных оптоволоконных линий и при существующей связанности у 17 регионов имеется риск потери соединения со всей территорией России. Оценка телекоммуникационно-сетевого положения предоставила возможность определить место каждого региона в единой оптоволоконной сети и его позицию в кольцеобразно-прерывистой территориальной структуре. В многообразии связанности регионов обнаружен каркас, состоящий из центра, трех субцентров и соединяющих их регионов. Полученные результаты являются первым шагом к пониманию сложности телекоммуникационной связанности регионов и ее оценки с помощью искусственного интеллекта. Дальнейшие исследования могут быть нацелены на совершенствование системы геопространственного искусственного интеллекта и изучение новых аспектов телекоммуникационной связанности (например, анализ межрегиональных потоков данных). Практическая значимость проведенного исследования связана с географической экспертизой и мониторингом реализации «Стратегии развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года».

Список источников

- Интерактивная карта «Магистральные сети связи в России». ComNews, 2020. Электронный ресурс.
URL: <https://www.comnews.ru/content/211042/2020-10-21/2020-w43/magistralnye-seti-svyazi-rossii> (дата обращения: 10.10.2025).
- Интерактивная карта «Магистральные сети связи в России». ComNews, 2021. Электронный ресурс.
URL: <https://www.comnews.ru/content/217974/2021-12-20/2021-w51/magistralnye-seti-svyazi-rossii-2021> (дата обращения: 10.10.2025).
- Интерактивная карта «Магистральные сети связи в России». ComNews, 2022. Электронный ресурс.
URL: <https://www.comnews.ru/content/223014/2022-11-28/2022-w48/magistralnye-seti-svyazi-rossii-2022> (дата обращения: 10.10.2025).

- Интерактивная карта «Магистральные сети связи в России». ComNews, 2023. Электронный ресурс. URL: <https://www.comnews.ru/content/230456/2023-12-20/2023-w51/1180/magistralnye-seti-svyazi-rossii-2023> (дата обращения: 10.10.2025).
- Интерактивная карта «Магистральные сети связи в России». ComNews, 2024. Электронный ресурс. URL: <https://www.comnews.ru/content/236040/2024-11-29/2024-w48/1180/magistralnye-seti-svyazi-rossii-2024> (дата обращения: 10.10.2025).
- Оценка численности постоянного населения по субъектам Российской Федерации на 1 января 2024 г. Федеральная служба государственной статистики, 2024. Электронный ресурс. URL: <https://docviewer.yandex.ru/view/1676819753/> (дата обращения: 10.10.2025).

Список литературы

- Блануца В.И. 2019. Информационно-сетевая география. Москва, ИНФРА-М, 243 с.
- Блануца В.И. 2025а. Создание первых автономных систем интернета в Сибири как пространственная диффузия инноваций. Пространственная экономика, 21(1): 7–32. <https://doi.org/10.14530/se.2025.1.007-032>
- Блануца В.И. 2025б. Оценка экономико-географического положения городов и регионов с помощью геопространственного искусственного интеллекта. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2: 40–48. <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/2/40-48>
- Полякова А.Г., Симарова И.С. 2014. Обоснование регионального развития с учетом связанности экономического пространства. Тюмень, Тюменский государственный нефтегазовый университет, 104 с.
- Попков В.К. 2000. Математические модели связности. Ч. 1. Графы и сети. Новосибирск, Изд-во ИВМиМГ СО РАН, 175 с.
- Черкашина Т.Ю., Мосиенко Н.Л., Калашникова К.Н. 2023. Связанность регионов юга Западной Сибири в индикаторах пространственной мобильности населения. Регион: экономика и социология, 4(120): 134–169. <https://doi.org/10.15372/REG20230406>
- Bailey M., Johnston D., Kuchler T., Russel D., State B., Stroebel J. 2020. The Determinants of Social Connectedness in Europe. In: Social Informatics (Lecture Notes in Computer Science). Cham, Springer Nature Switzerland: 1–14. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60975-7_1
- Bernard C., Villanova-Oliver M., Gensel J. 2022. Theseus: A Framework for Managing Knowledge Graphs about Geographical Divisions and Their Evolution. Transactions in GIS, 26(8): 3202–3224. <https://doi.org/10.1111/tgis.12988>
- Blanutsa V.I. 2024. Identification of Critical Telecommunications Infrastructure in Russia: A Geographical Approach. Geography and Natural Resources, 45(1): 1–8. <https://doi.org/10.1134/S1875372824700045>
- Boto-García D., Pérez L. 2023. The Effect of High-Speed Rail Connectivity and Accessibility on Tourism Seasonality. Journal of Transport Geography, 107(3): e103546. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2023.103546>
- Chen C., Tong H. 2022. Network Connectivity: Concepts, Computation, and Optimization. Cham, Springer Nature Switzerland, 151 p.
- Darwish D., Chemingui H. 2025. Recent Trends in Geospatial AI. New York, London, Beijing, IGI Global Scientific Publishing, 394 p.
- Das R., Mitra M., Singh C. 2023. Era of Artificial Intelligence. The 21st Century Practitioners' Approach. New York, Chapman & Hall/CRC, 166 p.
- Fensel D., Simsek U., Angele K., Huaman E., Kärle E., ... Wahler A. 2020. Knowledge Graphs: Methodology, Tools and Selected Use Cases. Cham, Springer Nature Switzerland, 147 p.
- Foster R.J. 2023. Tenuous Connectivity: Time, Citizenship, and Infrastructure in a Papua New Guinea Telecommunications Network. The Asia Pacific Journal of Anthropology, 24(2): 91–115. <https://doi.org/10.1080/14442213.2023.2177330>
- Gao S., Hu Y., Li W. 2023. Handbook of Geospatial Artificial Intelligence. Boca Raton, CRC Press, 468 p.
- Guo X., Qian H., Wu F., Liu J. 2021. A Method for Constructing Geographical Knowledge Graph from Multisource Data. Sustainability, 13(19): e10602. <https://doi.org/10.3390/su131910602>

- Han B., Qu T., Tong X., Wang H., Liu H., ... Cheng C. 2023. AugGKG: A Grid-Augmented Geographic Knowledge Graph Representation and Spatio-Temporal Query Model. *International Journal of Digital Earth*, 16(2): 4934–4957. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2290569>
- Han B., Qu T., Jiang J. 2025. GN-GCN: Grid Neighborhood-Based Graph Convolutional Network for Spatio-Temporal Knowledge Graph Reasoning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 220: 728–739. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2025.01.023>
- Hashemi R., Darabi H., Hashemi M., Wang J. 2024. Graph Theory in Ecological Network Analysis: A Systematic Review for Connectivity Assessment. *Journal of Cleaner Production*, 472: e143504. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143504>
- Jążdżewska I.A. 2021. Use of Graph Theory to Study Connectivity and Regionalisation of Polish Urban Network. *Area*, 54(2): 290–303. <https://doi.org/10.1111/area.12774>
- Kierner S., Kucharski J., Kierner Z. 2023. Taxonomy of hybrid Architectures Involving Rule-Based Reasoning and Machine Learning in Clinical Decision Systems: A Scoping Review. *Journal of Biomedical Informatics*, 144: e104428. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2023.104428>
- Kopczewska K. 2022. Spatial Machine Learning: New Opportunities for Regional Science. *The Annals of Regional Science*, 68(4): 713–755. <https://doi.org/10.1007/s00168-021-01101-x>
- Laita A., Kotiaho J.S., Monkkonen M. 2011. Graph-Theoretical Connectivity Measures: What do They Tell Us about Connectivity? *Landscape Ecology*, 26(7): 951–967. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9620-4>
- Liu P., Zhang Y., Biljecki F. 2024. Explainable Spatially Explicit Geospatial Artificial Intelligence in Urban Analytics. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 51(5): 1104–1123. <https://doi.org/10.1177/23998083231204689>
- Mai G., Hu Y., Gao S., Cai L., Martins B., ... Janowicz K. 2022. Symbolic and Subsymbolic GeoAI: Geospatial Knowledge Graphs and Spatially Explicit Machine Learning. *Transactions in GIS*, 26: 3118–3124. <https://doi.org/10.1111/tgis.13012>
- Mai G., Xie Y., Jia X., Lao N., Rao J., ... Jiao J. 2025. Towards the Next Generation of Geospatial Artificial Intelligence. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 136(1): e104368. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104368>
- Moilanen A. 2011. On the Limitations of Graph-Theoretical Connectivity in Spatial Ecology and Conservation. *Journal of Applied Ecology*, 48(6): 1543–1547. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02062.x>
- Nowak-Brzezińska A., Horyń C. 2020. Exploration of Outliers in If-Then Rule-Based Knowledge Bases. *Entropy*, 22(10): e1096. <https://doi.org/10.3390/e22101096>
- Papadakis E., Adams B., Gao S., Martins B., Baryannis G., Ristea A. 2022. Explainable artificial Intelligence in the Spatial Domain (X-GeoAI). *Transactions in GIS*, 26(6): 2413–2414. <https://doi.org/10.1111/tgis.12996>
- Prasad S., Chanussot J., Li J. 2024. *Advances in Machine Learning and Image Analytics for GeoAI*. Amsterdam, London, Cambridge, Elsevier, 364 p.
- Prawira N., Wella, Natalia F. 2025. Exploring the Role of Machine Learning and Big Data Analytics in Enhancing Decision-Making Processes: A Systematic Literature Review. *International Journal of Information Visualization*, 9(4): 1783–1791.
- Rajabi E., Etminani K. 2024. Knowledge-Graph-Based Explainable AI: A Systematic Review. *Journal of Information Science*, 50(4): 1019–1029. <https://doi.org/10.1177/01655515221112844>
- Rutherford J., Gillespie A., Richardson R. 2004. The Territoriality of Pan-European Telecommunications Backbone Networks. *Journal of Urban Technology*, 11(3): 1–34. <https://doi.org/10.1080/10630730500064166>
- Saleh H.J.H., Arrang J.R.T., de Barros Cardoso L.M.O. 2025. Applications of Geospatial AI in human geography and spatial networks: A literature review. *EDRAAK*, 2025: 76–84. <https://doi.org/10.70470/EDRAAK/2025/010>
- Tang H. 2020. Regional Patterns and Hierarchical Tendencies: Analysis of the Network Connectivity of 63 Service-Oriented Tourist Cities in China. *Sustainability*, 12(16): e6532. <https://doi.org/10.3390/su12166532>
- Tóth G., Elekes Z., Whittle A., Lee C., Kogler D.F. 2022. Technology Network Structure Conditions the Economic Resilience of Regions. *Economic Geography*, 98(4): 355–378. <https://doi.org/10.1080/00130095.2022.2035715>

- Tranos E., Gillespie A. 2011. The Urban Geography of Internet Backbone Networks in Europe: Roles and Relations. *Journal of Urban Technology*, 18(1): 35–50. <https://doi.org/10.1080/10630732.2011.578408>
- Tsiotas D. 2025. Socioeconomic Attributes in the Topology of the Intercity Road Network in Greece. *Future Transportation*, 5(1): e3. <https://doi.org/10.3390/futuretransp5010003>
- Wilke A., Ngonga Ngomo A.-C. 2023. LauNuts: A Knowledge Graph to Identify and Compare Geographic Regions in the European Union. In: *The Semantic Web*. Cham, Springer Nature Switzerland: 408–418. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33455-9_24
- Xing J., Sieber R. 2023. The Challenges of Integrating Explainable Artificial Intelligence into GeoAI. *Transactions in GIS*, 27(3): 626–645. <https://doi.org/10.1111/tgis.13045>
- Yan B. 2019. *Geographic Knowledge Graph Summarization*. Amsterdam, IOS Press, 168 p.
- Zang Y., Jiayang E., Fiondella L. 2024. A Network Reliability Analysis Method for Complex Real-Time Systems: Case Studies in Railway and Maritime Systems. *Mathematics*, 12(19): e3014. <https://doi.org/10.3390/math12193014>

References

- Blanutsa V.I. 2019. *Information Network Geography*. Moscow, Publ. INFRA-M, 243 p. (in Russian).
- Blanutsa V.I. 2025a. Creating the first Autonomous Systems of Internet in Siberia as a Spatial Diffusion of Innovations. *Spatial Economics*, 21(1): 7–32 (in Russian). <https://doi.org/10.14530/se.2025.1.007-032>
- Blanutsa V.I. 2025b. Assessment of Economic and Geographical Position of Cities and Regions Using Geospatial Artificial Intelligence. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*, 2: 40–48 (in Russian). <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/2/40-48>
- Polyakova A.G., Simarova I.S. 2014. Obosnovanie regional'nogo razvitiya s uchetom svyazannosti ekonomicheskogo prostranstva [Justification of Regional Development Taking into Account the Connectedness of the Economic Space]. Tyumen, Publ. Tyumenskiy gosudarstvennyy neftegazovyy universitet, 104 p.
- Popkov V.K. 2000. *Matematicheskie modeli svyaznosti*. Ch. 1. Grafy i seti [Mathematical Models of Connectivity. Part 1. Graphs and Networks]. Novosibirsk, Publ. Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 175 p.
- Cherkashina T.Yu., Mosienko N.L., Kalashnikova K.N. 2023. Examining Regional Connectivity in Southern Western Siberia Through Population Mobility Indicators. *Region: Economics and Sociology*, 4(120): 134–169 (in Russian). <https://doi.org/10.15372/REG20230406>
- Bailey M., Johnston D., Kuchler T., Russel D., State B., Stroebel J. 2020. The Determinants of Social Connectedness in Europe. In: *Social Informatics (Lecture Notes in Computer Science)*. Cham, Springer Nature Switzerland: 1–14. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60975-7_1
- Bernard C., Villanova-Oliver M., Gensel J. 2022. Theseus: A Framework for Managing Knowledge Graphs about Geographical Divisions and Their Evolution. *Transactions in GIS*, 26(8): 3202–3224. <https://doi.org/10.1111/tgis.12988>
- Blanutsa V.I. 2024. Identification of Critical Telecommunications Infrastructure in Russia: A Geographical Approach. *Geography and Natural Resources*, 45(1): 1–8. <https://doi.org/10.1134/S1875372824700045>
- Boto-García D., Pérez L. 2023. The Effect of High-Speed Rail Connectivity and Accessibility on Tourism Seasonality. *Journal of Transport Geography*, 107(3): e103546. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2023.103546>
- Chen C., Tong H. 2022. *Network Connectivity: Concepts, Computation, and Optimization*. Cham, Springer Nature Switzerland, 151 p.
- Darwish D., Chemingui H. 2025. *Recent Trends in Geospatial AI*. New York, London, Beijing, IGI Global Scientific Publishing, 394 p.
- Das R., Mitra M., Singh C. 2023. *Era of Artificial Intelligence. The 21st Century Practitioners' Approach*. New York, Chapman & Hall/CRC, 166 p.
- Fensel D., Simsek U., Angele K., Huaman E., Kärle E., ... Wahler A. 2020. *Knowledge Graphs: Methodology, Tools and Selected Use Cases*. Cham, Springer Nature Switzerland, 147 p.

- Foster R.J. 2023. Tenuous Connectivity: Time, Citizenship, and Infrastructure in a Papua New Guinea Telecommunications Network. *The Asia Pacific Journal of Anthropology*, 24(2): 91–115. <https://doi.org/10.1080/14442213.2023.2177330>
- Gao S., Hu Y., Li W. 2023. *Handbook of Geospatial Artificial Intelligence*. Boca Raton, CRC Press, 468 p.
- Guo X., Qian H., Wu F., Liu J. 2021. A Method for Constructing Geographical Knowledge Graph from Multisource Data. *Sustainability*, 13(19): e10602. <https://doi.org/10.3390/su131910602>
- Han B., Qu T., Tong X., Wang H., Liu H., ... Cheng C. 2023. AugGKG: A Grid-Augmented Geographic Knowledge Graph Representation and Spatio-Temporal Query Model. *International Journal of Digital Earth*, 16(2): 4934–4957. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2290569>
- Han B., Qu T., Jiang J. 2025. GN-GCN: Grid Neighborhood-Based Graph Convolutional Network for Spatio-Temporal Knowledge Graph Reasoning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 220: 728–739. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2025.01.023>
- Hashemi R., Darabi H., Hashemi M., Wang J. 2024. Graph Theory in Ecological Network Analysis: A Systematic Review for Connectivity Assessment. *Journal of Cleaner Production*, 472: e143504. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143504>
- Jazdzewska I.A. 2021. Use of Graph Theory to Study Connectivity and Regionalisation of Polish Urban Network. *Area*, 54(2): 290–303. <https://doi.org/10.1111/area.12774>
- Kierner S., Kucharski J., Kierner Z. 2023. Taxonomy of hybrid Architectures Involving Rule-Based Reasoning and Machine Learning in Clinical Decision Systems: A Scoping Review. *Journal of Biomedical Informatics*, 144: e104428. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2023.104428>
- Kopczewska K. 2022. Spatial Machine Learning: New Opportunities for Regional Science. *The Annals of Regional Science*, 68(4): 713–755. <https://doi.org/10.1007/s00168-021-01101-x>
- Laita A., Kotiaho J.S., Monkkonen M. 2011. Graph-Theoretical Connectivity Measures: What do They Tell Us about Connectivity? *Landscape Ecology*, 26(7): 951–967. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9620-4>
- Liu P., Zhang Y., Biljecki F. 2024. Explainable Spatially Explicit Geospatial Artificial Intelligence in Urban Analytics. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 51(5): 1104–1123. <https://doi.org/10.1177/23998083231204689>
- Mai G., Hu Y., Gao S., Cai L., Martins B., ... Janowicz K. 2022. Symbolic and Subsymbolic GeoAI: Geospatial Knowledge Graphs and Spatially Explicit Machine Learning. *Transactions in GIS*, 26: 3118–3124. <https://doi.org/10.1111/tgis.13012>
- Mai G., Xie Y., Jia X., Lao N., Rao J., ... Jiao J. 2025. Towards the Next Generation of Geospatial Artificial Intelligence. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 136(1): e104368. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104368>
- Moilanen A. 2011. On the Limitations of Graph-Theoretical Connectivity in Spatial Ecology and Conservation. *Journal of Applied Ecology*, 48(6): 1543–1547. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02062.x>
- Nowak-Brzezińska A., Horyń C. 2020. Exploration of Outliers in If-Then Rule-Based Knowledge Bases. *Entropy*, 22(10): e1096. <https://doi.org/10.3390/e22101096>
- Papadakis E., Adams B., Gao S., Martins B., Baryannis G., Ristea A. 2022. Explainable artificial Intelligence in the Spatial Domain (X-GeoAI). *Transactions in GIS*, 26(6): 2413–2414. <https://doi.org/10.1111/tgis.12996>
- Prasad S., Chanussot J., Li J. 2024. *Advances in Machine Learning and Image Analytics for GeoAI*. Amsterdam, London, Cambridge, Elsevier, 364 p.
- Prawira N., Wella, Natalia F. 2025. Exploring the Role of Machine Learning and Big Data Analytics in Enhancing Decision-Making Processes: A Systematic Literature Review. *International Journal of Information Visualization*, 9(4): 1783–1791.
- Rajabi E., Etminani K. 2024. Knowledge-Graph-Based Explainable AI: A Systematic Review. *Journal of Information Science*, 50(4): 1019–1029. <https://doi.org/10.1177/01655515221112844>
- Rutherford J., Gillespie A., Richardson R. 2004. The Territoriality of Pan-European Telecommunications Backbone Networks. *Journal of Urban Technology*, 11(3): 1–34. <https://doi.org/10.1080/10630730500064166>
- Saleh H.J.H., Arrang J.R.T., de Barros Cardoso L.M.O. 2025. Applications of Geospatial AI in human geography and spatial networks: A literature review. *EDRAAK*, 2025: 76–84. <https://doi.org/10.70470/EDRAAK/2025/010>

- Tang H. 2020. Regional Patterns and Hierarchical Tendencies: Analysis of the Network Connectivity of 63 Service-Oriented Tourist Cities in China. *Sustainability*, 12(16): e6532. <https://doi.org/10.3390/su12166532>
- Tóth G., Elekes Z., Whittle A., Lee C., Kogler D.F. 2022. Technology Network Structure Conditions the Economic Resilience of Regions. *Economic Geography*, 98(4): 355–378. <https://doi.org/10.1080/00130095.2022.2035715>
- Tranos E., Gillespie A. 2011. The Urban Geography of Internet Backbone Networks in Europe: Roles and Relations. *Journal of Urban Technology*, 18(1): 35–50. <https://doi.org/10.1080/10630732.2011.578408>
- Tsiotas D. 2025. Socioeconomic Attributes in the Topology of the Intercity Road Network in Greece. *Future Transportation*, 5(1): e3. <https://doi.org/10.3390/futuretransp5010003>
- Wilke A., Ngonga Ngomo A.-C. 2023. LauNuts: A Knowledge Graph to Identify and Compare Geographic Regions in the European Union. In: *The Semantic Web*. Cham, Springer Nature Switzerland: 408–418. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33455-9_24
- Xing J., Sieber R. 2023. The Challenges of Integrating Explainable Artificial Intelligence into GeoAI. *Transactions in GIS*, 27(3): 626–645. <https://doi.org/10.1111/tgis.13045>
- Yan B. 2019. *Geographic Knowledge Graph Summarization*. Amsterdam, IOS Press, 168 p.
- Zang Y., Jiaxiang E., Fiondella L. 2024. A Network Reliability Analysis Method for Complex Real-Time Systems: Case Studies in Railway and Maritime Systems. *Mathematics*, 12(19): e3014. <https://doi.org/10.3390/math12193014>

Поступила в редакцию 07.11.2025;
поступила после рецензирования 25.12.2025;
принята к публикации 11.02.2026

Received November 07, 2025;
Revised December 25, 2025;
Accepted February 11, 2026

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Блануца Виктор Иванович, доктор географических наук, эксперт РАН по экономическим наукам, ведущий научный сотрудник, Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Viktor I. Blanutsa, Doctor of Geographical Sciences, RAS Expert in Economic Sciences, Leading Researcher, Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

УДК 556.55(571.151)
DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-3-619-633
EDN KXXESY

Лимнологические исследования озер Республики Алтай с использованием диатомового метода

¹Попова Д.Н., ¹Левина С.Н., ¹Пестрякова Л.А., ²Рудая Н.А.

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова
Россия, 677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58

²Институт археологии и этнографии СО РАН

Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 17

diananp-92@mail.ru, levina_sardan@mail.ru, lapest@mail.ru, nrudaya@gmail.com

Аннотация. Диатомовые водоросли, являясь биоиндикаторами изменений окружающей среды, представляют собой важный ресурс для оценки современного состояния озер. Однако для многих водоемов Республики Алтай подобные исследования ранее не проводились. Данная работа призвана заполнить этот пробел в знаниях, предоставляя репрезентативные данные, необходимые для проведения мониторинга, служащие основой для калибровки в палеоэкологических исследованиях. В основу исследования положен комплексный анализ морфометрических и физико-химических показателей 25 озер Республики Алтай, расположенных на различных гипсометрических уровнях. Морфометрический анализ выявил, что большинство озер на исследуемой территории – малые, с округлой береговой линией и овальными котловинами. Глубины распределены неравномерно, с максимальной отметкой 323 м (озеро Телецкое). Воды в основном пресные, мягкие и слабощелочные, гидрокарбонатного класса, кальциевой группы. Для характеристики современного состояния водоемов и его влияния на биоту особое внимание уделено диатомеям из поверхностного слоя донных отложений (0–1 см) как индикаторной группе гидробионтов. В результате исследования было выявлено 219 видов водорослей (в т.ч. 6 разновидностей и форм), относящихся к 80 родам, 32 семействам, 15 порядкам и трем классам отдела *Bacillariophyta*. Наиболее многочисленным оказался класс *Bacillariophyceae*.

Ключевые слова: диатомовый анализ, поверхностные донные отложения, палеолимнология, Республика Алтай, озера, гидрохимия, морфометрия озер

Благодарности. Работа выполнена при поддержке НИР № FWZG-2025-0005 «Природные условия обитания древнего человека в четвертичном периоде Евразии» (Рудая Н.А. работала в рамках этого проекта) и по проектной части государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования РФ по заданию FSRG-2023-0027.

Для цитирования: Попова Д.Н., Левина С.Н., Пестрякова Л.А., Рудая Н.А. 2026. Лимнологические исследования озер Республики Алтай с использованием диатомового метода. Региональные геосистемы, 50(3): 619–633. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-619-633 EDN: KXXESY

Limnological Studies of Lakes in the Altai Republic Using the Diatom Method

¹Diana N. Popova, ¹Sardana N. Levina, ¹Ludmila A. Pestryakova, ²Natalia A. Rudaya

¹M.K. Ammosov North-Eastern Federal University
58 Belinsky St., Yakutsk 677000, Russia

²Institute of Archeology and Ethnography SB RAS

17 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

diananp-92@mail.ru, levina_sardan@mail.ru, lapest@mail.ru, nrudaya@gmail.com

© Попова Д.Н., Левина С.Н., Пестрякова Л.А., Рудая Н.А., 2026

Abstract. Diatoms, as bioindicators of environmental change, are an important resource for assessing the current state of lakes. However, similar studies have not previously been conducted for many water bodies in the Altai Republic. This study aims to fill this knowledge gap by providing representative data necessary for monitoring and serving as a basis for calibration in paleoecological studies. The study is based on a comprehensive analysis of the morphometric and physicochemical parameters of 25 lakes in the Altai Republic, located at different hypsometric levels. According to the morphometric analysis, most of the lakes in the study area are small, with rounded shorelines and oval basins, depths are unevenly distributed, with a maximum of 323 m (Lake Teletskoye). The waters are mostly fresh, soft and slightly alkaline, of the bicarbonate class, and of the calcium group. To characterize the current state of the water bodies and its impact on biota, special attention is paid to diatoms from the surface layer of bottom sediments (0–1 cm) as an indicator group of aquatic organisms. The study identified 219 algal species (including six varieties and forms) belonging to 80 genera, 32 families, 15 orders and three classes of the division *Bacillariophyta*. The class *Bacillariophyceae* turned out to be the most numerous. Among the diatom species under study, 27 were found to be dominant and 25 were subdominant. The ecological-geographical structure was characterized based on four groups of traits (diatom association with different biotopes, salinity, pH and geographic distribution). Cluster analysis of the relative abundance of diatoms revealed three distinct zones. These zones demonstrate differences in altitudinal zonation, diatom concentration, and habitat ecological characteristics.

Keywords: diatom analysis, surface bottom sediments, paleolimnology, Altai Republic, lakes, hydrochemistry, lake morphometry

Acknowledgements: The work was carried out with the support of research project No. FWZG-2025-0005 “Natural habitat conditions of ancient humans in the Quaternary period of Eurasia” (N.A. Rudaya worked within the framework of this project) and the project part of the state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under assignment FSRG-2023-0027.

For citation: Popova D.N., Levina S.N., Pestryakova L.A., Rudaya N.A. 2026. Limnological Studies of Lakes in the Altai Republic Using the Diatom Method. Regional Geosystems, 50(3): 619–633 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-619-633 EDN: KXXESY

Введение

Республика Алтай – это регион Российской Федерации, расположенный в самом сердце Евразии, на юге Западной Сибири, в горах Южного Алтая. Этот край известен своей первозданной природой, богатым культурным наследием и широкими возможностями для туризма. Недаром его считают одним из самых экологически чистых уголков нашей страны. Особенно впечатляют многочисленные озера Алтая, особенно в его восточной части. Эти озера типичны для территорий, которые подвергались оледенению, поскольку большинство из них образовались в результате деятельности ледников в период позднего плейстоцена и голоцена [Шпилюкова, 1980; Михайлов, 1994; Новиков, 2004].

Однако, несмотря на свою эстетическую ценность, высокогорные озера Алтая остаются недостаточно изученными с точки зрения их палеоэкологического потенциала. В научной литературе представлены отдельные исследования, посвященные либо на лимнологических [Селегей В.В., Селегей Т.С., 1974; Рождественская и др., 2008; Долматова, 2008, 2011; Фролова и др., 2011; Веснина и др., 2019; Бородин Е.В., Бородин У.О., 2019; Киприянова и др., 2024], либо на палинологических аспектах [Чернова и др., 1991; Blyakharchuk et al., 2004, 2007, 2008; Andreev et al., 2007; Schlutz, Lehmkuhl, 2007; Бляхарчук, 2008; Рудая, 2022; Karachurina et al., 2023]. Многие работы, посвященные изучению озер Республики Алтай, концентрируются на изучении отдельных компонентов экосистем, например, связанным с планктоном [Vnukovskaya et al., 2024; Rudaya et al., 2025; и др.] либо диатомовым водорослям [Westover et al., 2006; Митрофанова, 2009; Митрофанова, Сутченкова, 2014; Бляхарчук и др., 2015].

Целью данного исследования является анализ морфометрических и физико-химических характеристик озер, чтобы оценить их современное состояние и как оно влияет на уязвимые группы гидробионтов – диатомовые водоросли. Водоросли были обнаружены в верхнем слое донных отложений озер Республики Алтай. Анализ этих отложений позволяет

оценить масштабы и характер сравнительно недавних изменений окружающей среды, являющихся результатом естественных процессов и деятельности человека.

Практическая значимость исследования заключается в том, что его результаты могут быть применены для решения задач в области водопользования и для мониторинга окружающей среды. Кроме того, полученные данные могут служить основой для калибровки в палеоэкологических исследованиях.

Объекты и методы исследования

В рамках нашего исследования мы изучили 25 озер, расположенных в Республике Алтай на различных высотах над уровнем моря. В соответствии с общепринятым физико-географическим районированием Алтая, территория Республики Алтай разделена на шесть провинций. Изученные нами озера расположены в пределах четырех из этих провинций, как показано на рис. 1. Они простираются с севера на юг, начиная с 51°57' с. ш., где находится озеро Телецкое (координаты 51.57366, 87.66541), и до 49°31' с. ш., где расположено Безымянное-4 (координаты 49.310556, 87.473611). Абсолютные высоты озер варьируются от 430 м (Телецкое) до 2468 м (Верхние Богуты) над уровнем моря.

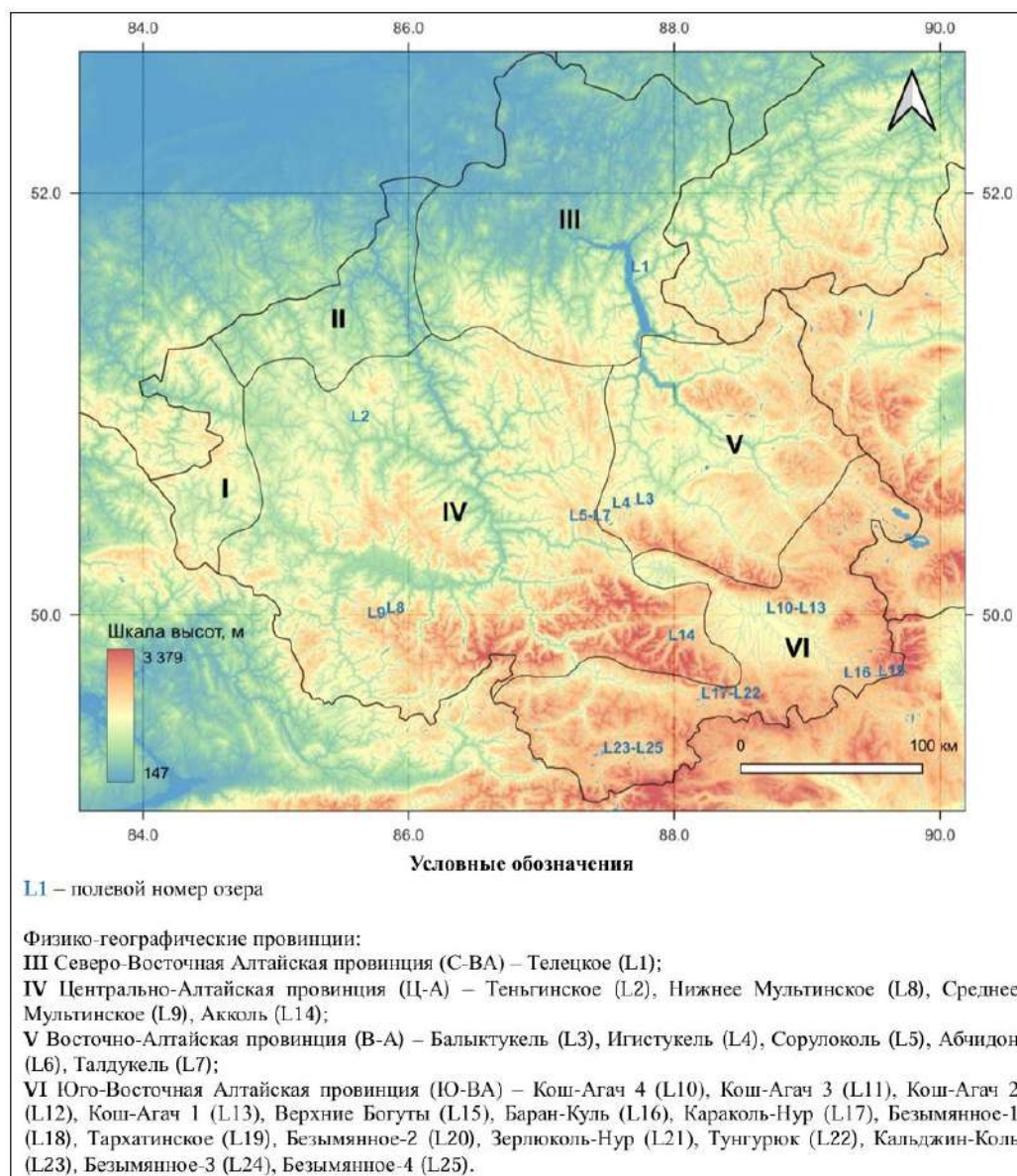


Рис. 1. Карта-схема расположения исследованных озер по провинциям Республики Алтай
Fig. 1. Map showing the location of the studied lakes in the provinces of the Altai Republic

Пробы донных отложений отбирали в период полевых работ 2019–2023 гг. Для этой публикации мы отобрали верхний полужидкий слой осадка (0–1 см) и проанализировали его с помощью диатомового метода. Техническая обработка проб и приготовление препаратов для микроскопии проведены по общепринятым методикам [Давыдова, 1985; Пестрякова и др., 2016; и др.].

Идентификацию таксонов и их систематизацию выполняли на основе классических и современных определителей [Забелина и др., 1951; Диатомовые водоросли..., 1992; Генкал и др., 2011; 2013; и др.], а также с помощью глобальной базы данных *AlgaeBase* для верификации и уточнения номенклатуры. Экологическая и географическая характеристика водорослей дана по Н.Н. Давыдовой [1985] с учетом системы Round, Crawford, Mann [1990].

Для статистической обработки результатов диатомового анализа мы использовали программу *TILIA 2*. В ней мы построили диаграмму и провели кластерный анализ методом *CONISS*. Процентные соотношения и визуализация данных осуществлялись в *Microsoft Excel 2016*. Карта района исследования была создана с использованием *QGIS 3.30.1-Hertogenbosch*. Треугольные диаграммы ионного состава вод построены в программе *Grapher v25*.

В ходе исследований выполнен комплекс морфометрических измерений, позволивший охарактеризовать ключевые параметры озер: площадь водной поверхности, длина и ширина озера, а также протяженность береговой линии. Эти данные позволили рассчитать такие показатели, как удлиненность и степень развития (изрезанность) береговой линии. Озера были классифицированы по величине площади водного зеркала, согласно системе, предложенной П.В. Ивановым [1948]. Форма озерной котловины и их удлиненность были определены по методике С.В. Григорьева [1959]. Кроме того, озера были охарактеризованы по максимальным глубинам, используя классификацию С.П. Китаева [2007]. Ключевые физико-химические параметры воды были измерены непосредственно в полевых условиях с помощью портативного мультипараметрового прибора *HI198194 (Hanna Instruments)*.

Результаты и их обсуждение

Основные морфометрические характеристики изученных озер Республики Алтай представлены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Основные морфометрические параметры исследуемых озер
Main morphometric characteristics of the studied lakes

Характеристики озер		Группа озер по физико-географическим провинциям			
		III	IV	V	VI
		Северо-Восточная Алтайская	Центрально-Алтайская	Восточно-Алтайская	Юго-Восточная Алтайская
		(n = 1)	(n = 4)	(n = 5)	(n = 15)
Высота над уровнем моря, м		434	<u>1102–2323</u> 1672	<u>1810–1925</u> 1847	<u>1760–2468*</u> 2217
Площадь водной поверхности, км ²		227,3	<u>0,7–1,8</u> 1,2	<u>0,3–3,3</u> 1,4	<u>0,1–3,9</u> 0,9
Длина береговой линии, км		192,8	<u>4,6–6,3</u> 5,1	<u>2,4–13,3</u> 6,3	<u>0,9–12,2</u> 5
Длина озера, км		78,6	<u>1,6–2,4</u> 2	<u>0,5–3,6</u> 1,9	<u>0,3–4,6</u> 1,6
Ширина, км	средняя	2,9	<u>0,3–0,9</u> 0,6	<u>0,6–0,9</u> 0,7	<u>0,2–1,1</u> 0,4
	наибольшая	5,2	<u>0,4–1,2</u> 0,8	<u>0,9–1,3</u> 1,1	<u>0,2–2,4</u> 0,6
Наибольшая глубина, м		323	<u>7,2–22</u> 15	<u>12,5–28,6</u> 18,7	<u>1,2–43</u> 12,01
Показатель удлиненности		27,2	<u>1,9–7,3</u> 3,9	<u>0,9–3,9</u> 2,6	<u>0,9–13,3</u> 3,7
Изрезанность береговой линии		3,6	<u>1,1–1,7</u> 1,4	<u>1,3–2,1</u> 1,5	<u>0,8–2,7</u> 1,5

Примечание: здесь и далее для каждого показателя в числителе указан разброс значений от минимума до максимума, а в знаменателе – их среднее значение. Жирным шрифтом на сером фоне отмечены максимальные показатели по выборке.

Среди исследованных озер выделяется Телецкое озеро, расположенное в Северо-Восточной Алтайской провинции. Это одно из крупнейших озер региона, имеющее тектоническое происхождение [Михайлов, 1994]. Его площадь составляет 227,3 км², а максимальная глубина достигает 323 м. Из-за своих внушительных размеров морфометрические характеристики Телецкого озера значительно превосходят показатели других озер, что создает большой разброс данных в общей выборке.

В соответствии с классификацией П.В. Иванова [1948], из изученных озер 15 (60 %) можно отнести к категории «очень малых», а 9 (36 %) – к «малым» (табл. 2). К «большим» относится только озеро Телецкое.

Таблица 2
Table 2

Классификация озер по морфометрическим параметрам
Classification of lakes by morphometric parameters

Показатель водоема	Группа озер			
	III	IV	V	VI
	Северо-Восточная Алтайская (n = 1)	Центрально-Алтайская (n = 4)	Восточно-Алтайская (n = 5)	Юго-Восточная Алтайская (n = 15)
По величине площади водного зеркала (по П.В. Иванову)				
Большие (от 100,1 до 1000 км ²)	1	–	–	–
Малые (от 1,0 до 10 км ²)	–	2	3	4
Очень малые (от 0,1 до 1,0 км ²)	–	2	2	11
По максимальной глубине (по С.П. Китаеву)				
С очень большой (> 50 м)	1	–	–	–
С большой (от 25 до 50 м)	–	–	1	3
С повышенной (от 12,5 до 25 м)	–	3	4	–
Со средней (от 6,25 до 12,5 м)	–	1	–	4
С малой (от 3,12 до 6,25 м)	–	–	–	2
С очень малой (< 3,12 м)	–	–	–	6
По коэффициенту удлиненности ($K_{удл}$) (по С.В. Григорьеву)				
Вытянутая (> 10,0)	1	–	–	1
Удлиненная (7,0–10,0)	–	1	–	–
Овально-удлиненная (5,0–7,0)	–	–	–	2
Близкая к овалу (3,0–5,0)	–	2	2	5
Близкая к кругу (1,5–3,0)	–	1	2	4
Округлая (< 1,5)	–	–	1	3
По степени развития береговой линии				
Слабоизрезанная (2,0–6,0)	1	–	1	2
Округлая (< 2,0)	–	4	4	13

Согласно классификации С.П. Китаева [2007], озера с максимальной глубиной от 1,2 до 323 м разделяются на шесть групп. Распределение озер по категориям глубины оказалось неравномерным (см. табл. 2).

По классификации С.В. Григорьева [1959], среди озерных котловин преобладают водоемы, близкие по форме к овалу (36 %) и окружности (28 %). За ними следуют озера с округлой формой (16 %). В значительно меньшей степени встречаются озера овально-удлиненной формы и вытянутые в виде «борозды» (по 8 %), а удлиненной формой всего 4 %.

Большинство озер имеют округлую береговую линию с коэффициентом изрезанности < 2, что составляет 84 %. Остальные 16 % обладают слабоизрезанной береговой линией.

В целом, для озер, расположенных в Центрально-Алтайской, Восточно-Алтайской и Юго-Восточной Алтайской провинциях, характерны следующие особенности: 1) они

находятся на значительной высоте над уровнем моря (от 1102–2468 м); 2) имеют относительно небольшие площади водного зеркала, классифицируясь как «малые» и «очень малые»; 3) их форма близка к овалу, а коэффициент удлинённости небольшой; 4) степень развития береговой линии можно описать как «округлая».

Результаты физико-химических исследований продемонстрировали широкий диапазон минерализации воды в изученных точках – от 39,65 (Балыктукель) до 438 мг/л (Абчидон-1). По степени минерализации пробы распределились следующим образом: 40 % вод были отнесены к категории с очень малой, 30 % – к малой и 21 % – к средней минерализации. Для 9 % объектов (озера Акколь, Верхние Богуты и Баран-Куль) данные о минерализации отсутствуют.

Согласно классификации О.А. Алекина [1970], воды исследованной территории в целом относятся к гидрокарбонатному классу и кальциевой группе. К этому типу принадлежит вода озера Телецкое (С-ВА), а также 67 % вод Центрально-Алтайской, 100 % – Восточно-Алтайской и 93 % – Юго-Восточной Алтайской провинций.

В соответствии с классификацией характеристик вод по Курлову [1928], 31 % исследованных проб воды можно отнести к ультрапресным, а 60 % – пресным. Для 9 % объектов данные отсутствуют.

Результаты измерений показали, что водородный показатель (pH) в исследованных пробах варьировался в диапазоне от 6,1 до 8,8. Преобладали слабощелочные (49 %) и щелочные (39 %) воды, а слабокислая среда была зафиксирована лишь в одной пробе. Для 9 % проб данные отсутствуют.

В ходе исследования была проанализирована общая жесткость воды. Исследование показало, что по общей жесткости 36 % проб относятся к очень мягкой воде, 49 % – к мягкой и 6 % – к воде средней жесткости. Данные по оставшимся 9 % озер отсутствуют.

Что касается ионного состава, то в структуре катионов можно выделить несколько важных элементов (рис. 2).

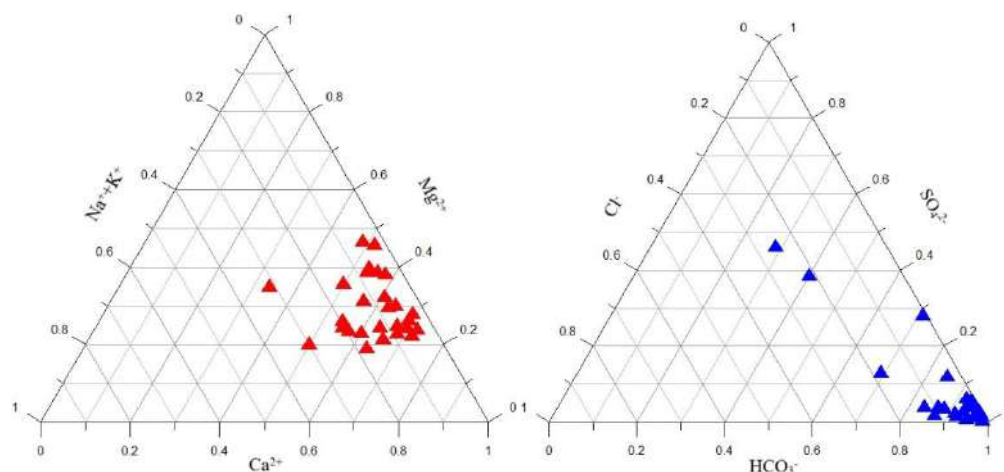


Рис. 2. Катионный и анионный состав вод исследуемых озер
Fig. 2. Cationic and anionic composition of the waters of the studied lakes

Ионы кальция в озерах варьируют в диапазоне от 0,45 в Балыктукель-2 до 42 мг/л в Теньгинское. Ионы магния изменяются от 0,19 в Балыктукель-2 до 40 мг/л в Теньгинское. Суммарная доля ионов натрия и калия колеблется от 0,66 в Балыктукель-2 до 69,15 в Кош-Агач-1.

В структуре анионов можно выделить несколько ключевых компонентов. Содержание хлорид-ионов в пробах варьирует от 0,16 в Караколь-Нур-4 до 40,56 мг/л в Кош-Агач-1. Сульфат-ионы представлены в диапазоне от 0,94 в Безымянное-1 до

54,72 мг/л в Кош-Агач-4. Наконец, содержание гидрокарбонатов колеблется от 22 в Среднее Мультиинское до 273,9 мг/л в Кош-Агач-1.

Для более глубокого понимания качества водной среды был проведен диатомовый анализ. Всего в донных отложениях 25 обследованных озер (33 точки отбора проб) идентифицировано 219 таксонов диатомовых водорослей (включая 6 разновидностей), относящихся к 80 родам, 32 семействам, 15 порядкам и 3 классам отдела *Bacillariophyta*. Самым многочисленным классом является класс *Bacillariophyceae*, на долю которого приходится 89 % видового богатства от всей выборки. В этом классе зарегистрировано 11 порядков, 28 семейств, 70 родов, 194 вида и разновидности.

Наиболее распространенными семействами в исследованных озерах являются *Achnanthesiaceae*, насчитывающее 10 родов, *Cymbellaceae* с 9 родами и *Stephanodiscaceae* с 6 родами. Другие классы значительно уступают описанному выше классу. Распределение видового богатства диатомовых водорослей в исследуемых озерах представлено на рис. 3.

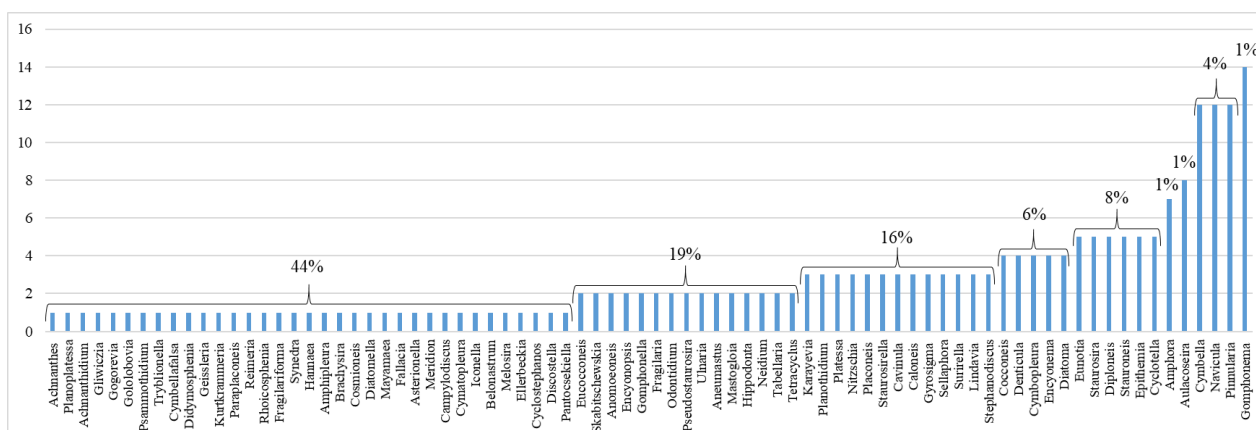


Рис. 3. Распределение видового богатства диатомовых водорослей по родам

Fig. 3. Distribution of diatom species abundance by genera

Среди выявленных доминантных (27 видов) и субдоминантных (25 видов) форм диатомей наиболее значительную роль в исследованных озерах играют несколько видов. Абсолютным доминантом является *Staurosira venter*, отмеченный в 16 озерах (20 точках отбора) с наибольшим показателем 81,13 % в точке L13. Виды *Staurosirella pinnata* в 6 озерах (8 пробах) с максимумом 33,14 % в точке L17-1, *Pseudostaurosira brevistriata* в 3 озерах (4 пробах) с пиком 30,96 % в точке L2-2, и *Staurosira construens* (максимум 32,09 % в озере L24) в 3 озерах и 4 точках.

Количественные данные по экологическим предпочтениям местообитаний в исследованных озерах (табл. 3) свидетельствуют о том, что в изученных диатомовых комплексах количество видов обрастателей значительно преобладает над донными и планктонными формами (59 %). Далее следует группа планктонных видов (22 %), а донные виды занимают 19 % во флоре.

Анализ показал крайне высокую вариабельность концентрации диатомовых створок в донных отложениях. Максимальная концентрация створок диатомей (6504 млн ств./г) зафиксирована в осадках Теньгинского озера, минимальный показатель обнаружен в озере Кош-Агач-3 (3 млн ств./г).

По отношению к температурным условиям среди флоры преобладают космополитные виды, составляющие 62 %. Далее следуют бореальные виды, занимающие 20 %, и арктоальпийские холодноводные формы, представленные 12 % флоры. В озере 1 Балыктукель космополитные виды достигают до 91 %, что свидетельствует о широком диапазоне температур, в то время как в озере 3 Абчидон доля бореальных видов возрастает до 73 %.

Таблица 3
Table 3

Эколого-географическая характеристика флоры диатомовых комплексов
Ecological and geographical characteristics of the flora of diatom complexes

Группы	Группа озер							
	III		IV		V		VI	
	Северо-Восточная Алтайская		Центрально-Алтайская		Восточно-Алтайская		Юго-Восточная Алтайская	
	(n = 2)		(n = 5)		(n = 10)		(n = 16)	
	1*	2*	1	2	1	2	1	2
По отношению к местообитанию								
донные	25	6	34	7	38	33	44	16
обрастатели	53	54	52	72	44	29	48	73
планктонные	22	40	14	21	18	38	8	11
По отношению к солености								
мезогалофы	–	–	2	1	2	1	1	1
галофилы	6	5	6	2	10	1	6	2
индифференты	59	66	70	87	67	89	66	92
галофобы	10	4	7	5	7	6	9	1
с неясной экологией	25	25	15	5	14	3	18	4
По отношению к pH								
алкалибионты	8	4	11	5	9	1	7	3
алкалифилы	47	29	36	65	48	77	44	85
нейтрофилы	14	41	26	19	20	17	22	6
ацидофилы	4	1	8	3	3	1	7	1
ацидобионты	–	–	1	1	–	–	–	–
с неясной экологией	27	25	18	7	20	4	20	5
По биогеографическому предпочтению								
арктоальпийские	14	8	15	14	12	23	12	5
бореальные	25	10	33	17	37	25	37	19
космополитные	36	57	35	62	37	49	33	71
с неясной географией	25	25	17	7	14	3	18	5

Примечание: * – доля в % по числу видов; ** – доля в % по численности створок.

Большинство видов (89 %) не чувствительны к солености. 5,5 % флоры не имеют четкой экологии, 3,2 % составляют галофобы, 2,3 % – галофилы, а доля мезогалофов незначительна.

Что касается реакции на водородный показатель (pH), то информация доступна для 93,7 % флоры диатомей. Среди них преобладают алкалифилы (76,2 %), за которыми следуют нейтрофилы (13,6 %). Доля алкалибионтов (2,8 %), ацидофилов (1 %) и ацидобионтов (0,06 %) незначительна.

Результаты кластерного анализа относительной численности диатомовых водорослей, проведенного с использованием метода CONISS, позволили выделить три зоны (I–III). Эти зоны различаются по высотному распределению, концентрации диатомовых водорослей и экологическим характеристикам местообитаний (рис. 4).

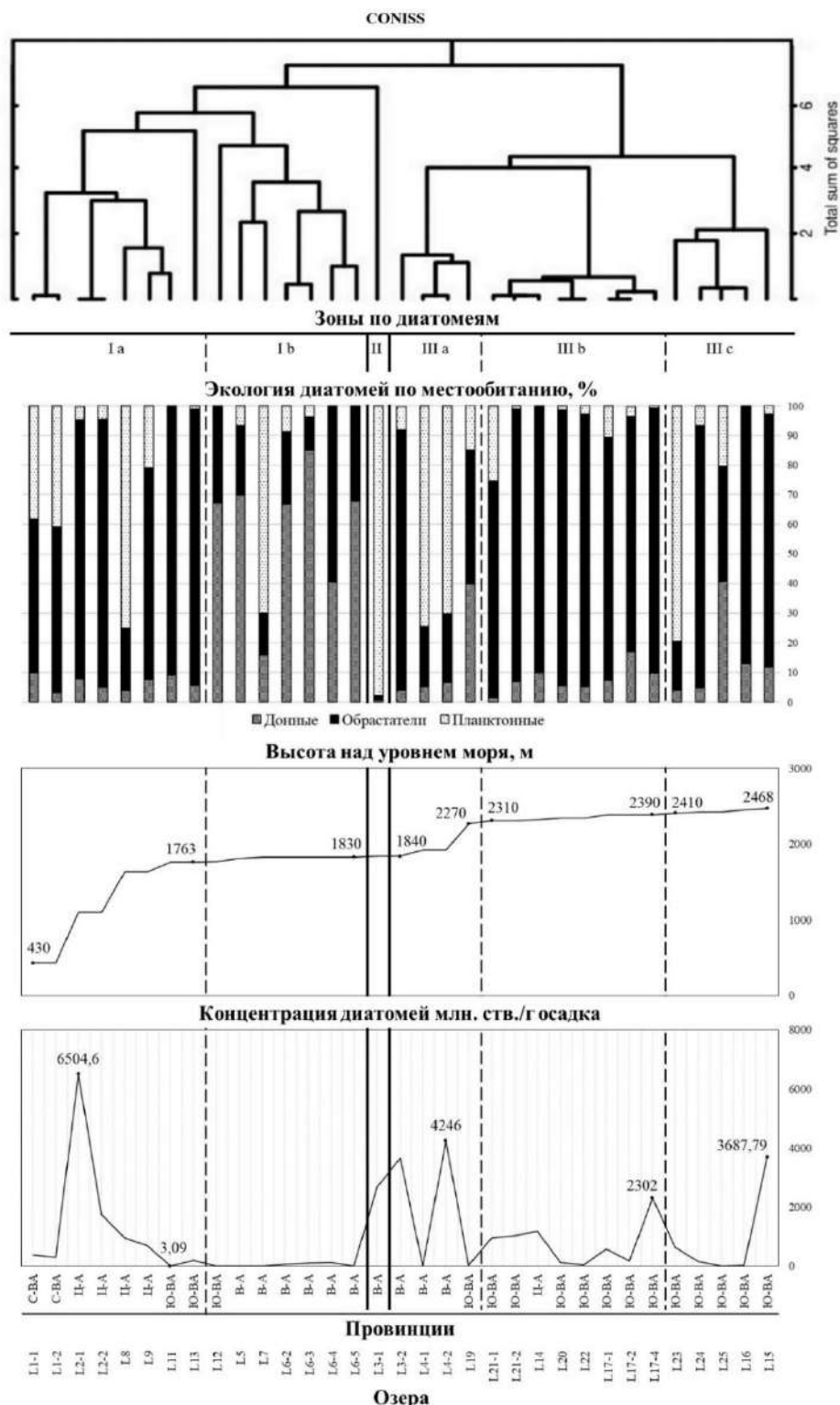


Рис. 4. Зонирование диатомовых комплексов изученных озер
Fig. 4. Zonation of diatom complexes of the studied lakes

Диатомовая зона I охватывает озера, расположенные на высотах в пределах от 430 до 1830 м н.у.м. В этой зоне наблюдаются озера с диатомовыми комплексами средней концентрации 740,8 млн створок на грамм осадка. В пределах этой зоны находится точка L2-1, где концентрация диатомей достигает своего максимума – 6504,6 млн створок/г. Среди видового состава по численности створок преобладают обрастатели, такие как *Staurosira venter* и *Achnanthes minutissimum*, а также донный вид *Ellerbeckia arenaria*.

Зона I делится на две подзоны. Подзона Ia включает озера Северо-Восточно-, Центральнo- и Юго-Восточно-Алтайской провинций, где наблюдаются самые высокие концентрации диатомей. В отличие от нее, в подзона Ib, представленная преимущественно пробами из Восточно-Алтайской провинции, характеризуется значительно низкими концентрациями, составляющими в среднем 44,9 млн створок /г.

Вторая зона (II) охватывает только одну точку L3-1, расположенную на высоте 1840 м н.у.м. Она выделяется высокой концентрацией диатомовых водорослей, составляющей 2671 млн створок/г, и абсолютным доминированием планктонного вида *Aulacoseira alpigena* (89,6 %).

Третья зона, охватывающая 17 точек, была разделена на три подзоны: IIIa, IIIb, IIIc. В этих подзонах средняя концентрация диатомей составляет 1111,3 млн створок/г, а высоты варьируются от 1840 до 2468 м. Преобладают виды-обрастатели, такие как *Staurosira venter*, *Staurosirella pinnata* и *Staurosira construens*. Она включает преимущественно озера Восточно-Алтайской провинции, что контрастирует с подзонами IIIb и IIIc, где преобладают обрастатели, а озера преимущественно находятся в Юго-Восточной Алтайской провинции.

Заключение

Таким образом, по морфометрическим параметрам среди изученных озер 60 % относятся к категории «очень малые», 36 % – к «малые». Наиболее многочисленны озера с повышенной (24 %) и очень малой (20 %) глубиной. По озерным котловинам доминируют озера с формой, близкие к овалу (36 %) и близкие к окружности (28 %). Большинство озер характеризуются округлой береговой линией.

По таксономическому составу было зарегистрировано 219 видов диатомовых водорослей, которые относятся к 80 родам, 32 семействам, 15 порядкам и трем классам. Самым многочисленным классом является класс *Bacillariophyceae*. Наиболее распространенным семейством в исследованных озерах является *Achnanthidiaceae* (10 родов), *Cymbellaceae* (9 родов) и *Stephanodiscaceae* (6 родов). В число доминантных форм вошли 27 видов, субдоминантных – 25 видов.

По экологическим предпочтениям местообитаний в исследованных озерах показывают, что в изученных диатомовых комплексах количество видов обрастателей значительно преобладает над донными и планктонными формами (59 %). По предпочтению к температурным условиям по количеству видов во флоре преобладают космополитные виды 62 %. По отношению к солености большинство видов индифферентны (89 %). Сведения по отношению к водородному показателю (*pH*) имеются для 93,7 % флоры диатомей с преобладанием алкалифилов (76,2 %).

Результаты физико-химических исследований показали, что минерализация воды в изученных озерах варьировала в широком диапазоне – от 39,65 до 438 мг/л. Воды исследованной территории в целом относятся к гидрокарбонатному классу и кальциевой группе. Характеристика вод по общей минерализации показала, что 31 % относятся к ультрапресным, а 60 % – к пресным. В ходе исследования водородный показатель (*pH*) изменяется от 6,1 до 8,8. Преобладали слабощелочные (49 %) и щелочные (39 %) воды. По общей жесткости воды преобладают озера (49 %) с мягкой водой.

В условиях глобальных изменений окружающей среды и климата, вызывающих беспокойство как научного сообщества, так и человечества в целом, возрастает потребность в прогнозировании состояния водных экосистем. Особую важность это имеет для пресноводных водоемов, выступающих ключевыми источниками питьевого водоснабжения. Для построения достоверных прогнозов необходимы данные об их исторической динамике. В этой связи все большее значение приобретают палеоэкологические исследования, позволяющие проводить долговременные реконструкции изменений, происходивших в водоемах на протяжении всего периода их существования. Полученные современные данные о состоянии озер послужат основой для калибровки таких палеореконструкций, повышая их точность и достоверность.

Список источников

- Алекин О.А. 1970. Основы гидрохимии. Л., Гидрометеиздат, 444 с.
Забелина М.М., Киселев И.А., Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова В.С. 1951. Диатомовые водоросли. Определитель пресноводных водорослей СССР. М., Советская наука, Вып. 4, 620 с.
Пестрякова Л.А., Николаев А.Н., Субетто Д.А., Фролова Л.А., Бобров А.А., Городничев Р.М. 2016. Палеоэкология. Методологические основы палеоэкологии. Якутск, Северо-Восточного федерального университета, 84 с.

Список литературы

- Бляхарчук Т.А. 2008. Реконструкция лесной и высокогорно-степной растительности юго-западной части Тувы с позднеледниковья до современности. География и природные ресурсы, 1: 89–96.
Бляхарчук Т.А., Митрофанова Е.Ю., Эйрих А.Н. 2015. Комплексные палеоэкологические исследования донных отложений озера Манжерокское в предгорьях Алтая. Труды Карельского научного центра РАН, 9: 81–99. <https://doi.org/10.17076/lim166>
Бородина Е.В., Бородина У.О. 2019. Формирование химического состава озерных вод особо охраняемых территорий горного Алтая на примере бассейна р. Мульты. Водные ресурсы, 46(4): 405–416. <https://doi.org/10.31857/S0321-0596464405-416>
Веснина Л.В., Лукерина Г.В., Ронжина Т.О. 2019. Результаты многолетнего экологического мониторинга гипергалинного озера Большое Яровое, г. Славгород Алтайского края. Рыбное хозяйство, 4: 19–27.
Генкал С.И., Бондаренко Н.А., Щур Л.А. 2011. Диатомовые водоросли озер юга и севера Восточной Сибири. Рыбинск, Рыбинский Дом печати, 70 с.
Генкал С.И., Митрофанова Е.Ю., Куликовский М.С. 2013. Морфометрическая изменчивость, таксономия и распространение *Cyclotella Bodanica Eulenstein* (Bacillariophyta) в России. Биология внутренних вод, 2: 3–15. <https://doi.org/10.1134/S1995082913010057>
Григорьев С.В. 1959. О некоторых определениях и показателях в озероведении. Труды Карельского филиала АН СССР, 18: 29–45.
Давыдова Н.Н. 1985. Диатомовые водоросли – индикаторы экологических условий водоемов в голоцене. Л., Наука, 244 с.
Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). 1992. СПб., Наука, Т. II, Вып. 2, 125 с.
Долматова Л.А. 2008. Гидрохимический режим Телецкого озера. В кн.: О состоянии и развитии сети особо охраняемых территорий в Республике Алтай. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию юбилею Алтайского заповедника, Горно-Алтайск, Яйлю, 20–23 сентября 2007. Горно-Алтайск, Петровская академия наук и искусств: 72–80.
Долматова Л.А. 2011. Особенности гидрохимического режима Телецкого озера в период осеннего охлаждения. Мир науки, культуры, образования, 6–2(31): 417–423.
Иванов П.В. 1948. Классификация озер мира по величине и по их средней глубине. Бюллетень ЛГУ, 20: 29–36.
Киприянова Л.М., Вишняков В.С., Романов Р.Е., Гопоненко А.Ю. 2024. К разнообразию и экологии сообществ харовых водорослей озер горного Алтая. Растительность России, 49: 124–138. <https://doi.org/10.31111/vegrus/2024.49.124>
Китаев С.П. 2007. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск, Карельский научный центр РАН, 394 с.
Курлов М.Г. 1928. Классификация сибирских целебных минеральных вод. Томск, Издание Физиотерапевтического института, 73 с.
Митрофанова Е.Ю. 2009. Подледный фитопланктон мелководного Манжерокского озера (Горный Алтай, Россия). Мир науки, культуры и образования, 5(17): 16–19.
Митрофанова Е.Ю., Сутченкова О.С. 2014. Диатомовые водоросли в донных отложениях глубокого озера Телецкое (Алтай, Россия) как индикаторы экологических условий в последние 2000 лет. Мир науки, культуры и образования, 5(48): 321–326.
Михайлов Н.Н. 1994. Озера Алтая, их происхождение и история. География и природопользование Сибири, 1: 75–89.
Новиков И.С. 2004. Морфотектоника Алтая. Новосибирск, Манускрипт, 313 с.

- Рождественская Т.А., Пузанов А.В., Горбачев И.В. 2008. Нитраты и нитриты в поверхностных и подземных водах Алтая. *Мир науки, культуры, образования*, 2(9): 19–22.
- Рудая Н.А. 2022. Природные условия раннего голоцена Алтая (по данным из палеозаписей озер). *Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий*, 28: 251–256.
- Селегей В.В., Селегей Т.С. 1974. Телецкое озеро. Л., Гидрометеиздат, 80 с.
- Фролова Н.Л., Повалишников Е.С., Ефимова Л.Е. 2011. Комплексные исследования водных объектов Горного Алтая (на примере бассейна р. Мульты) – 75 лет спустя. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, 2: 113–126.
- Чернова Г.М., Михайлов Н.Н., Денисенко В.П., Козырева М.Г. 1991. Некоторые вопросы палеогеографии голоцена юго-западного Алтая. *Известия всесоюзного географического общества*, 123(2): 140–146.
- Шпилекова Н.Е. 1980. Морфометрические особенности озер горного Алтая. В кн.: *Природные ресурсы Горного Алтая и их хозяйственное использование*. Барнаул, БГПИ: 22–27.
- Andreev A.A., Pierau R., Diekmann B., Kalugin I.A., Daryin A.V., Smolyaninova L.G. 2007. Environmental Changes in the Northern Altai During the Last Millenium Documented in Lake Teletskoye Pollen Record. *Quaternary Research*, 67(3): 394–399. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2006.11.004>
- Blyakharchuk T.A., Wright H., Borodavko P.S., Knaap W.O.V.D., Ammann B. 2004. Late Glacial and Holocene Vegetational Changes on the Ulagan High-Mountain Plateau, Altai Mountains, Southern Siberia. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 209(1–4): 259–279. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.02.011>
- Blyakharchuk T.A., Wright H., Borodavko P.S., van der Knaap W.O., Ammann B. 2007. Late Glacial and Holocene Vegetational History of the Altai Mountains (Southwestern Tuva Republic, Siberia). *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 245(3–4): 518–534. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.09.010>
- Blyakharchuk T.A., Wright H., Borodavko P.S., Knaap W.O.V.D., Ammann B. 2008. The Role of Pingos in the Development of the Dzungyskol Lake-Pingo Complex, Central Altai Mountains, Southern Siberia. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 257(4): 404–420. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.09.015>
- Karachurina S., Rudaya N.A., Frolova L.A., Kuzmina O., Cao X., ... Pestryakova L.A. 2023. Terrestrial Vegetation and Lake Aquatic Community Diversity Under Climate Change During the Mid-Late Holocene in the Altai Mountains. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 623: 111623. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2023.111623>
- Round F.E., Crawford R.M., Mann D.G. 1990. *The Diatoms: Biology and Morphology of the Genera*. New York, Cambridge University Press, 747 p.
- Rudaya N., Kuzmina O., Frolova L., Nazarova L., Nigmatullin N., ... Darin A. 2025. Holocene Environments and the Forest Dynamics Enigma in the arid Altai Highlands. *Quaternary Science Reviews*, 367: 109548. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2025.109548>
- Schlutz F., Lehmkuhl F. 2007. Climatic Change in the Russian Altai, Southern Siberia, Based on Palynological and Geomorphological Results, with Implications for Climatic Teleconnections and Human History Since the Middle Holocene. *Vegetation History and Archaeobotany*, 16(2): 101–118. <https://doi.org/10.1007/S00334-006-0073-7>
- Vnukovskaya Yu.D., Kuzmina O.B., Rudaya N.A. 2024. Local Environmental Conditions of Lake Balyktukel (Russian Altai) in the Holocene from Non-Pollen Palynomorphs. *Paleontological Journal*, 58(7): 841–850. <https://doi.org/10.1134/S0031030124600501>
- Westover K.S., Fritz S.C., Blyakharchuk T.A., Wright H.E. 2006. Diatom Paleolimnological Record of the Holocene Climatic and Environmental Change in the Altai Mountains, Siberia. *Journal of Paleolimnology*, 35(3): 519–541. <https://doi.org/10.1007/s10933-005-3241-3>

References

- Blyakharchuk T.A. 2008. Reconstructing the Vegetation of Forest and Alpine-Steppe Landscapes in the Southwestern Part of Tuva Since the Late Glacial Period Till the Present. *Geography and Natural Resources*, 29(1): 57–62 (in Russian). <https://doi.org/10.1016/j.gnr.2008.04.011>

- Blyakharchuk T.A., Mitrofanova E.Yu., Eirikh A.N. 2015. Integrated Palaeoecological Investigation of Bottom Sediments from Lake Manzherokskoye in the Piedmont Altai Region. Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 9: 81–99 (in Russian). <https://doi.org/10.17076/lim166>
- Borodina E.V., Borodina U.O. 2019. Water Chemistry Formation in Lakes of Specially Protected Natural Areas in the Altai Mountains: Case Study of the Mul'ta River. Water Resources, 46(4): 582–594 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0097807819040055>
- Vesnina L.V., Lukerina G.V., Ronzhina T.O. 2019. Results of Long-Term Environmental Monitoring of the Hypervalent Bolshoe Yarovoe Lake, Slavgorod, Altai Region. Fisheries, 4: 19–27 (in Russian).
- Genkal S.I., Bondarenko N.A., Shhur L.A. 2011. Diatomovye vodorosli ozer yuga i severa Vostochnoy Sibiri [Diatoms of Lakes in the South and North of Eastern Siberia]. Rybinsk, Publ. Rybinskiy Dom pechati, 70 p.
- Genkal S.I., Mitrofanova E.Y., Kulikovskiy M.S. 2013. Morphological Variability, Taxonomy, and Distribution of Cyclotella Bodanica Eulenstein (Bacillariophyta) in Russia. Inland Water Biology, 6(2): 85–97 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S1995082913010057>
- Grigoriev S.V. 1959. O nekotoryh opredeleniyah i pokazatelyah v ozerovedenii [On Some Definitions and Indicators in Limnology]. Trudy Karelskogo filiala AN SSSR, 18: 29–45.
- Davydova N.N. 1985. Diatoms as Indicators of Holocene Lake Environments. Leningrad, Publ. Nauka, 244 p.
- Diatomovye vodorosli SSSR (iskopaemye i sovremennyye) [Diatoms of the USSR (Fossil and Modern)]. 1992. Saint Petersburg, Publ. Nauka, Vol. II, Is. 2, 125 p.
- Dolmatova L.A. 2008. Gidrohimicheskiiy rezhim Teleckogo ozera [Hydrochemical Regime of Lake Teletskoye]. In: O sostoyanii i razvitiy seti osobo ohranyaemykh territoriy v Respublike Altay [On the Status and Development of the Network of Specially Protected Areas in the Altai Republic]. Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 75th anniversary of the Altai Nature Reserve, Gorno-Altaysk, Yailu, 20–23 September 2007. Gorno-Altaysk, Publ. Petrovskaya akademiya nauk i iskusstv: 72–80.
- Dolmatova L.A. 2011. The Peculiarities of Hydrochemical Regime of Lake Teletskoye During Its Autumn Cooling. The world of science, culture and education, 6–2(31): 417–423 (in Russian).
- Ivanov P.V. 1948. Klassifikatsiya ozer mira po velichine i po ih sredney glubine [Classification of Lakes of the World by Size and by Their Average Depth]. Bulletin LGU, 20: 29–36.
- Kipriyanova L.M., Vishnyakov V.S., Romanov R.E., Goponenko A.Yu. 2024. On the Diversity and Ecology of Charophyte Communities in Lakes of the Altai Mountains. Vegetation of Russia, 49: 124–138 (in Russian). <https://doi.org/10.31111/vegus/2024.49.124>
- Kitaev S.P. 2007. Osnovy limnologii dlya gidrobiologov i ihtologov [Fundamentals of Limnology for Hydrobiologists and Ichthyologists]. Petrozavodsk, Publ. Karelskiy nauchniy centr RAN, 394 p.
- Kurlov M.G. 1928. Klassifikatsiya sibirskikh celebnykh mineralnykh vod [Classification of Siberian Healing Mineral Waters]. Tomsk, Publ. Izdanie Fizioterapevticheskogo institute, 73 p.
- Mitrofanova E.Yu. 2009. Under-the-Ice Phytoplankton of Shallow Lake Manzherokskoye, Gorny Altai, Russia. The world of science, culture and education, 5(17): 16–19 (in Russian).
- Mitrofanova E.Yu., Sutchenkova O.S. 2014. Diatomic Algae in the Bottom Sediments of Lake Teletskoye (Altai, Russia) as Indicators of Environmental Conditions During the Last 2000 Years. The world of science, culture and education, 5(48): 321–326 (in Russian).
- Mihaylov N.N. 1994. Ozera Altaya, ih proishozhdenie i istoriya [Altai Lakes, Their Origin and History]. Geografiya i prirodopolzovanie Sibiri, 1: 75–89.
- Novikov I.S. 2004. Morfotektonika Altaya [Morphotectonics of Altai]. Novosibirsk, Publ. Manuskript, 313 p.
- Rozhdestvenskaya T.A., Puzanov A.V., Gorbachev I.V. 2008. Nitrates and Nitrites in the Surface and Ground Water of Altai. The world of science, culture and education, 2(9): 19–22 (in Russian).
- Rudaya N.A. 2022. Early Holocene Environments in Altai (Based on the Paleodata from Lake Sediments). Problems of archaeology, ethnography, anthropology of Siberia and neighboring territories, 28: 251–256 (in Russian).
- Selegey V.V., Selegey T.S. 1974. Teleckoe ozero [Lake Teletskoye]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 80 p.

- Frolova N.L., Povalishnikova E.S., Efimova L.E. 2011. Complex Study of Water Objects of Mountain Altay (on Example of Multa River Basin). *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2: 113–126 (in Russian).
- Chernova G.M., Mihaylov N.N., Denisenko V.P., Kozyreva M.G. 1991. Nekotorye voprosy paleogeografii golocena ugo-zapadnogo Altaya [Some Issues of Holocene Paleogeography of Southwestern Altai]. *Izvestiya vsesouznoogo geograficheskogo obshchestva*, 123(2): 140–146.
- Shpilekova N.E. 1980. Morfometricheskie osobennosti ozer gornogo Altaya [Morphometric Features of the Lakes of the Altai Mountains]. In: *Prirodnye resursy Gornogo Altaya i ih hozaistvennoe ispolzovanie* [Natural Resources of Gorny Altai and Their Economic Use]. Barnaul, Publ. BGPI: 22–27.
- Andreev A.A., Pierau R., Diekmann B., Kalugin I.A., Daryin A.V., Smolyaninova L.G. 2007. Environmental Changes in the Northern Altai During the Last Millenium Documented in Lake Teletskoye Pollen Record. *Quaternary Research*, 67(3): 394–399. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2006.11.004>
- Blyakharchuk T.A., Wright H., Borodavko P.S., Knaap W.O.V.D., Ammann B. 2004. Late Glacial and Holocene Vegetational Changes on the Ulagan High-Mountain Plateau, Altai Mountains, Southern Siberia. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 209(1–4): 259–279. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.02.011>
- Blyakharchuk T.A., Wright H., Borodavko P.S., van der Knaap W.O., Ammann B. 2007. Late Glacial and Holocene Vegetational History of the Altai Mountains (Southwestern Tuva Republic, Siberia). *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 245(3–4): 518–534. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.09.010>
- Blyakharchuk T.A., Wright H., Borodavko P.S., Knaap W.O.V.D., Ammann B. 2008. The Role of Pingos in the Development of the Dzungyskol Lake-Pingo Complex, Central Altai Mountains, Southern Siberia. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 257(4): 404–420. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.09.015>
- Karachurina S., Rudaya N.A., Frolova L.A., Kuzmina O., Cao X., ... Pestryakova L.A. 2023. Terrestrial Vegetation and Lake Aquatic Community Diversity Under Climate Change During the Mid-Late Holocene in the Altai Mountains. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 623: 111623. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2023.111623>
- Round F.E., Crawford R.M., Mann D.G. 1990. *The Diatoms: Biology and Morphology of the Genera*. New York, Cambridge University Press, 747 p.
- Rudaya N., Kuzmina O., Frolova L., Nazarova L., Nigmatullin N., ... Darin A. 2025. Holocene Environments and the Forest Dynamics Enigma in the arid Altai Highlands. *Quaternary Science Reviews*, 367: 109548. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2025.109548>
- Schlutz F., Lehmkuhl F. 2007. Climatic Change in the Russian Altai, Southern Siberia, Based on Palynological and Geomorphological Results, with Implications for Climatic Teleconnections and Human History Since the Middle Holocene. *Vegetation History and Archaeobotany*, 16(2): 101–118. <https://doi.org/10.1007/S00334-006-0073-7>
- Vnukovskaya Yu.D., Kuzmina O.B., Rudaya N.A. 2024. Local Environmental Conditions of Lake Balyktukel (Russian Altai) in the Holocene from Non-Pollen Palynomorphs. *Paleontological Journal*, 58(7): 841–850. <https://doi.org/10.1134/S0031030124600501>
- Westover K.S., Fritz S.C., Blyakharchuk T.A., Wright H.E. 2006. Diatom Paleolimnological Record of the Holocene Climatic and Environmental Change in the Altai Mountains, Siberia. *Journal of Paleolimnology*, 35(3): 519–541. <https://doi.org/10.1007/s10933-005-3241-3>

*Поступила в редакцию 10.12.2025;
поступила после рецензирования 25.01.2026;
принята к публикации 29.01.2026*

*Received December 10, 2025;
Revised January 25, 2026;
Accepted January 29, 2026*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Попова Диана Николаевна, старший преподаватель эколого-географического отделения Института естественных наук, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

Левина Сардана Николаевна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник эколого-географического отделения Института естественных наук, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

Пестрякова Людмила Агафьевна, доктор географических наук, доцент, г.н.с. эколого-географического отделения Института естественных наук, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

Рудая Наталия Алексеевна, доктор географических наук, старший научный сотрудник, Институт археологии и этнографии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Diana N. Popova, Senior Lecturer at the Department of Ecology and Geography, Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

Sardana N. Levina, Candidate of Sciences in Geography, Senior Researcher at the Department of Ecology and Geography, Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

Ludmila A. Pestryakova, Doctor of Geographical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher at the Department of Ecology and Geography, Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

Natalia A. Rudaya, Doctor of Geographical Sciences, Senior Researcher at the Institute of Archaeology and Ethnography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

УДК 504.455

DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-3-634-645

EDN OTYKRE

Моделирование вторичного загрязнения марганцем Куйбышевского водохранилища

¹Рахуба А.В., ²Шмакова М.В.

¹Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Институт экологии Волжского бассейна РАН,
Россия, 445003, г. Тольятти, ул. Комзина, 10

²Институт озерадения РАН – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,
Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39
m-shmakova@yandex.ru

Аннотация. Одной из наиболее существенных составляющих вторичного загрязнения водных объектов является взмучивание донных отложений. Адсорбированные на взвешенных частицах и растворенные в поровых водах тяжелые металлы, поступающие из донных отложений, при взмучивании многократно увеличивают содержание поллютантов в воде. Для количественной оценки полей повышенного содержания тяжелых металлов в водных объектах авторами разработана математическая модель двухфазного массопереноса совместно с уравнениями переноса консервативной примеси. Проведена серия модельных расчетов валового содержания марганца в Куйбышевском водохранилище при штормовых ветрах разной направленности. Получена пространственная неоднородность и выявлены зоны максимальной концентрации марганца, которая для Куйбышевского водохранилища составила 0,5 мг/л, при фоновых значениях 0,04 мг/л. Результаты расчетов показывают, что вклад потока марганца со дна в водную толщу водохранилища составляет 49 %, а величина пространственной неоднородности (C_v) достигает 55 %. Использование модели позволяет дать пространственную оценку распределения полей повышенных концентраций тяжелых металлов и рассчитать последствия при неблагоприятных природных условиях, а также при возможных гидротехнических мероприятиях, связанных с повышенной мутностью в акватории.

Ключевые слова: Куйбышевское водохранилище, математическое моделирование, марганец, донные отложения, взмучивание, внутренняя нагрузка

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН по теме FFZF-2024-0002 «Современные угрозы водным объектам и инновационные методы их сохранения, восстановления и рационального использования» и государственного задания Института экологии Волжского бассейна РАН – филиала Самарского ФИЦ РАН по теме FMRW-2025-0050 (регистрационный номер 1024032700087-2-1.6.19;1.6.17).

Для цитирования: Рахуба А.В., Шмакова М.В. 2026. Моделирование вторичного загрязнения марганцем Куйбышевского водохранилища. Региональные геосистемы, 50(3): 634–645. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-634-645 EDN: OTYKRE

Modeling of Secondary Manganese Pollution in the Kuibyshev Reservoir

Alexander V. Rakhuba, Marina V. Shmakova

¹Samara Federal Research Scientific Center RAS, Institute of Ecology of the Volga River Basin RAS,
10 Komzin St., Tolyatti 445003, Russia

²Institute of Limnology RAS – St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,
39 14th Line V.O. St., St. Petersburg 199178, Russia
m-shmakova@yandex.ru

© Рахуба А.В., Шмакова М.В., 2026

Abstract. One of the most significant components of the water bodies secondary pollution is the stirring up of the bottom sediments. Heavy metals adsorbed on the suspended particles and dissolved in pore waters, coming from bottom sediments, increase the content of pollutants in the water many times during agitation. To quantify the fields of increased heavy metal content in water bodies, the authors have developed a mathematical model of two-phase mass transfer together with equations for the transfer of conservative impurities. A series of model calculations of the total manganese content in the Kuibyshev reservoir under storm winds of different directions has been carried out. Spatial heterogeneity was obtained and zones of maximum concentration of manganese were identified, which for the Kuibyshev reservoir was 0.5 mg/l, with background values of 0.04 mg/l. The calculation results show that the contribution of the manganese flow from the bottom to the reservoir water masses is 49%, and the spatial heterogeneity (C_s) reaches 55 %. Using the model allows to give a spatial assessment of the distribution of fields of increased concentrations of heavy metals and calculate the consequences under adverse natural conditions, as well as possible hydraulic engineering measures associated with increased turbidity in the water area.

Keywords: Kuibyshev reservoir, mathematical modeling, manganese, bottom sediments, stirring up, internal load

Acknowledgements: The research was carried out within state assignment to the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, project No. FFZF-2024-0002 “Contemporary threats to water bodies and innovative methods of their preservation, restoration and rational use” and state assignment to the Institute of Ecology of the Volga Basin of the Russian Academy of Sciences, branch of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, project No. FMRW-2025-0050 (1024032700087-2-1.6.19;1.6.17).

For citation: Rakhuba A.V., Shmakova M.V. 2026. Modeling of Secondary Manganese Pollution in the Kuibyshev Reservoir. Regional Geosystems, 50(3): 634–645 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-634-645 EDN: OTYKRE

Введение

Согласно гидрохимическому мониторингу, качество воды Куйбышевского водохранилища по содержанию тяжелых металлов в воде и донных отложениях не соответствует требованиям СанПиН [СанПиН 2.1.4. 1074-01]. При этом, наиболее высокие концентрации тяжелых металлов наблюдаются на участках акватории, расположенных в относительной близости от различных производств, и в нижнем течении водохранилища у города Тольятти. Например, в Волжском плесе Куйбышевского водохранилища содержание марганца в донных отложениях превышает его природный фон в пять раз [Калайда, Хамитова, 2015]. А ПДК в Приплотинном плесе существенно превышают такие показатели, как цинк, железо и марганец, а в донных отложениях плеса наблюдается повышенное содержание никеля и титана. Ввиду того, что помимо прочего Куйбышевское водохранилище служит источником питьевого водоснабжения, повышение концентрации загрязняющих веществ в воде за счет внутренней нагрузки является серьезной экологической проблемой и требует оценки содержания тяжелых металлов в воде на момент взмучивания донных отложений и поступления загрязняющих веществ в водные массы. На рис. 1 приведены диаграммы кратности превышения ПДК марганцем и повторяемость случаев для периода 2010–2024 гг., построенные на основании данных гидрохимических наблюдений, опубликованных в Ежегодниках «Контроль качество воды» [2010–2024]. Как следует из приведенных диаграмм, в акватории Куйбышевского водохранилища имеет место устойчивое повышенное содержание марганца. За пятнадцатилетний период наблюдений содержание марганца в воде превышало ПДК более, чем в три раза, а частота превышения составила в среднем 57 % случаев.

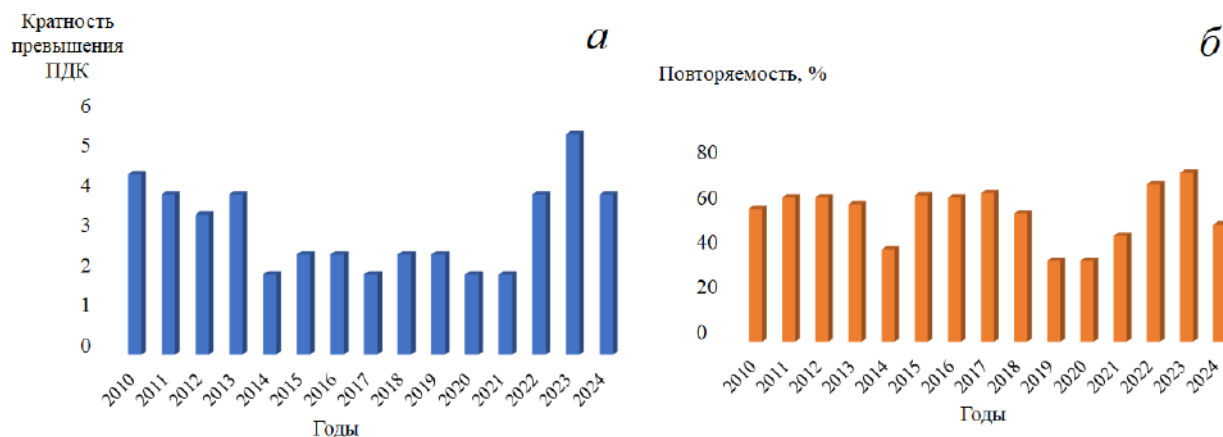


Рис. 1. Диаграммы кратности превышения ПДК марганцем (а) и повторяемость случаев превышения, % (б) в Куйбышевском водохранилище для периода 2010–2024 гг.

Fig. 1. Diagrams of the frequency of exceeding the maximum permissible concentration by manganese (a) and the frequency of cases of excess, % (б) in the Kuibyshev Reservoir for the period 2010–2024

Марганец является вторым по распространенности после железа тяжелым металлом на Земле и поступает в водные объекты с подземными водами, в результате эмиссии с различных типов подстилающей поверхности, а также в адсорбированном виде на продуктах почвенного смыва [Gadd, Griffiths, 1977; Gadd, 1990; Sidoruk, 2023]. К промышленным источникам марганца на водосборе Куйбышевского водохранилища относятся сточные воды предприятий жилищно-коммунального хозяйства, энергетической и химической промышленности (предприятия городов Зеленодольск, Казань, Ульяновск, Тольятти), сельского хозяйства [Ежегодник «Контроль качества...», 2010–2024].

В результате внутренней нагрузки, труднорастворимые формы марганца, адсорбированные на донных отложениях, восстанавливаются до хорошо растворимых и поступают в результате диффузии в придонный слой. Также в период цветения сине-зеленые водоросли активно накапливают марганец, который при отмирании последних вновь поступает в водные массы. Так, двадцатикратное превышение ПДК по марганцу в 2010 году в створе г. Тольятти было вызвано аномальным повышением температуры в исследуемый период. Это привело к активному размножению сине-зеленых водорослей, после разложения которых в водные массы поступило значительное количество марганца. Последнее совместно с пониженным уровнем водохранилища обусловило существенное превышение ПДК по этому показателю [Петрякова, Фомина, 2011]. Попадая с питьевой водой в организм человека в больших концентрациях марганец вызывает тяжелые отравления, негативно влияет на репродуктивную функцию, сердечно-сосудистую систему и так далее. Накапливаясь в организме, марганец приводит к нарушениям в работе центральной нервной системы.

Повышенное содержание марганца в воде и донных отложениях Куйбышевского водохранилища обеспечивают неблагоприятные гидрометеорологические условия и антропогенный фактор. Перемешивание водных масс и последующее взмучивание донных отложений в результате ветрового или антропогенного воздействия в мелководных участках акватории приводит к значительному увеличению валового содержания загрязняющих веществ в водных массах.

Целью настоящего исследования является оценка содержания марганца в акватории Куйбышевского водохранилища в результате вторичного загрязнения донными отложениями при неблагоприятных гидрометеорологических явлениях.

Объекты и методы исследования

Куйбышевское водохранилище, одно из крупнейших в мире, представляет собой огромную емкость, аккумулирующую загрязняющие вещества, поступающие с территории водосборной площади в растворенном и адсорбированном на твердых частицах виде. При этом замедленный водообмен плесовых расширений определяет их как наиболее загрязненную часть водохранилища. Основными источниками поступления ТМ в акваторию Куйбышевского водохранилища помимо ТМ, поступающих из верхних створов, является эмиссия и почвенная эрозия с подстилающей площади водосбора. За длительный период (1958–2025 гг.) эксплуатации Куйбышевского водохранилища в донных отложениях накоплено большое количество ТМ [Степанова, Латыпова, 2005]. Это создает опасность локального ухудшения качества воды в литоральной части водохранилища, где предпочтительно располагаются оголовки водозаборов, зоны отдыха и сосредоточена основная биомасса водных организмов.

Характерной особенностью Куйбышевского водохранилища является суточный и недельный режим регулирования водного стока. В период весеннего половодья происходит накопление воды в водохранилище до отметки НПУ, а в остальную часть года – сработка накопленных запасов. Амплитуда годового колебания стока составляет 5–7 м. Именно это оказывает влияние на динамику стокового течения и вместе с дрейфовыми течениями определяет характер взмучивания донных отложений в мелководных зонах и соответственно экологическую обстановку в этих районах. Так, в жаркую погоду, при хорошем прогреве воды и сильном ветре могут сложиться экстремальные условия по качеству воды, как это было в 2010 году в районе водозабора г. Тольятти [Петрякова, Фомина, 2011]. При обильном цветении сине-зеленых водорослей и ветровом взмучивании донных отложений содержание марганца в районе оголовков водозабора доходило до 2,21 мг/л. В результате, с учетом используемых технологий очистки воды удалось снизить концентрацию марганца в питьевой воде разводящей сети города до 0,87 мг/л, тогда как ПДК, в соответствии с санитарными нормативами по марганцу, составляет 0,1 мг/л. Похожие ситуации периодически возникают в районах многих водозаборов, особенно расположенных в плесах и заливах Куйбышевского водохранилища.

Известно, что одним из эффективных методов контроля качества воды, рационального использования водных объектов и планирования водохозяйственной деятельности является математическое моделирование. Внутренняя нагрузка или вторичное загрязнение водных объектов происходит в результате поступления в водные массы загрязняющих веществ из донных отложений и поровых вод. При этом валовое содержание загрязняющего вещества в акватории формируется из фоновой концентрации, концентрации в поровых водах и количестве адсорбированного на поверхности частиц донных отложений и взвеси вещества. Можно выделить следующие основные механизмы поступления ТМ в водные массы в результате внутренней нагрузки:

- 1) процессы десорбции;
- 2) диффузионный массообмен между поровыми водами и придонным слоем, вызванный градиентами в таких переменных состояниях среды как плотность, температура, минерализация;
- 3) массоперенос за счет интенсивного перемешивания, вызванного неблагоприятными гидрометеорологическими явлениями, а также антропогенными факторами, такими как дноуглубление, дампинг, гидротехническое строительство, прохождение судов и так далее.

В настоящее время при рассмотрении задачи вторичного загрязнения тяжелыми металлами, как правило, основное внимание уделяется механизмам поступления разных форм ТМ из донных отложений и поровых вод в водные массы [Веницианов, Кочарян,

1994; Веницианов, Лепихин, 2002; Попова и др., 2009; Решетняк, Закруткин, 2016; Толкачев, Корженевский, 2025]. Однако неотъемлемой частью решения данной задачи является количественная оценка массы взмученных донных отложений. Эта оценка неразрывно сопряжена с решением уравнений двухфазного массопереноса. В таблице приведены основные процессы гетерофазного массообмена в системе «донные отложения – поровые воды – взвесь – водные массы», переменные состояния этой системы, определяющие направленность и скорость процесса и уравнения, описывающие эти процессы.

Основные процессы гетерофазного массообмена
в системе «донные отложения – поровые воды – взвесь – водные массы»
The main processes of heterophase mass
transfer in the "bottom sediments – pore water – sediments – water masses" system

Процесс	Переменные состояния	Уравнения и модели
Адсорбция/десорбция на взвесьях	pH↑↓ детрит↑↓ взвесь↑↓ энергия потока↑↓	Уравнения процессов сорбции/десорбции в системе «водные массы – взвесь» [Веницианов, Лепихин, 2002]
Адсорбция/десорбция в донных отложениях	pH↑↓ Eh↑↓ детрит↑↓	Уравнения процессов сорбции/десорбции в системе «поровые воды/водные массы – донные отложения» [Веницианов, Лепихин, 2002]
Диффузия из/в поровые воды	Градиент температуры воды, плотности и минерализации↑↓	Уравнения диффузного массообмена в системе «поровые воды – водные массы» [Методические основы оценки..., 1987]
Растворение	pH↓ Eh↓ взвесь↓ детрит↓ растворенная органика↑	Уравнение кинетики растворения [Веницианов, Лепихин, 2002]
Взмучивание/осаждение ДО	Транспортирующий потенциал потока↑↓	Гидродинамические модели, дополненные алгоритмами двухфазного массопереноса [Рахуба, Шмакова, 2022]
Распространение загрязняющих веществ в акватории	Стоковые, дрейфовые течения	Уравнения турбулентной диффузии для растворенной примеси [Методические основы оценки..., 1987]

При построении модели необходимо определиться с тем, какие процессы будут аппроксимированы математическим аппаратом, какие допущения будут сделаны при этом (например, примесь будет полагаться консервативной, а процессы гетерофазного массообмена будут полагаться динамически равновесными). Также необходимо скоординировать характерное время всех рассматриваемых процессов в соответствии со структурным уровнем моделирования. Характерное время доминирующих потоков ТМ оценивается через интенсивность процессов [Веницианов, Лепихин, 2002]

– молекулярной диффузии:

$$T_{\text{пор}} \sim \frac{D_{m \text{ пор}}}{\Delta H^2},$$

где $D_{m \text{ пор}}$ – коэффициент молекулярной диффузии, ΔH – мощность донных отложений;

– десорбции с донных отложений:

$$T_{\text{десор}} \sim \frac{D_{\text{тчастиц}}}{r^2},$$

где $D_{\text{частиц}}$ – коэффициент диффузии ионов металла в материале частиц как правило кварца; r – размер частиц;

– размыва дна:

$$T_{\text{раз}} \sim \frac{\Delta H}{V_h},$$

где V_h – скорость размыва донных отложений.

При этом в ряде случаев полезно оценить вклад моделируемого компонента в рассчитываемый общий поток вещества, и при незначительном вкладе имеет смысл упростить модель, чтобы не утяжелять алгоритмы. Следует также иметь ввиду, что масштаб моделирования определяет и границы применимости полученных результатов.

Разработанная в ИЭВБ РАН – филиале СамНЦ РАН и ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН моделирующая система внутренней нагрузки тяжелыми металлами на водный объект представлена гидродинамической моделью «Волна» [Рахуба, Шмакова, 2022], дополненной алгоритмами двухфазного массопереноса [Shmakova, 2022] и схемой учета разнофракционности донных отложений, участвующих в процессах взмучивания [Shmakova, 2022] и зависимостями содержания адсорбированного вещества на поверхности донных отложений от крупности частиц в исследуемом водоеме. В отличие от принятых алгоритмов оценки нагрузки тяжелыми металлами донных отложений эффективной крупности в модели учитывается вся кривая гранулометрического состава донных отложений. Последнее позволяет избежать смещения в оценке общего содержания адсорбированных на поверхности частиц ТМ за счет погрешностей в определении эффективной крупности. На рис. 2 приведена зависимость массы марганца, адсорбированного на донных отложениях от крупности последних [Иванов и др., 1994; Степанова, Латыпова, 2005; Иванов и др., 2015].

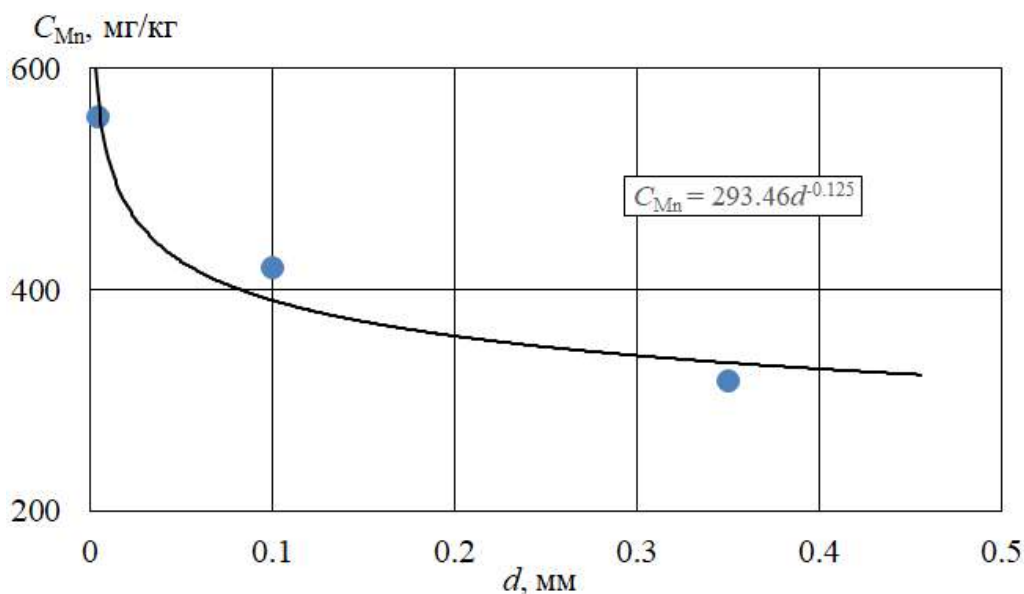


Рис. 2. Зависимость массы марганца, адсорбированного на донных отложениях C_{Mn} , мг/кг от крупности последних d , мм

Fig. 2. Dependence of the mass of manganese adsorbed on the bottom sediments of the C_{Mn} , mg/kg on the size of the latter, d , mm

Валовое содержание тяжелых металлов $C(x, y, t)$ в водных массах рассчитывается как сумма фоновой концентрации $C_{\text{фон}}$, мг/л, концентрации вещества, поступившего из поровых вод $C_{\text{пор}}$ и концентрации вещества, адсорбированного на транспортируемых частицах наносов $C_{\text{адсорб}}$

$$C(x, y, t) = C_{\text{фон}} + C_{\text{пор}} + C_{\text{адсорб}},$$

$$C_{\text{пор}} = f_1(\Delta_{\text{пор}}),$$

$$C_{\text{адсорб}} = f_2(M_{\text{ТМ}}),$$

где $\Delta_{\text{пор}}$ – активный придонный слой, из которого осуществляется водообмен поровых вод с основной водной массой, м. Эта величина является функцией толщины размытого донного грунта и придонной части, активно участвующей в водообмене.

Общая масса загрязняющего вещества $M_{\text{ТМ}}$, кг/с, адсорбированного на поверхности транспортируемых частиц в расчетной ячейке вычисляется в соответствии с распределением крупности движущихся наносов $d_{\text{гр}} = f_3(p)$:

$$M_{\text{ТМ}}(x, y, t) = G(x, y, t) \frac{\int_0^1 m_{\text{ТМ}}(d_{\text{гр}}(p)) dp}{\int_0^1 m_{\text{гр}}(p) dp},$$

$$m_{\text{гр}} = \frac{\rho_{\text{гр}}}{6} \pi d_{\text{гр}}^3,$$

где $m_{\text{ТМ}}$ – масса вещества, адсорбированного на частице крупностью $d_{\text{гр}}$, кг/кг; $m_{\text{гр}}$ – масса частицы крупностью $d_{\text{гр}}$, кг; $d_{\text{гр}}$ – крупность частицы, м; p – вероятность, б/р.

Уравнение переноса консервативной примеси имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = E_L \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + (1 - \phi) \frac{\Delta_{\text{пор}} C_{\text{пор}}}{H \partial t} + \frac{M_{\text{ТМ}}}{H \partial x \partial y},$$

где E_L – коэффициент диффузии, м²/с; H – полная глубина, м; ϕ – плотность залегания донного грунта, б/р.

При этом, гетерофазный массообмен между поровыми водами и донными отложениями, а именно процессы адсорбции и десорбции, в модели не рассматривается, то есть система «поровые воды – донные отложения – водная масса» полагается равновесной.

Результаты и их обсуждение

Интенсивность процессов взмучивания ДО и поступление Мп в водную толщу водохранилища определяется сочетанием факторов стокового течения, регулируемого гидроузлами (двумя верхними и одной замыкающей ГЭС) и действием разнонаправленных ветров, вызывающих вихри дрейфовых течений различного масштаба [Koś, Zawisza, 2015; Sojka et al., 2018]. В Волжской и Камской ветках Куйбышевского водохранилища, до их слияния в Волго-Камском плесе, в основном преобладают стоковые течения, которые существенно зависят от объема попусков воды Чебоксарской и Нижнекамской ГЭС. Диапазон колебания скоростей течений в русловой части Волги и Камы в летне-осеннюю межень составляет 2–34 см/с. Ниже, в озеровидно-плесовых расширениях скорости стокового течения снижаются до 1–2 см/с и лишь в местах сужения акватории увеличиваются на порядок до 10–20 см/с. Именно в этих узких местах водохранилища наблюдаются интенсивные процессы размыва и намыва ДО, вызванных действием режима колебаний стокового течения. Непосредственно в самих плесах динамику течений определяют разнонаправленные ветра повышенной интенсивности и продолжительности, формирующие циркуляции течений. Наибольшие орбитальные скорости в крупномасштабных вихрях достигают 7–12 см/с, в вихрях меньших размеров – 1–4 см/с.

На рис. 3 приведены результаты моделирования валового содержания Мп в водной толще Куйбышевского водохранилища в безветренных (фоновых) условиях, когда наблюдаются только стоковое течение (рис. 3а) и когда дополнительно идет развитие ветровых течений (рис. 3б и рис. 3с). Расчеты показывают, что при отсутствии ветра на

всей акватории водохранилища распределение концентрации Мп достаточно однородное (0,04–0,10 мг/л), за исключением верхних русловых участков и мест сужения акватории водохранилища (0,12–0,30 мг/л). Зоны обширного взмучивания ДО и наибольшего содержания Мп (0,18–0,40 мг/л) в воде формируется на водохранилище при задании преобладающих ветров штормовой интенсивности 15 м/с северо-западного (СЗ) и юго-западного (ЮЗ) направлений. При ЮЗ ветре возникают вдольбереговые зоны взмучивания в районах больших вихревых образований дрейфовых течений с высокими орбитальными скоростями течений. Площадь таких зон составляет от 8 км² до 112 км².

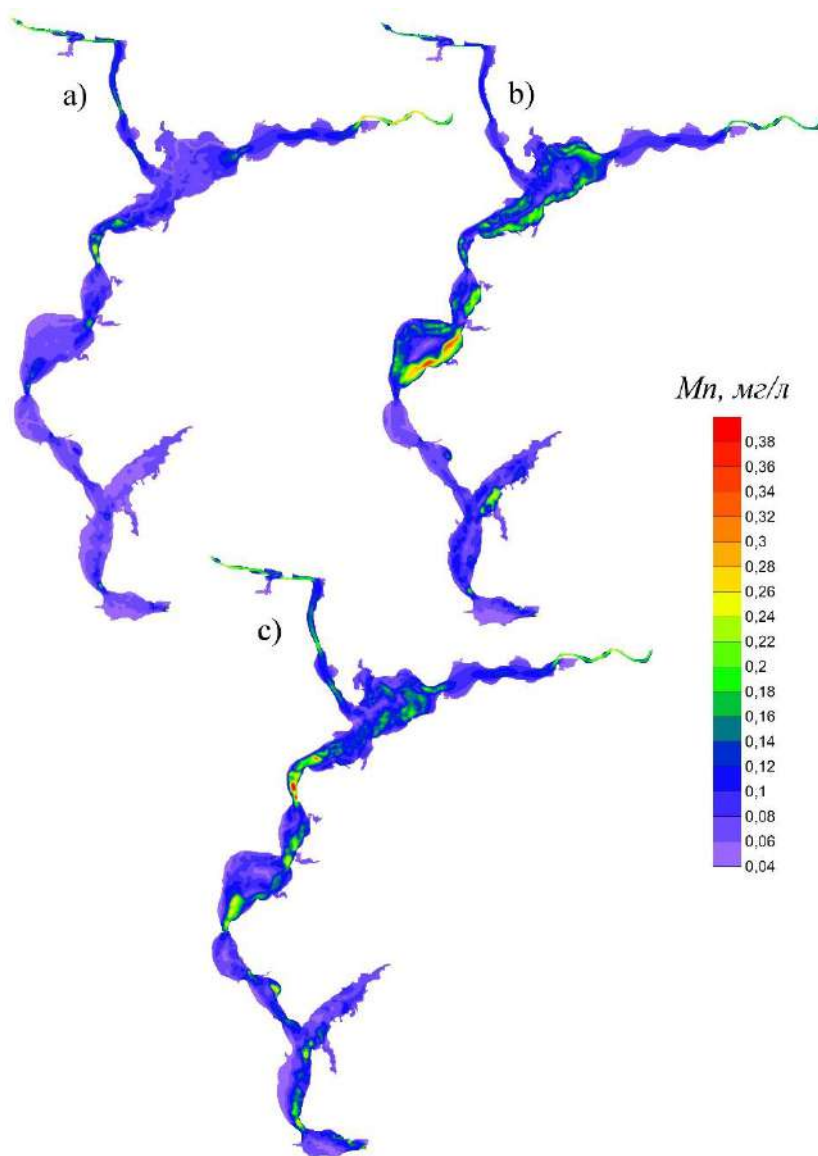


Рис. 3. Модельный расчет валового содержания Мп в Куйбышевском водохранилище при а) штиле, б) СЗ ветре, в) ЮЗ ветре

Fig. 3. Model calculation of the total Mn content in the Kuibyshev reservoir at a) calm, b) north-west wind, c) south-west wind

Самая крупная зона расположена в Ундоровском плесе, вытянутая вдоль мелководного левого берега (выше г. Ульяновск). Согласно расчетам, максимальная валовая концентрация Мп в этом районе водохранилища достигает 0,5 мг/л. При СЗ ветре также возникают обширные зоны взмучивания ДО, сформированные разномасштабными

вихрями течений площадью от 4 км² до 30 км². Наиболее крупная зона формируется в Тетюшинском плесе (г. Тетюши), где валовая концентрация Мп составляет 0,16–0,50 мг/л. Для примера на рис. 4 показаны направления скорости течений и зоны взмучивания ДО в районах Ундоровского и Тетюшинского плесов. Можно отметить, что в обоих плесах возникают крупномасштабные циркуляции, охватывающие целиком всю акваторию. В других плесах Куйбышевского водохранилища возникают локальные зоны взмучивания ДО, сформированные вихревой структурой течений мелкого и среднего масштаба с валовым содержанием Мп в воде 0,10–0,30 мг/л.

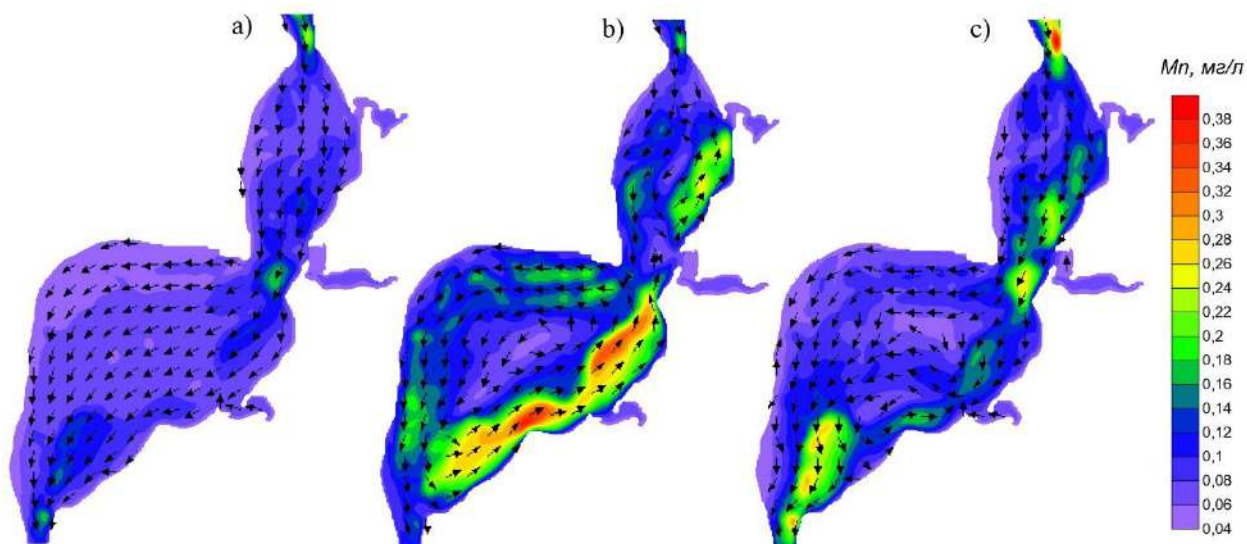


Рис. 4. Модельный расчет направления течения и валового содержания Мп в Ундоровском и Тетюшинском плесах при а) штиль, б) ЮЗ ветер, в) СЗ ветер

Fig. 4. Model calculation of the flow direction and the total Mn content in the Undorovsky and Tetyushinsky ples at a) calm, b) south-west wind, c) north-west wind

Значение коэффициента C_v , характеризующего пространственную неоднородность распределения валовой концентрации Мп в акватории Куйбышевского водохранилища при отсутствии ветра, составляет 48 %. При задании в модели ЮЗ ветра неоднородность распределения Мп увеличивается до 53 %, а при задании ветра СЗ направления – до 55 %.

В результате, зоны наиболее интенсивного взмучивания формируются вдоль мелководной береговой линии в районах всех плесов, в гидрографических сужениях между плесами, в Волжском и Камском русловых районах переменного подпора Куйбышевского водохранилища. Модельные расчеты внутренней нагрузки Мп в условиях штормовых ветров показывают, что ее валовая концентрация в воде может превышать фоновые значения в 4–50 раз, а вклад его потока из донных отложений в общий запас в воде Куйбышевского водохранилища составляет 48–49 %.

Заключение

Экологическое состояние крупных водоемов во многом зависит от поступления загрязняющих веществ из донных отложений в периоды интенсивного ветрового воздействия. В целях оценки и управления качеством воды водных объектов необходимо совершенствование методов прогнозирования распространения загрязняющих веществ в природных водах. Проведенные расчеты в Куйбышевском водохранилище показали, что при действии разнонаправленных штормовых ветров, валовая концентрация марганца достигает 0,5 мг/л, при фоновых значениях 0,04 мг/л. В это время по всей акватории водохранилища пространственная неоднородность возрастает до 55 %. Наиболее всего подвержены взмучиванию мелководные зоны преимущественно левобережья. Согласно

модельным расчетам, вклад потока марганца со дна в его содержание в водной толще при ветровом взмучивании донных отложений равен 49 %, что составляет половину его запаса в водохранилище. Разработанный авторами метод, основанный на уравнениях гидродинамики и алгоритмах двухфазного массопереноса, может быть использован для прогноза качества природной воды и оптимального управления режимом очистки питьевой воды на водозаборах и цехах водоподготовки.

Список источников

- Ежегодник «Качество поверхностных вод Российской Федерации». 2010–2024. Ростов-на-Дону, ФГБУ «Государственных гидрохимический институт», 451 с.
- Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод. 1987. Под ред. А.В. Караушева. Л., Гидрометеиздат, 285 с.
- СанПиН 2.1.4. 1074-01. «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. 2001. Контроль качества». М., 59 с.

Список литературы

- Веницианов Е.В., Кочарян А.Г. 1994. Тяжелые металлы в природных водах. В кн.: Воды суши: проблемы и решения. Под ред. М.Г. Хубларяна. М., ИВП РАН: 299–326.
- Веницианов Е.В., Лепихин А.П. 2002. Физико-химические основы моделирования миграции и трансформации тяжелых металлов в природных водах. Екатеринбург, РосНИИВХ, 236 с.
- Иванов Д.В., Григорьян Б.Р., Фастхутдинова Т.А. 1994. Кларки металлов в почках и аллювиальных отложениях островных ландшафтов Куйбышевского водохранилища. Казанский медицинский журнал, 75(1): 34–38. <https://doi.org/10.17816/kazmj89598>
- Иванов Д.В., Хасанов Р.Р., Маланин В.В., Законнов В.В. 2015. Пространственное распространение металлов в донных отложениях Куйбышевского водохранилища. Вода: химия и экология, 4(82): 81–86.
- Калайда М.Л., Хамитова М.Ф. 2015. Особенности химического состава донных отложений в Волжском плесе Куйбышевского водохранилища. Бутлеровские сообщения, 44(11): 104–112.
- Петрякова О.Д., Фоминова Е.А. 2011. Причины повышения концентрации марганца в природной и питьевой воде города Тольятти. Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева, 11: 111–116.
- Попова Н.В., Есина О.И., Татарников В.О., Веремеенко О.В., Воинова М.В., Монахова Г.А. 2009. Выявление и оценка вторичного загрязнения нефтегазоносных акваторий на примере лицензионного участка ООО «Каспийская нефтяная компания». Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе, 9: 30–33.
- Рахуба А.В., Шмакова М.В. 2022. Нестационарный режим водохранилища: опыт моделирования русловых процессов с подвижным дном. Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 15(2): 138–149. <https://doi.org/10.48612/fpg/peru-3z3h-gazh>
- Решетняк О.С., Закруткин В.Е. 2016. Донные отложения как источник вторичного загрязнения речных вод металлами (по данным лабораторного эксперимента). Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки, 4(192): 102–109.
- Степанова Н.Ю., Латыпова В.З. 2005. Механизмы детоксикации тяжелых металлов в компонентах водной экосистемы Куйбышевского водохранилища. Ученые записки Казанского государственного университета. Серия: Естественные науки, 147(3): 18–26.
- Толкачев Г.Ю., Корженевский Б.И. 2025. Влияние выноса тяжелых металлов из донных отложений водоемов на качество воды. Мелиорация и водное хозяйство, 1: 4–8. <https://doi.org/10.32962/0235-2524-2025-1-4-8>
- Gadd G.M., Griffiths A.J. 1977. Microorganisms and Heavy Metal Toxicity. Microbial Ecology, 4(4): 303–317. <https://doi.org/10.1007/BF02013274>
- Gadd G.M. 1990. Heavy Metal Accumulation by Bacteria and Other Microorganisms. Experientia, 46(8): 834–840. <https://doi.org/10.1007/BF01935534>
- Koś K., Zawisza E. 2015. Heavy Metals Contamination of Sediments from Chosen Dam Reservoirs in Terms of Their Usage in Earthworks. Wseas transactions on environment and development, 11: 136–142.

- Shmakova M. 2022. Sediment Transport in River Flows: New Approaches and Formulas. In: Modeling of Sediment Transport. London, IntechOpen: 1–22. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.103942>
- Sidoruk M. 2023. Pollution and Potential Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in the Bottom Sediments: A Case Study of Eutrophic Bukwałd Lake Located in an agricultural catchment. International Journal of Environmental Research and Public Health, 20(3): 2387. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph20032387>
- Sojka M., Jaskuła J., Siepak M. 2018. Heavy Metals in Bottom Sediments of Reservoirs in the Lowland Area of Western Poland: Concentrations, Distribution, Sources and Ecological Risk. Water, 11(1): 56. <http://dx.doi.org/10.3390/w11010056>

References

- Venicianov E.V., Kocharyan A.G. 1994. Tyazhelyye metally v prirodnykh vodakh [Heavy Metals in Natural Waters]. In: Vody sushi: problemy i resheniya [Land Waters: Problems and Solutions]. Ed. by M.G. Hublaryan. Moscow, Publ. IVP RAN: 299–326.
- Venicianov E.V., Lepixin A.P. 2002. Fiziko-khimicheskiye osnovy modelirovaniya migratsii i transformatsii tyazhelykh metallov v prirodnykh vodakh [Physico-Chemical Fundamentals of Modeling Migration and Transformation of Heavy Metals in Natural Waters]. Ekaterinburg, Publ. RosNIIVX, 236 p.
- Ivanov D.V., Grigoryan B.R., Faskhutdinova T.A. 1994. Clarks of Metals in Soils and Alluvial Deposits of Kuibyshev Reservoir Island Landscapes. Kazan Medical Journal, 75(1): 34–38 (in Russian). <https://doi.org/10.17816/kazmj89598>
- Ivanov D.V., Khasanov R.R., Malanin V.V., Zakonnov V.V. 2015. The Spatial Division of Metals in Sediments of the Kuibyshev Reservoir. Water: Chemistry and Ecology, 4(82): 81–86 (in Russian).
- Kalayda M.L., Khamitova M.F. 2015. The Specificity of Chemical Composition of Bottom Sediments in the Volga Reach of the Kuibyshev Reservoir. Butlerov Communications, 44(11): 104–112 (in Russian).
- Petryakova O.D., Fominova E.A. 2011. Causes of Increasing the Concentration of Manganese in Natural and Drinking Water of Togliatti. Vestnik of Volzhsky University named after V.N. Tatishchev, 11: 111–116 (in Russian).
- Popova N.V., Esina O.I., Tatarnikov V.O., Veremeenko O.V., Voinova M.V., Monahova G.A. 2009. Vyyavleniye i otsenka vtorichnogo zagryazneniya neftegazonosnykh akvatoriy na primere litsenzionnogo uchastka OOO «Kaspiyskaya neftyanaya kompaniya». [Identification and Assessment of Secondary Pollution of Oil and Gas-Bearing Water Areas Using the Example of the Licensed Area of the Caspian Oil Company LLC]. Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse, 9: 30–33.
- Rakhuba A.V., Shmakova M.V. 2022. Regime of Reservoir: Experience in Modeling Riverbed Processes with a Movable Bed. Fundamental and Applied Hydrophysics, 15(2): 138–149 (in Russian). <https://doi.org/10.48612/fpg/peru-3z3h-gazh>
- Reshetnyak O.S., Zakrutkin V.E. 2016. Bottom Sediments as a Source of Secondary Water Pollution by Metals (According to the Laboratory Experiment). Bulletin of Higher Education Institutes. North Caucasus Region. Natural Sciences, 4(192): 102–109 (in Russian).
- Stepanova N.Yu., Latypova V.Z. 2005. Mekhanizmy detoksikatsii tyazhelykh metallov v komponentakh vodnoy ekosistemy Kuybyshevskogo vodokhranilishcha [Mechanisms of Detoxification of Heavy Metals in the Components of the Aquatic Ecosystem of the Kuibyshev Reservoir]. Uchenyye zapiski Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennyye nauki, 147(3): 18–26.
- Tolkachev G.Yu., Korzhenevskiy B.I. 2025. Vliyaniye vynosa tyazhelykh metallov iz donnykh otlozheniy vodoyemov na kachestvo vody [Influence of Removal of Heavy Metals from Bottom Sediments of Reservoirs on Water Quality]. Melioratsiya i vodnoye khozyaystvo, 1: 4–8. <https://doi.org/10.32962/0235-2524-2025-1-4-8>
- Gadd G.M., Griffiths A.J. 1977. Microorganisms and Heavy Metal Toxicity. Microbial Ecology, 4(4): 303–317. <https://doi.org/10.1007/BF02013274>
- Gadd G.M. 1990. Heavy Metal Accumulation by Bacteria and Other Microorganisms. Experientia, 46(8): 834–840. <https://doi.org/10.1007/BF01935534>
- Koś K., Zawisza E. 2015. Heavy Metals Contamination of Sediments from Chosen Dam Reservoirs in Terms of Their Usage in Earthworks. Wseas transactions on environment and development, 11: 136–142.

- Shmakova M. 2022. Sediment Transport in River Flows: New Approaches and Formulas. In: Modeling of Sediment Transport. London, IntechOpen: 1–22. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.103942>
- Sidoruk M. 2023. Pollution and Potential Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in the Bottom Sediments: A Case Study of Eutrophic Bukwałd Lake Located in an agricultural catchment. International Journal of Environmental Research and Public Health, 20(3): 2387. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph20032387>
- Sojka M., Jaskuła J., Siepak M. 2018. Heavy Metals in Bottom Sediments of Reservoirs in the Lowland Area of Western Poland: Concentrations, Distribution, Sources and Ecological Risk. Water, 11(1): 56. <http://dx.doi.org/10.3390/w11010056>

*Поступила в редакцию 18.12.2025;
поступила после рецензирования 02.02.2026;
принята к публикации 02.03.2026*

*Received December 18, 2025;
Revised February 02, 2026;
Accepted March 02, 2026*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рахуба Александр Владимирович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией мониторинга водных объектов, Самарский федеральный исследовательский центр РАН, г. Тольятти, Россия

Шмакова Марина Валентиновна, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории математических методов моделирования, Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander V. Rakhuba, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Laboratory of Monitoring Water Bodies, Samara Federal Research Scientific Center of Russian Academia of Science, Tolyatti, Russia

Marina V. Shmakova, Doctor of Sciences in Geography, Leading Researcher, Head of the Laboratory of Mathematical Methods of Modelling, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

УДК 528.88

DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-3-646-658

EDN QIKQLS

Распознавание лесного покрова залежных земель Среднерусской лесостепи на основе различных видов спутниковых данных

Терехин Э.А.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет
Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, 85
terekhin@bsuedu.ru

Аннотация. Анализ лесного покрова залежных земель, формирующегося в условиях восстановительных сукцессий, необходим для мониторинга их состояния и одновременно для комплексной оценки изменений в ландшафтах. В статье представлены результаты распознавания лесного покрова залежных земель Среднерусской лесостепи, полученные методом классификации спутниковых данных *Sentinel-2 MSI*, синтезированных в каналах разного пространственного разрешения, и данных *Landsat-9 OLI* с использованием алгоритмов машинного обучения *Random Forest* и *Support Vector Machine*. Во всех изученных вариантах общая точность моделей, рассчитанных на основе этих методов, была примерно одинаковой при незначительном превышении для моделей на основе SVM. Средняя точность моделей, полученных методами *Random Forest* и *Support Vector Machine*, и рассчитанных на основе данных *Sentinel-2 MSI*, синтезированных в каналах самого высокого пространственного разрешения, для разделения участков сомкнутого лесного покрова залежных земель и участков с его отсутствием составила 0,85 и 0,86. Модели классификации, полученные на основе *Sentinel-2* с дополнительными каналами из коротковолнового инфракрасного диапазона, но меньшим пространственным разрешением, показали точность 0,80 и 0,82. Точность аналогичных моделей, полученных на основе данных *Landsat-9 OLI*, составила 0,78 и 0,79. Для моделей, полученных методом *Random Forest* по данным *Sentinel-2 MSI*, наибольший вклад в разделение анализируемых участков залежей показали спектрально-отражательные характеристики зеленого диапазона. Для аналогичных моделей, рассчитанных по данным *Landsat-9 OLI*, наибольший вклад в разделение классов установлен для спектрально-отражательных характеристик зеленого и коротковолнового инфракрасного диапазонов.

Ключевые слова: залежные земли, лесной покров, данные дистанционного зондирования, машинное обучение, алгоритмы классификации, *Landsat*, *Sentinel-2*

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-17-00361, <https://rscf.ru/project/26-17-00361/>

Для цитирования: Терехин Э.А. 2026. Распознавание лесного покрова залежных земель Среднерусской лесостепи на основе различных видов спутниковых данных. Региональные геосистемы, 50(3): 646–658. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-646-658 EDN: QIKQLS

Identifying the Forest Cover of Abandoned Agricultural Lands in the Central Russian Forest-Steppe Using Various Types of Satellite Data

Edgar A. Terekhin

Belgorod State National Research University,
85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia
terekhin@bsuedu.ru

Abstract. An analysis of the forest cover of abandoned agricultural lands formed during secondary successions, is necessary for monitoring their condition and providing a comprehensive assessment of changes

© Терехин Э.А., 2026

in landscapes. The paper presents the results of forest cover recognition of abandoned agricultural lands of the Central Russian forest-steppe. They were obtained by classifying Sentinel-2 MSI data synthesized in bands of different spatial resolutions and Landsat-9 OLI data using the Random Forest and Support Vector Machine algorithms. The overall accuracy of the models calculated based on these methods was approximately the same in all studied variants, with a slight excess for SVM-based models. Models using Random Forest and Support Vector Machine computed on Sentinel-2 MSI data synthesized in the highest spatial resolution bands to distinguish between areas of closed forest cover of abandoned agricultural land and areas of no forest cover showed overall accuracies of 0.85 and 0.86. Classification models obtained from Sentinel-2 data with additional shortwave infrared bands but lower spatial resolution showed accuracies of 0.80 and 0.82. The accuracy of similar models obtained based on Landsat-9 OLI data was 0.78 and 0.79. For the models obtained using Random Forest methods based on Sentinel-2 MSI data, the green range spectral reflectance showed the greatest contribution to the separation of the analyzed areas of abandoned agricultural land. For similar models obtained using Landsat-9 OLI data, the greatest contribution to class separation was found for the green and shortwave infrared ranges spectral reflectance.

Keywords: abandoned agricultural lands, forest cover, remote sensing data, machine learning, classification algorithms, Landsat, Sentinel-2

Acknowledgements: The work was supported by grant of Russian Science Foundation (Project Number 26-17-00361)

For citation: Terekhin E.A. 2026. Identifying the Forest Cover of Abandoned Agricultural Lands in the Central Russian Forest-Steppe Using Various Types of Satellite Data. *Regional Geosystems*, 50(3): 646–658 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-646-658 EDN: QIKQLS

Введение

Оценка состояния залежных земель, как элементов ландшафтов, обуславливает необходимость анализа их растительного покрова и его изменений вследствие восстановительных сукцессий. На многих залежных землях лесной и лесостепной природных зон России после прекращения использования формируется древесная растительность [Сизых и др., 2023; Данилов и др., 2024; Елсаков и др., 2025], распространение которой приводит к естественному облесению многих из них при отсутствии последующих нарушений. Происходящие изменения приводят к повышению лесистости территории и оказывают влияние на многие процессы в ландшафтах. С другой стороны, данные о лесном покрове залежей и степени его формирования необходимы для планирования их использования и разработки стратегий землепользования [Иванов и др., 2020], что особенно актуально для регионов, где залежные земли получили значительное распространение [Fayet et al., 2022; Иванова и др., 2024]. В этой связи развитие методов картографирования лесного покрова залежных земель становится одним из ключевых направлений в системе ландшафтных исследований.

Развитие методов выявления и оценки характеристик залежных земель в настоящее время, в первую очередь, связано с подходами к обработке данных дистанционного зондирования Земли [Ershov et al., 2022; Wu et al., 2023; Liu et al., 2025]. Обусловлено это как совершенствованием самих спутниковых данных, так и спецификой залежных земель как объектов исследования. Регулярность получения, значительный территориальный охват и наличие каналов в диапазонах, чувствительных к различным параметрам растительного покрова выступают ключевыми преимуществами, необходимыми для пространственно-временных оценок залежных земель. Вследствие восстановительных сукцессий их растительный покров может меняться при интенсивном распространении древесной растительности достаточно быстро и приводить к существенным изменениям спектрально-отражательных свойств уже через несколько лет. Обусловлено это тем, что коэффициенты спектральной яркости лесных насаждений в первые годы их формирования меняются

достаточно быстро, что проявляется на различных типах спутниковых данных [Терехин, 2020; Terekhin, 2023].

Современные подходы к картографированию залежных земель и их характеристик во многом основаны на совместном анализе различных видов спутниковой информации, применении методов классификации снимков, включая алгоритмы машинного обучения. Их примерами выступают методы *Random Forest* (случайного леса) [Breiman, 2001; Tassi et al., 2021; Тарасова и др., 2024; Иванов, Гафуров, 2025], *Support Vector Machine* (метод опорных векторов) [Estel et al., 2015; Senf et al., 2020]. Вместе с тем вопрос оценки состояния растительного покрова залежных земель по спутниковым данным во многом остается открытым. Обусловлено это особенностями породного состава древесной растительности и ее формированием в условиях конкретных регионов, характеристиками самих спутниковых данных, отличающихся по составу и числу каналов, их пространственному и радиометрическому разрешению. При распознавании лесного покрова залежных земель определенных регионов необходимой задачей становится сравнительный анализ разных методов классификации и видов спутниковой информации.

Среднерусская лесостепь относится к регионам интенсивного аграрного использования. Залежные земли на его территории получили наибольшее распространение с 1990-х гг. Регион расположен в условиях умеренно-континентального климата. В почвенном покрове широко распространены подтипы черноземов и серых лесных почв. На протяжении последних столетий ландшафты претерпели существенные изменения, в первую очередь, вследствие аграрного освоения территории, лесной покров был существенно трансформирован [Чендев, 2008]. Для региона характерно преобладание пахотных угодий в структуре земель [Косолапов и др., 2015], которые преобладают во всех областях ЦЧР и в Орловской области. В условиях высокой степени распашки залежные земли выступают объектами, позволяющими оценить особенности сукцессий после снижения антропогенной нагрузки. Вследствие зональных особенностей для их почвенного покрова характерны различные тренды постагрогенного восстановления [Голеусов и др., 2024]. Лесной покров Среднерусской лесостепи представлен преимущественно широколиственными лесами, в первую очередь, дубравами, которые распространены на водоразделах, верховьях и склонах овражно-балочных систем. Кроме лиственных лесов, преимущественно по левым берегам рек, представлены сосновые леса, многие из которых имеют искусственное происхождение. В лесном покрове широко представлены небольшие лесные массивы и лесные полосы. С учетом ландшафтных особенностей региона, оценки его лесного покрова актуальны также в контексте оптимальной лесистости в условиях преобладания аграрных земель [Кузьменко и др., 2013]. Леса и лесные полосы часто располагаются среди пахотных угодий и непосредственно граничат с оставленными аграрными землями. На них в условиях естественного восстановления наиболее часто формируется древесная растительность из типичных для региона лиственных пород деревьев.

Цель исследования – сравнительный анализ различных методов машинного обучения и разных видов спутниковых данных для распознавания лесного покрова залежных земель, типичных для Среднерусской лесостепи. Ключевые задачи исследования включали формирование аналитической выборки залежных земель, оценку их фактического лесного покрова, его распознавание на основе методов *Random Forest* (случайный лес) и *Support Vector Machine* (метод опорных векторов) по данным *Sentinel-2* и *Landsat-9 OLI* и сопоставление их результатов.

Объекты и методы исследования

Исследование выполнено на основе данных, полученных с оставленных аграрных земель, типичных для Среднерусской лесостепи и, расположенных на территории Курской и

Орловской областей. Объекты исследования подбирали таким образом, чтобы репрезентативно представлять залежные земли, отличающиеся особенностями лесного покрова – характеризовать объекты с наличием участков сплошного лесного покрова, разреженного лесного покрова или участки без него – с травянистой растительностью. Лесной покров залежных земель, отбираемых для анализа, должен был состоять из древесной растительности лиственных пород. Обусловлено это стремлением минимизировать ошибки распознавания, вызванные различием спектральных отражательных свойств лиственных и хвойных насаждений. Для сравнения возможностей выявления лесного покрова на основе исследуемых спутниковых данных, залежные земли должны были находиться одновременно в пределах определенной спутниковой сцены *Landsat-8/9* и тайла (фрагмента) снимка *Sentinel-2*. При этом в пределах анализируемой территории должно было присутствовать достаточное число залежных земель, отличающихся относительной величиной покрытия лесной растительностью. Исходя из этого условия, объекты исследования отбирали в пределах ячейки 178/024 (*path/row*) системы *WRS-2* (*Worldwide Reference System*) и тайла *Sentinel-2* с номером ТЗ6UXС. Выявление объектов осуществлено на основе визуального анализа спутниковых данных *Sentinel-2* летнего периода 2022 г. с минимальным присутствием облачности, синтезированных в каналах наиболее высокого пространственного разрешения (10 м), и снимков сверхвысокого пространственного разрешения из интернет-сервисов открытого доступа. Общая выборка залежей включала 152 объекта общей площадью 4027,7 га. Для них методом ручной оцифровки по спутниковым данным подготовлен векторный слой границ. На следующем этапе на основе визуального анализа снимков *Sentinel-2*, синтезированных в каналах видимого спектра (каналы 4–3–2), и снимков сверхвысокого пространственного разрешения, в пределах каждой залежи выявлены участки, отличающиеся особенностями лесного покрова. В исследовании были рассмотрены 2 варианта. Первый из них включал разделение залежных земель на участки с присутствием сплошного лесного покрова и его отсутствием. Для снимков *Sentinel-2*, состоящих из каналов с разрешением 10 м, такое разделение фактически позволяло выявлять даже небольшие участки, покрытые сомкнутой древесной растительностью. Второй вариант включал разделение залежных земель на участки сплошного, разреженного лесного покрова и участки без него, с травянистой растительностью. Второй вариант, таким образом, представлял расширенную версию первого. Общая выборка составила 597 участков (табл. 1) и представляла векторный слой.

Таблица 1
Table 1

Характеристики проанализированных участков залежных земель Среднерусской лесостепи, отличающихся присутствием лесного покрова

Parameters of abandoned agricultural lands of the Central Russian forest-steppe having a different forest cover

Тип участка	Число участков	Площадь общая, га
Сплошной лесной покров	267	2294,2
Разреженный лесной покров	230	804,9
Отсутствие лесного покрова	100	928,6
Всего	597	4027,7

Полученный слой использован для формирования аналитической выборки. Для этого рассчитаны геометрические центры выявленных участков. Вокруг них были построены буферные зоны в виде круга радиусом 10 м, которые затем были использованы для извлечения спектрально-отражательных характеристик из спутниковых данных, используемых для классификации лесного покрова. Соответствующая величина подобрана с учетом размера пикселей используемых снимков.

Для распознавания (классификации) лесного покрова залежных земель использованы три вида спутниковых данных. Первый вид представлял снимок *Sentinel-2 MSI*, полученный 12.08.2022 и, синтезированный в 4-х каналах самого высокого пространственного разрешения, 10 м, охватывающих синий, зеленый, красный и ближний инфракрасный диапазоны (каналы 2, 3, 4, 8). Второй вариант представлял этот же снимок, синтезированный в 6-ти каналах, приведенных к разрешению 20 м, но с использованием кроме каналов видимого и ближнего инфракрасного диапазонов еще двух каналов из коротковолнового участка спектра (каналы 11, 12). В данных *Sentinel-2* эти каналы изначально имеют более низкое пространственное разрешение по сравнению с каналами из видимой и ближней инфракрасной областей. В используемом снимке каналы с разрешением 10 м, таким образом, были приведены к разрешению каналов коротковолнового инфракрасного диапазона. Это позволило расширить число исследуемых каналов аналогичного пространственного разрешения. Третий вид спутниковой информации представлял снимок *Landsat-9 OLI* от 6.06.2023 с пространственным разрешением 30 м, состоящий из шести каналов, примерно аналогичных по диапазонам спектра каналам второго снимка *Sentinel-2*. Он включал каналы, полученные в синем, зеленом, красном, ближнем инфракрасном и двух коротковолновых инфракрасных участках спектра. В рамках исследования проведено сравнение результатов классификации перечисленных спутниковых данных. Подобранный снимок *Landsat* был наименее облачным снимком вегетационного периода, ближайшим к дате получения снимка *Sentinel-2*. При этом оба изображения были получены в период активной вегетации. Данные *Landsat-9 OLI* в отличие от данных *Sentinel-2 MSI* имеют менее высокое пространственное разрешение при более высоком радиометрическом разрешении. На основе каждого вида спутниковых данных сформированы аналитические выборки, состоящие из классов, отличающихся по особенностям лесного покрова и соответствующих им значений спектрально-отражательных характеристик. Выборки были получены с применением предварительно созданного векторного слоя участков залежных земель, состоящего из круговых полигонов, для каждого из которых была известна принадлежность к определенному классу. Вычисление спектрально-отражательных характеристик выполнено методом зональной статистики. Каждая выборка (597 объектов) была разделена на обучающую и тестовую в соотношении 60 % и 40 %.

Классификация лесного покрова залежных земель выполнена с использованием двух методов: случайного леса (*Random forest*) и опорных векторов (*Support Vector Machine*). Они представляют разные алгоритмы машинного обучения. Классификация лесного покрова методом *Random Forest* выполнена с оценкой показателя важности (*Importance*) независимых переменных, характеризующего вклад спектрально-отражательных характеристик из различных диапазонов в разделение классов. Одновременно выполнена оценка графика зависимости ошибки модели от количества деревьев решений. Для проведения исследования использованы модели со 150 деревьями решений. Классификация лесного покрова методом *SVM* выполнена с использованием в качестве ядра радиальной базисной функции (*Radial Basis Function*), которая выбрана в силу специфики используемых данных, представляющих спутниковые снимки. Оценка качества результатов классификации для обоих методов выполнена на тестовой выборке, на основе матрицы ошибок. Она характеризует число верно и ошибочно классифицированных пикселей. Для каждого варианта моделей оценена общая точность (число правильных ответов модели) и ее статистическая значимость. В качестве порогового значения выбрана величина 0,05. С использованием рассчитанных моделей, в первую очередь, показавших наиболее высокую точностью распознавания, проведена классификация лесного покрова залежных земель на основе анализируемых видов спутниковых данных. Для полученных результатов в дополнение к количественной оценке точности, проведено визуальное сопоставление с фактическими особенностями лесного покрова, отображающимися на снимках.

Результаты и их обсуждение

Общая точность модели *Random Forest*, построенной для распознавания лесного покрова и травянистых участков залежных земель на основе данных *Sentinel-2*, состоящих из 4-х каналов с разрешением 10 м, на тестовой выборке составила 85 % (табл. 2). Модель статистически значима на уровне 0,05. Коэффициент *Kappa*, характеризующий согласие модели с фактическими классами с поправкой на случайность, составил 0,70. Внутренняя ошибка алгоритма, полученная на обучающей выборке, при этом составила 11,3 %. Наиболее высокие значения показателей важности переменных для разделения классов установлены для спектрально-отражательных характеристик зеленого канала, наименьшие – для характеристик ближнего инфракрасного диапазона. Общая точность модели *SVM*, построенной по этим же данным *Sentinel-2*, на тестовой выборке оказалась несколько выше, составив 86 % (см. табл. 2). Коэффициент *Kappa* составил 0,73. В разрезе анализируемых классов объектов ее повышенная точность проявляется при выявлении участков отсутствия сплошного лесного покрова. При использовании для классификации снимков *Sentinel-2*, состоящих из каналов самого высокого пространственного разрешения (10 м), использование такой модели фактически позволяет выявлять все участки, покрытые древесной растительностью.

Таблица 2
Table 2

Показатели точности выявления лесного покрова залежных земель Среднерусской лесостепи на основе данных *Sentinel-2* (4 канала с разрешением 10 м) с разделением на 2 класса
Accuracy indicators for recognizing the forest cover of abandoned agricultural lands in the Central Russian forest-steppe based on *Sentinel-2* data (4 bands with a resolution of 10 m) divided into two classes

Метод	Общая точность модели	Уровень значимости	Точность выделения классов	
			Сплошной лесной покров	Отсутствие сплошного лесного покрова
<i>Random Forest</i>	0,85	< 0,05	0,83	0,86
<i>SVM</i>	0,86	< 0,05	0,83	0,89

Точность модели *Random Forest*, построенной на основе данных *Sentinel-2*, состоящих из 4-х каналов с разрешением 10 м, для распознавания трех классов, оказалась заметно ниже (табл. 3). Внутренняя ошибка алгоритма, полученная на обучающей выборке, для этой модели составила 17,0 %. Показатели важности отдельных переменных при этом существенных изменений не претерпели: наиболее высокие значения зафиксированы для спектрально-отражательных характеристик зеленого канала, самые низкие – для характеристик ближнего инфракрасного диапазона. Общая точность модели *SVM*, рассчитанной по этим же спутниковым данным, на тестовой выборке также как и в предыдущем случае оказалась немного выше, составив 76% (табл. 3).

Таблица 3
Table 3

Показатели точности выявления лесного покрова залежных земель Среднерусской лесостепи на основе данных *Sentinel-2* (4 канала с разрешением 10 м) с разделением на 3 класса
Accuracy indicators for recognizing the forest cover of abandoned agricultural lands in the Central Russian forest-steppe based on *Sentinel-2* data (4 bands with a resolution of 10 m) divided into three classes

Метод	Общая точность модели	Уровень значимости	Точность выделения классов		
			Сплошной лесной покров	Разреженный лесной покров	Отсутствие лесного покрова
<i>Random Forest</i>	0,74	< 0,05	0,82	0,65	0,70
<i>SVM</i>	0,76	< 0,05	0,83	0,67	0,75

Снижение точности обоих видов моделей при разделении участков залежей на три класса связано с близкими значениями спектрально-отражательных характеристик участков с разреженным лесным покровом и характеристик соседних классов. Если сплошной лесной покров по спектрально-отражательным характеристикам существенно отличается от травянистого покрова залежей, то разреженный покров занимает промежуточное положение между ними. Особенно сильно это влияние проявляется при увеличении размера пикселей анализируемых снимков. Соответствующая особенность осложняет выделение всех трех классов на спутниковых данных. Вместе с тем, достаточно высокая эффективность моделей, разделяющих пиксели залежей на 2 класса, отражается при сравнении снимков *Sentinel-2* с разрешением 10 м, синтезированных в естественных цветах, и результатов автоматизированного дешифрирования лесного покрова (рис. 1). Наиболее высокое пространственное разрешение среди анализируемых данных при этом снижает влияние пограничных пикселей, содержащих спектральные смеси характеристик залежей и соседних классов объектов.

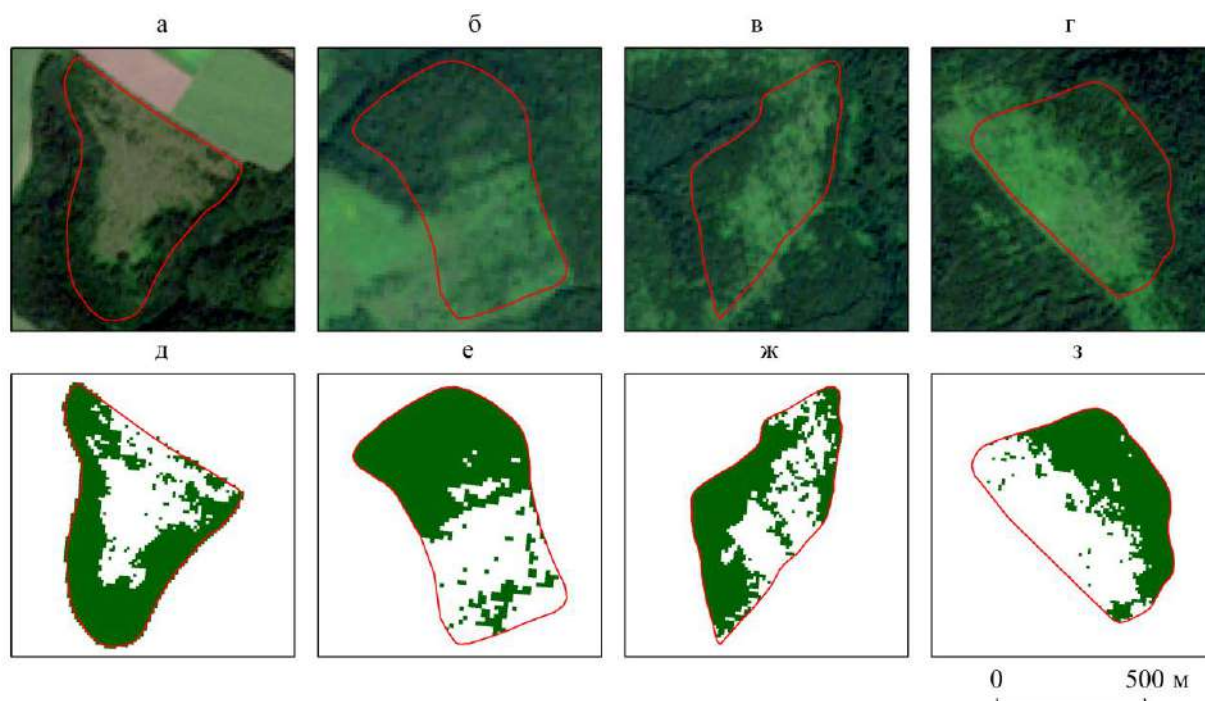


Рис. 1. Примеры залежных земель Среднерусской лесостепи на снимках *Sentinel-2* (а-г) и результатов распознавания их лесного покрова с использованием метода *Random Forest* (д-з)
Fig. 1. Examples of abandoned agricultural lands of the Central Russian forest-steppe in *Sentinel-2* data (images а-г) and their forest cover recognition results based on the *Random Forest* method (images д-з)

Суммарная точность модели *Random Forest*, построенной на основе снимков *Sentinel-2* с 6 каналами и разрешением 20 м для разделения лесного покрова залежных земель на 2 класса, оказалась ниже точности аналогичной модели, рассчитанной на основе данных *Sentinel-2* с 4 каналами, но с пространственным разрешением 10 м (табл. 4). Коэффициент *Kappa* составил 0,60. Внутренняя ошибка алгоритма, полученная на обучающей выборке, для этой модели составила 14,1 %. Наиболее высокие значения показателей важности переменных также как и в предыдущем случае установлены для спектрально-отражательных характеристик зеленого канала.

Таблица 4
Table 4

Показатели точности выявления лесного покрова залежных земель Среднерусской лесостепи на основе данных *Sentinel-2* (6 каналов с разрешением 20 м) с разделением на 2 класса
Accuracy indicators for recognizing the forest cover of abandoned agricultural lands in the Central Russian forest-steppe based on *Sentinel-2* data (six bands with a resolution of 20 m) divided into two classes

Метод	Общая точность модели	Уровень значимости	Точность выделения классов	
			Сплошной лесной покров	Отсутствие сплошного лесного покрова
<i>Random Forest</i>	0,80	< 0,05	0,73	0,87
<i>SVM</i>	0,82	< 0,05	0,76	0,88

Общая точность модели *SVM*, построенной по этому же снимку, на тестовой выборке оказалась незначительно выше модели *Random Forest*, достигнув 82 % (табл. 4). Коэффициент *Kappa* составил 0,64. Модели, рассчитанные на основе обоих методов при этом статистически значимы на уровне многим меньше 0,05. Сопоставление полученных моделей с моделями, рассчитанными на основе 4-х самых детальных каналов *Sentinel-2* (см. табл. 2) показывает, что в разрезе отдельных классов заметное снижение точности распознавания произошло для класса «сплошной лесной покров». Точность выявления участков с его отсутствием существенно не снизилась.

Модель классификации *Random Forest*, рассчитанная на основе снимков *Sentinel-2* с 6 каналами и разрешением 20 м, для разделения лесного покрова залежных земель на 3 класса (табл. 5) показала существенное снижение общей точности в сравнении с аналогичной моделью для разделения залежных земель на 2 класса. Внутренняя ошибка алгоритма, полученная на обучающей выборке, для этой модели составила 22,7 %. Особенностью модели является более выраженное значение важности (*Importance*) спектрально-отражательных характеристик зеленого диапазона при разделении анализируемых классов по сравнению с другими переменными. Модель классификации, полученная методом *SVM* на основе этого же изображения, показала более высокую точность в целом и для выделения отдельных классов (табл. 5). При этом в сравнении с моделью *SVM* для разделения двух классов, ее общая точность ниже.

Таблица 5
Table 5

Показатели точности выявления лесного покрова залежных земель Среднерусской лесостепи на основе данных *Sentinel-2* (6 каналов с разрешением 20 м) с разделением на 3 класса
Accuracy indicators for recognizing the forest cover of abandoned agricultural lands in the Central Russian forest-steppe based on *Sentinel-2* data (six bands with a resolution of 20 m) divided into three classes

Метод	Общая точность модели	Уровень значимости	Точность выделения классов		
			Сплошной лесной покров	Разреженный лесной покров	Отсутствие лесного покрова
<i>Random Forest</i>	0,69	< 0,05	0,73	0,61	0,73
<i>SVM</i>	0,73	< 0,05	0,76	0,67	0,79

Модель классификации, построенная методом *Random Forest* на основе данных *Landsat-9 OLI*, при разделении участков залежей на 2 класса показала общую точность 0,78 (табл. 6), что ниже точности моделей, рассчитанных на основе обоих вариантов снимков *Sentinel-2*. Внутренняя ошибка алгоритма, полученная на обучающей выборке,

для этой модели составила 17,4 %, что не сильно отличается от ошибки моделей, рассчитанных по *Sentinel-2*. Особенностью модели, рассчитанной на основе данных *Landsat-9* в сравнении с моделью по данным *Sentinel-2*, является высокий вклад в разделение классов не только спектрально-отражательных характеристик зеленого, но и коротковолнового инфракрасного диапазона. Модель классификации, рассчитанная методом *SVM*, на основе этого же изображения, характеризовалась более высокой общей точностью при пониженной точности для класса сплошного лесного покрова и более высокой точности для участков его отсутствия (табл. 6). Модели, рассчитанные обоими методами по данным *Landsat-9*, также статистически значимы на уровне 0,05, как и модели, полученные по данным *Sentinel-2*, что говорит об эффективности каждой из них.

Таблица 6
Table 6

Показатели точности выявления лесного покрова залежных земель Среднерусской лесостепи на основе данных *Landsat-9 OLI* с разделением на 2 класса
Accuracy indicators of forest cover recognition of abandoned agricultural lands of the Central Russian forest-steppe based on *Landsat-9 OLI* data with division into two classes

Метод	Общая точность модели	Уровень значимости	Точность выделения классов	
			Сплошной лесной покров	Отсутствие сплошного лесного покрова
<i>Random Forest</i>	0,78	< 0,05	0,63	0,89
<i>SVM</i>	0,79	< 0,05	0,61	0,92

Модели классификации, полученные методами *Random Forest* и *SVM* по данным *Landsat-9 OLI*, при разделении залежных земель на 3 класса (табл. 7), показали одинаковую общую точность, которая при этом ниже, чем у всех предыдущих моделей. Внутренняя ошибка алгоритма для модели *Random Forest*, полученная на обучающей выборке, составила 27,7 %. Вместе с тем анализ этой модели также выявил наиболее высокий вклад спектрально-отражательных характеристик из зеленой и коротковолновой инфракрасной области спектра в разделении классов лесного покрова залежных земель.

Таблица 7
Table 7

Показатели точности выявления лесного покрова залежных земель Среднерусской лесостепи на основе данных *Landsat-9 OLI* с разделением на 3 класса
Accuracy indicators for recognizing the forest cover of abandoned agricultural lands in the Central Russian forest-steppe based on *Landsat-9 OLI* data divided into three classes

Метод	Общая точность модели	Уровень значимости	Точность выделения классов		
			Сплошной лесной покров	Разреженный лесной покров	Отсутствие лесного покрова
<i>Random Forest</i>	0,60	< 0,05	0,66	0,58	0,33
<i>SVM</i>	0,60	< 0,05	0,64	0,72	0,16

Сравнение всех 6 вариантов моделей классификации лесного покрова залежных земель показывает последовательное снижение общей точности при уменьшении пространственного разрешения снимков. Для данных *Sentinel-2* включение двух новых каналов в модель не компенсировало ее общую точность, обусловленную снижением пространственного разрешения каналов с 10 м до 20 м. Во всех рассмотренных моделях

введение класса «разреженный лесной покров» приводило к снижению точности классификации по сравнению с моделями, использующими разделение на сплошной лесной покров и его отсутствие.

Исследования, связанные с классификацией снимков, направлены, как правило, на разделение различных классов земель, которые очень часто существенно отличаются по спектрально-отражательным характеристикам на спутниковых данных. Участки залежных земель, различающиеся лесным покровом, могут при этом иметь близкие отражательные свойства, что осложняет их автоматизированное разделение. Учитывая, что в исследовании классификация проводилась не для разных классов объектов, например, лесов или пахотных угодий, а в пределах одного класса (залежные земли), полученные модели характеризуются достаточно высокой точностью.

Заключение

Исследованы возможности распознавания лесного покрова залежных земель, типичных для Среднерусской лесостепи, на основе различных видов спутниковых данных с использованием методов машинного обучения *Random Forest* и *Support Vector Machine*. Проанализированы данные *Sentinel-2 MSI* в 4-х каналах видимого и ближнего инфракрасного диапазонов с пространственным разрешением 10 м, данные *Sentinel-2* в 6 каналах видимого, ближнего и коротковолнового инфракрасного участках спектра с разрешением 20 м и данные *Landsat-9 OLI* в каналах аналогичных диапазонов с разрешением 30 м. Наиболее высокая общая точность распознавания (86 %) достигнута для моделей, предполагающих разделение на сплошной лесной покров и его отсутствие, и, основанных на снимках *Sentinel-2*, включающих 4-канала с разрешением 10 м, полученных в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. На основе этих же данных достигнута наиболее высокая точность автоматизированного выделения на залежных землях участков сплошного, разреженного лесного покрова и травянистых участков. Но в этом случае точность моделей была существенно ниже, чем в случае разделения участков залежей на 2 класса. Во всех проанализированных случаях общая точность моделей построенных методами *Random Forest* и *Support Vector Machine* оказалась примерно одинаковой при незначительном превышении у модели, рассчитанной методом SVM. Модели классификации статистически значимы на уровне 0,05 для всех рассмотренных вариантов спутниковых данных. В моделях, полученных методом *Random Forest* на основе данных *Sentinel-2 MSI*, наибольший вклад в разделение классов показали спектрально-отражательные характеристики зеленого диапазона. Для моделей, рассчитанных на основе данных *Landsat-9 OLI*, наибольший вклад в выделение классов выявлен для характеристик зеленого и коротковолнового инфракрасного диапазонов.

Список литературы

- Голеусов П.В., Лисецкий Ф.Н., Малышев А.В. 2024. Тренды воспроизводства постагрогенных почв в лесостепной зоне европейской территории России. Геополитика и экогеодинамика регионов, 20(1): 165–178.
- Данилов Д.А., Яковлев А.А., Зайцев Д.А., Иванов А.А. 2024. Изменения в постагрогенных почвах в ходе восстановления древесной растительности в условиях юго-запада Ленинградской области. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 251: 97–122. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.251.97-122>
- Елсаков В.В., Мыльникова Т.А., Боровлёв А.Ю., Баскин Л.М., Щанов В.М. 2025. Климатические и постаграрные векторы трансформации лесопокрываемых территорий староосвоенных районов Европейской России. Теоретическая и прикладная экология, 3: 188–194. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2025-3-188-194>
- Иванов А.И., Иванова Ж.А., Соколов И.В. 2020. Вторичное освоение неиспользуемых угодий. Российская сельскохозяйственная наука, 2: 48–52. <https://doi.org/10.31857/S2500-2627-2020-2-48-52>

- Иванова Т.А., Авдюкова Т.В., Кондакова М.С. 2024. Состояние и перспективы вовлечения залежных земель канской лесостепи в сельскохозяйственный оборот. Вестник КрасГАУ, 5: 101–107. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2024-5-101-107>
- Иванов М.А., Гафуров А.М. 2025. Анализ изменений землепользования в Среднем Поволжье по данным Landsat для оценки потенциала возврата заброшенных пахотных земель в сельскохозяйственный оборот. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 22(2): 186–201. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-2-186-201>
- Косолапов В.М., Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П. 2015. Агроландшафты Центрального Черноземья. Районирование и управление. М., Наука, 198 с.
- Кузьменко Я.В., Лисецкий Ф.Н., Кириленко Ж.А., Григорьева О.И. 2013. Обеспечение оптимальной водоохранной лесистости при бассейновой организации природопользования. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 15(3–2): 652–657.
- Сизых А.П., Воронин В.И., Осколков В.А., Гриценюк А.П. 2023. Восстановление лесов на постаграрных территориях Западного Забайкалья. География и природные ресурсы, 44(4): 70–76. <https://doi.org/10.15372/GIPR20230407>
- Тарасова Л.В., Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Бу Х., Лежнин С.А., Дергунов Д.М. 2024. Мониторинг лесного покрова водоохраных зон рек Марий Эл. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 21(2): 177–195. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-2-177-195>
- Терехин Э.А. 2020. Влияние параметров лесных насаждений на их спектральный отклик (на примере лесов юга Среднерусской возвышенности). Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 17(7): 142–154. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-142-154>
- Чендев Ю.Г. 2008. Эволюция лесостепных почв Среднерусской возвышенности в голоцене. М., ГЕОС, 212 с.
- Breiman L. 2001. Random Forests. Machine Learning, 45(1): 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Ershov D.V., Gavriluk E.A., Koroleva N.V., Belova E.I., Tikhonova E.V., ... Tikhonov G.N. 2022. Natural Afforestation on Abandoned Agricultural Lands during Post-Soviet Period: A Comparative Landsat Data Analysis of Bordering Regions in Russia and Belarus. Remote Sensing, 14(2): 322. <https://doi.org/10.3390/rs14020322>
- Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Levers C., Prishchepov A., Hostert P. 2015. Mapping Farmland Abandonment and Recultivation Across Europe Using MODIS NDVI Time Series. Remote Sensing of Environment, 163: 312–325. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.03.028>
- Frei T., Edou K., Rodríguez Fernández-Blanco C., Winkel G. 2022. Governing Abandoned Land: Storylines on Natural Forest Regrowth in France and Spain. Environmental Science & Policy, 135(2): 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.04.022>
- Liu X., Wang S., Zhang X., Zhen L., Ma C., ... Li H. 2025. Monitoring Spatiotemporal Dynamics of Farmland Abandonment and Recultivation Using Phenological Metrics. Land, 14(9): 1745. <https://doi.org/10.3390/land14091745>
- Senf C., Laštovička J., Okujeni A., Heurich M., van der Linden S. 2020. A Generalized Regression-Based Unmixing Model for Mapping Forest Cover Fractions Throughout Three Decades of Landsat Data. Remote Sensing of Environment, 240: 111691. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111691>
- Tassi A., Gigante D., Modica G., Di Martino L., Vizzari M. 2021. Pixel- vs. Object-Based Landsat 8 Data Classification in Google Earth Engine Using Random Forest: The Case Study of Maiella National Park. Remote Sensing, 13(12): 2299. <https://doi.org/10.3390/rs13122299>
- Terekhin E.A. 2023. Relationships between Forest-Stand Parameters and Sentinel-2 Spectral Reflectance in the Central Russian Forest–Stepp. Cosmic Research, 61(1): S60–S70. <https://doi.org/10.1134/S0010952523700661>
- Wu J., Jin S., Zhu G., Guo J. 2023. Monitoring of Cropland Abandonment Based on Long Time Series Remote Sensing Data: A Case Study of Fujian Province, China. Agronomy, 13(6): 1585. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061585>

References

- Goleusov P.V., Lisetskii F.N., Malyshev A.V. 2024. Trends in the Reproduction of Postagrogenic Soils in the Forest-Steppe Zone of the European Territory of Russia. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*, 20(1): 165–178 (in Russian).
- Danilov D.A., Yakovlev A.A., Zaitsev D.A., Ivanov A.A. 2024. Changes in Postagricultural Soils During the Restoration of Woody Vegetation in the Conditions of the South-West of the Leningrad Region. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii*, 251: 97–122 (in Russian). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.251.97-122>
- Elsakov V.V., Mylnikova T.A., Borovlev A.Yu., Baskin L.M., Shchanov V.M. 2025. Climatic and Post-Agrarian Vectors of Transformation of Forested Areas in Old-Developed Regions of European Russia. *Theoretical and Applied Ecology*, 3: 188–194 (in Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2025-3-188-194>
- Ivanov A.I., Ivanova Zh.A., Sokolov I.V. 2020. Secondary Development of Unused Land. *Russian Agricultural Sciences*, 46(3): 274–278 (in Russian). <https://doi.org/10.3103/S1068367420030076>
- Ivanova T., Avdyukova T., Kondakova M. 2024. State and Prospects for Fallow Lands of Kansk Forest-Steppe Involvement into Agricultural Turnover. *Bulletin of KSAU*, 5: 101–107 (in Russian). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2024-5-101-107>
- Ivanov M.A., Gafurov A.M. 2025. Analysis of Land Use Changes in the Middle Volga Region Based on Landsat Data to Assess the Potential of Returning Abandoned Cropland into Use. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 22(2): 186–201 (in Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-2-186-201>
- Kosolapov V.M., Trofimov I.A., Trofimova L.S., Yakovleva E.P. 2015. Agrolandscapes of central Chernozem region. Zoning and management. Moscow, Publ. Nauka, 198 p. (in Russian).
- Kuzmenko Ya., Lisetskiy F., Kirilenko Ja., Grigoryeva O. 2013. Providing the Optimum Water Protection Forests Amount at Basin Organization of Nature Management. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 15(3–2): 652–657 (in Russian).
- Sizykh A.P., Voronin V.I., Oskolkov V.A., Gritsenyuk A.P. 2023. Reforestation in Postagricultural Areas of Western Transbaikalia. *Geography and Natural Resources*, 44(4): 345–350 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/s1875372823040121>
- Tarasova L.V., Kurbanov E.A., Vorobiev O.N., Bui H., Lezhnin S.A., Dergunov D.M. 2024. Monitoring Forest Cover in Riparian Zones Along the Rivers of Mari El Republic Using Satellite Data. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth From Space*, 21(2): 177–195 (in Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-2-177-195>
- Terekhin E.A. 2020. The Effect Of Stand Parameters on the Spectral Response of Forests (Case Study of the South of the Central Russian Upland). *Current Problems in Remote Sensing of the Earth From Space*, 17(7): 142–154 (in Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-142-154>
- Chendev Yu.G. 2008. Evolution of Forest-Steppe Soils of the Central Russian Upland in the Holocene. Moscow, Publ. GEOS, 212 p. (in Russian).
- Breiman L. 2001. Random Forests. *Machine Learning*, 45(1): 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Ershov D.V., Gavriluk E.A., Koroleva N.V., Belova E.I., Tikhonova E.V., ... Tikhonov G.N. 2022. Natural Afforestation on Abandoned Agricultural Lands during Post-Soviet Period: A Comparative Landsat Data Analysis of Bordering Regions in Russia and Belarus. *Remote Sensing*, 14(2): 322. <https://doi.org/10.3390/rs14020322>
- Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Levers C., Prishchepov A., Hostert P. 2015. Mapping Farmland Abandonment and Recultivation Across Europe Using MODIS NDVI Time Series. *Remote Sensing of Environmen*, 163: 312–325. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.03.028>
- Frei T., Edou K., Rodríguez Fernández-Blanco C., Winkel G. 2022. Governing Abandoned Land: Storylines on Natural Forest Regrowth in France and Spain. *Environmental Science & Policy*, 135(2): 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.04.022>
- Liu X., Wang S., Zhang X., Zhen L., Ma C., ... Li H. 2025. Monitoring Spatiotemporal Dynamics of Farmland Abandonment and Recultivation Using Phenological Metrics. *Land*, 14(9): 1745. <https://doi.org/10.3390/land14091745>

- Senf C., Laštovička J., Okujeni A., Heurich M., van der Linden S. 2020. A Generalized Regression-Based Unmixing Model for Mapping Forest Cover Fractions Throughout Three Decades of Landsat Data. *Remote Sensing of Environment*, 240: 111691. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111691>
- Tassi A., Gigante D., Modica G., Di Martino L., Vizzari M. 2021. Pixel- vs. Object-Based Landsat 8 Data Classification in Google Earth Engine Using Random Forest: The Case Study of Maiella National Park. *Remote Sensing*, 13(12): 2299. <https://doi.org/10.3390/rs13122299>
- Terekhin E.A. 2023. Relationships between Forest-Stand Parameters and Sentinel-2 Spectral Reflectance in the Central Russian Forest–Stepp. *Cosmic Research*, 61(1): S60–S70. <https://doi.org/10.1134/S0010952523700661>
- Wu J., Jin S., Zhu G., Guo J. 2023. Monitoring of Cropland Abandonment Based on Long Time Series Remote Sensing Data: A Case Study of Fujian Province, China. *Agronomy*, 13(6): 1585. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061585>

*Поступила в редакцию 31.07.2026;
поступила после рецензирования 26.08.2026;
принята к публикации 10.09.2026*

*Received July 31, 2026;
Revised August 26, 2026;
Accepted September 10, 2026*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Терехин Эдгар Аркадьевич, доктор географических наук, профессор кафедры природопользования и земельного кадастра, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Edgar A. Terekhin, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Department of Natural Resources and Land Cadastre, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Социально-экономические компоненты геосистем Socio-Economic Components of Geosystems

УДК 908+910.1/3:913

DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-3-659-680

EDN TSXUSP

Аспекты исследования территории Москвы в контексте образовательной геоурбанистики

Шульгина О.В., Ямамура Д.Н.

Московский городской педагогический университет,
Россия, 129226, Москва, 2-й Сельскохозяйственный проезд, 4
shulginaov@mgpu.ru, samusenkodn@mgpu.ru

Аннотация. В условиях перехода к экономике знаний и усиления конкуренции глобальных городов образование становится не просто социальной услугой, а драйвером пространственного развития и ключевым элементом брендинга мегаполиса. Тем не менее, географические аспекты территориальной организации образования и его обратного влияния на городскую среду Москвы остаются фрагментарно изученными, что формирует заметный пробел в теории и практике общественной географии. Целью настоящего исследования является выявление и обоснование концептуальных рамок образовательной геоурбанистики применительно к территории Москвы. На основе геоинформационного и статистического анализа данных портала Правительства Москвы, а также синтеза *SWOT*- и *PESTEL*-анализа, выявлена выраженная пространственная дифференциация образовательных учреждений. Установлено, что Зеленоградский, Новомосковский и Троицкий административные округа формируют «образовательную периферию» столицы. В работе продемонстрировано, что концентрация интеллектуальных ресурсов выступает системообразующим фактором для позиционирования Москвы как «образовательного хаба». Полученные результаты вносят вклад в развитие теоретико-методологического аппарата социально-экономической географии, расширяя предметное поле геоурбанистики за счёт образовательного компонента.

Ключевые слова: образовательная геоурбанистика, территориальная организация образования Москвы, влияние образования на городскую среду, территориальный брендинг, образовательный комплекс

Благодарности: Статья выполнена в рамках государственного задания Департамента образования и науки города Москвы на 2025 г. по теме: «Образовательная геоурбанистика как направление развития социально-экономической и рекреационной географии в условиях трансформации национальной системы образования».

Для цитирования: Шульгина О.В., Ямамура Д.Н. 2026. Аспекты исследования территории Москвы в контексте образовательной геоурбанистики. Региональные геосистемы 50(3): 659–680. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-659-680 EDN: TSXUSP

Aspects of Research into the Territory of Moscow in the Context of Educational Geourbanistics

Olga V. Shulgina, Dmitry N. Yamamura

Moscow City University,
4 2nd Selskokhozyaistvenny proezd, Moscow 129226, Russia,
shulginaov@mgpu.ru, samusenkodn@mgpu.ru

Abstract. In the context of the transition to a knowledge economy and the intensification of competition among global cities, education is becoming not merely a social service but a driver of spatial development and a key element of megacity branding. Nevertheless, the geographical aspects of the territorial organization of education and its feedback effects on Moscow's urban environment remain only fragmentarily studied, creating a notable gap in the theory and practice of human geography. The aim of this study is to identify and substantiate the conceptual framework of educational geourbanistics as applied to the territory of Moscow. Based on geoinformation and statistical analysis of data from the Moscow Government portal, as well as a synthesis of SWOT- and PESTEL-analyses, a pronounced spatial differentiation of educational institutions has been identified. It has been established that the Zelenograd, Novomoskovsky, and Troitsky administrative districts form the “educational periphery” of the capital. The study demonstrates that the concentration of intellectual resources acts as a system-forming factor in positioning Moscow as an “educational hub.” The results contribute to the development of the theoretical and methodological apparatus of socio-economic geography by expanding the scope of geourban studies through the educational component.

Keywords: educational geourbanistics, territorial organization of education in Moscow, influence of education on the urban environment, territorial branding, educational complex

Acknowledgements: The article was prepared within the framework of the state assignment of the Department of Education and Science of the City of Moscow for 2025 on the topic: “Educational geourban studies as a direction for the development of socio-economic and recreational geography in the context of the transformation of the national education system”.

For citation: Shulgina O.V., Yamamura D.N. 2026. Aspects of Research into the Territory of Moscow in the Context of Educational Geourbanistics. Regional Geosystems 50(3): 659–680 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-659-680 EDN: TSXUSP

Введение

В современных условиях глобальной урбанизации и конкуренции мегаполисов образовательные ресурсы превращаются в один из ключевых драйверов социально-экономического развития территорий, формирования человеческого капитала и территориального брендинга. Москва, обладая уникальным по масштабу и сложности пространством, концентрирующим значительную часть научно-образовательного потенциала страны, выступает полигоном для изучения этих процессов.

Актуальность темы исследования усиливается следующими факторами:

– Во-первых, в последние годы наметился довольно устойчивый интерес к образовательной геурбанистике – направлению геурбанистики, охватывающему проблемы территориальной организации системы образования в городах, влияния образования на городскую среду, использование элементов городской среды для развития и совершенствования образования. Следует добавить, что образовательная геурбанистика взаимосвязана со всем комплексом географических наук и отметить особую важность её взаимосвязей с рекреационной географией, а точнее – с географией туризма. Образовательный туризм и образовательная геурбанистика в своем развитии опираются на очень близкую ресурсную базу, зачастую на аналогичное методическое

обеспечение. Это позволяет заключить, что образовательная геоурбанистика может рассматриваться как своеобразное направление рекреационной географии в городской среде.

– Во-вторых, в Москве, в виду её масштабов, отмечается выраженная пространственная дифференциация образовательной инфраструктуры и её влияния на городскую среду, что требует научного осмысления с точки зрения подходов социально-экономической географии.

– В-третьих, существует практическая потребность в совершенствовании содержания географического образования и краеведения через интеграцию ресурсов городской среды в учебный процесс, что также входит в проблемное поле заявленного направления.

Таким образом, целью настоящей работы является выявление и концептуальное обоснование аспектов исследования территории Москвы с позиций образовательной геоурбанистики для оценки роли образования в пространственном развитии и имиджевом позиционировании столицы.

Объектом исследования выступает территория города Москвы и функционирующая на ней система образовательных организаций.

Предметом исследования являются пространственные закономерности размещения образовательных учреждений, характер их влияния на городскую среду и бренд территории, а также познавательный потенциал Москвы в контексте теоретических положений образовательной геоурбанистики.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Определить место образовательной геоурбанистики в системе общественно-географических наук и обосновать её структурные направления.
2. Проанализировать территориальную организацию сети образовательных учреждений Москвы (подведомственных Департаменту образования и науки) с выявлением диспропорций в разрезе административных округов и типов учреждений.
3. Оценить влияние образования на городскую среду и бренд Москвы с применением методов стратегического анализа для обоснования позиционирования столицы как «образовательного хаба».
4. Систематизировать и классифицировать познавательные ресурсы, а также обосновать их значение для образовательной деятельности.

Предложить методы использования городских ресурсов в образовательной деятельности для совершенствования преподавания географических и смежных дисциплин.

Объекты и методы исследования

Геоурбанистика занимает особое место в системе общественно-географических дисциплин и традиционно считается разделом географии населения.

Однако, в связи с тем, что предмет исследования геоурбанистики значительно шире, существует и иная точка зрения о её месте в системе общественно-географических наук, согласно которой геоурбанистике уделяется более значительная роль, и она выделяется в самостоятельную дисциплину. Именно этой точки зрения мы будем придерживаться в данной работе.

Согласно представлениям отечественного географа С.А. Тархова, геоурбанистика по значимости стоит на втором месте после страноведения и регионоведения, перед географией населения, социальной географией, географией культуры, исторической и политической географией, географией хозяйства, географией природопользования, географией туризма, которая изучает территориальные рекреационные системы [Тархов, 2013].

Такое положение геурбанистики в системе общественно-географических дисциплин более соответствует её содержанию, которое как страноведение и регионоведение охватывает весь комплекс географических сведений о городах, включая внутреннюю микрогеографию городских пространств, а также анализ особенностей размещения отдельных городов. В этой связи структура страноведческой и регионоведческой характеристик вполне применима к городам, изучаемым геурбанистикой.

Это ещё более оправдано, когда речь идет о крупнейших городах, в частности о Москве, которая по размеру своей территории (2561 км²), и численности населения (13,3 млн чел.) превосходит около двух десятков зарубежных стран (Сингапур, Андорру, Гренаду, Лихтенштейн, Сан-Марино, Монако и др.), а по численности населения – все, отдельно взятые субъекты Российской Федерации [Географическое москвоведение, 2025]. К тому же пространственная структура Москвы за почти девять веков её существования столь усложнилась и наполнилась таким количеством элементов не только внутригородского, но и общероссийского, и даже межгосударственного значения, что делает уместным применение к исследованию города методов страноведческого и регионоведческого анализа.

И подобно различным типам страноведения, которое в зависимости от объекта, предмета и цели изучения может подразделяться на научное, учебное, географическое, геоинформационное, туристское, лингвострановедение и т.п., в геурбанистике также можно выделять различные типы или направления.

Приведем в качестве примеров следующие работы: Г.М. Лаппо [1997] по литературной геурбанистике; Н.С. Олесика [2006] по военной геурбанистике. Есть также близкие по сюжету работы, посвящённые урбанистике в целом: В.П. Соломина с соавторами [2014] и Т.В. Шоломовой [2019] по философской урбанистике; И.М. Лисовец [2014] по культурологической урбанистике, О.С. Глозмана [2017] по подземной урбанистике; Е.Ю. Леонтьевой [2023] по сенсорной урбанистике; О.А. Гамаюнова [2024] по экологической урбанистике. В этом ряду отметим некоторое преобладание работ по образовательной урбанистике, к которым относятся следующие работы: А.Н. Шевелева [2022] по образовательной урбанистике и историко-образовательной урбанистике; М.В. Буланова, А.Н. Россинской, Е.А. Асоновой [2021]; В.А. Гончаровой [2022]; Е.Ю. Игнатьевой с соавторами [2022]; М.А. Федоровой [2023]; Л.П. Илларионовой [2024]; С.Н. Горычевой с соавторами [2025]; и др.

Исследования, посвященные взаимосвязи образования и городского развития, активно развиваются на международном и российском уровнях. В мировой научной традиции особое внимание уделяется роли университетов и образовательных кластеров в формировании конкурентоспособности городов, развитии инновационных экосистем и укреплении культурной идентичности.

Классические работы Р. Флориды [Florida, 2002] заложили основу концепции «креативного класса», которая подчёркивает значимость образования и инноваций как ключевых драйверов городского развития. С. Сассен [Sassen, 2001] в исследовании глобальных городов рассматривает образование в контексте глобализации и мобильности человеческого капитала, что позволяет интерпретировать Москву через призму мировых образовательных центров. К. Лэндри [Landry, 2008] связывает образовательные пространства с культурным потенциалом города, акцентируя внимание на креативности и культурных индустриях как стратегическом ресурсе. Э. Глейзер [Glaeser, 2011] демонстрирует прямую зависимость устойчивости и экономического роста городов от концентрации университетов и знаний.

В российской литературе внимание к вопросам образования в городской среде также возрастает. В.Л. Глазычев [2008] одним из первых рассматривал урбанистику в контексте образовательных практик, связывая планирование городов с формированием

человеческого капитала. Н.В. Зубаревич [2003] подчёркивает влияние неравенства доступа к образовательным ресурсам на социальную мобильность и развитие регионов, что актуально и для Москвы, где сосредоточены ведущие университеты страны. Работы Л.М. Гохберга, Т.Е. Кузнецовой и В.А. Рудь [2011] описывают механизмы формирования инновационных кластеров, в которых образование выступает базовым элементом. Исследования А.Н. Пилясова [2009] в области «географии инноваций» акцентируют пространственные аспекты образовательных экосистем и их роль в трансформации городской среды.

Эмпирическую базу для анализа образования в Москве формируют ежегодные статистические сборники НИУ ВШЭ [Оценка вклада..., 2017], содержащие данные об образовательной инфраструктуре. Первичные данные о территориальном распределении образовательных учреждений (ОУ) Москвы получены с «Портала открытых данных Правительства Москвы» (набор «Образовательные учреждения города Москвы»), которые в дальнейшем были подвергнуты геоинформационному анализу с использованием свободно распространяемого программного обеспечения QGIS (версия 3.40.12) и GeoDa (версия 1.22). Данные были выгружены в формате GeoJSON, который в дальнейшем был преобразован в SHP-файл. Процедура анализа проводилась в несколько этапов:

- 1) пространственная привязка ОУ к административным округам Москвы;
- 2) классификация ОУ по типам;
- 3) разбивка ОУ разных типов по административным округам;
- 4) расчёт абсолютного количества ОУ в административном округе;
- 5) расчёт удельного веса ОУ в административном округе.

На выходе получены картосхема и таблица, отражающие распределение образовательных организаций Москвы, находящихся в подчинении Департамента образования и науки города Москвы, по административным округам в соответствии с уровнем предоставляемых образовательных услуг.

Для комплексной оценки влияния образования на городскую среду Москвы и его роли в территориальном брендинге в работе использован синтез двух взаимодополняющих моделей стратегического анализа – SWOT и PESTEL. Выбор данных методов обусловлен необходимостью выявления не только внутренних характеристик образовательной системы города, но и внешних факторов, определяющих вектор её пространственного развития. Особенностью применения SWOT-анализа в контексте образовательной геоурбанистики стало его пространственное преломление. В отличие от классического маркетингового применения, где оценивается конкурентоспособность отдельной организации, в данном исследовании матрица SWOT была адаптирована для анализа территориальной системы образования мегаполиса в целом. Особенностью применения PESTEL-анализа является его интеграция с категориальным аппаратом геоурбанистики. Каждый из шести компонентов макросреды был проанализирован с точки зрения его проекции на городское пространство и образовательную инфраструктуру. Методологической новацией работы стало построение интегрированной SWOT+PESTEL-модели, где каждая ячейка SWOT сопоставлена с соответствующими аспектами PESTEL. Это позволило не просто констатировать наличие тех или иных факторов, но и выявить причинно-следственные связи между внешней средой и внутренними характеристиками образовательной системы города, что дало обоснование для формулировки конкретных импликаций для бренд-стратегии. Аналитические материалы «Стрелка КБ» [Стрелка КБ..., 2019] позволили дополнить оценку взаимосвязи между образовательными проектами и пространственным развитием территорий, особенно в контексте новой Москвы.

Результаты и их обсуждение

Образовательная геоурбанистика решает несколько задач, каждая из которых занимает свое особое место в структуре данного направления (рис. 1).

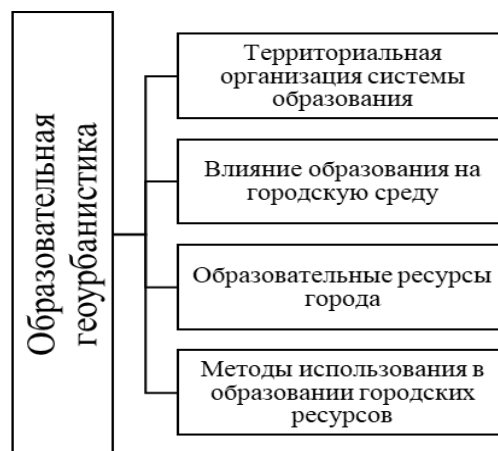


Рис. 1. Структура (направления исследований) образовательной геоурбанистики.

Составлено авторами

Fig. 1. Structure (research directions) of educational geourbanistics. Compiled by the authors

Территориальная организация системы образования Москвы. Территориальная организация – важнейшее понятие в социально-экономической географии [Бакланов, 2019]. Под территориальной организацией системы образования понимается определённая пространственная упорядоченность функционирующих территориальных структур (сети учебных заведений различного типа) за счёт объективных процессов организации (самоорганизации и административного управления). Её географическое изучение предусматривает пространственный анализ сети образовательных учреждений разных уровней и профилей: детских садов, школ, колледжей, вузов, образовательных центров, учреждений системы дополнительного образования и т.д.

На территориальную организацию образования влияют разные факторы: исторические, природно-климатические, социально-культурные и институциональные. Значительную роль играют показатели динамики численности и плотности населения, во многом определяющие количество учащихся в образовательных учреждениях. В отличие от общероссийских показателей, динамика численности и плотности населения Москвы в современный период времени практически всегда имела восходящую траекторию. Численность обучающихся если и сокращалась в связи с сокращением рождаемости, то на краткий период, но в целом имела тенденцию к росту, что определяло положительную динамику в численности обучающихся.

На территории города имеется определённая пространственная дифференциация в размещении образовательных организаций. Анализ набора данных «Образовательные учреждения города Москвы», полученного с «Портала открытых данных правительства Москвы» показал, что в столице зарегистрировано 574 ОУ разного уровня, находящихся в подчинении Департамента образования и науки города Москвы [Портал открытых данных..., 2025]. При этом, не учитываются ОУ, находящиеся в федеральном подчинении. Также несколько искажает пространственный рисунок размещения ОУ в столице наметившаяся в 2010-х годах тенденция к укрупнению образовательных организаций и превращение их в центры образования. Тем не менее, даже такие данные позволяют оценить концентрацию ОУ на уровне административных округов. Дополнительная сложность заключается ещё и в том, что официальные данные учитывают территориальную принадлежность учебных заведений исходя из их юридического адреса,

хотя многие из таких организаций располагают сетью структурных подразделений, представленных в разных частях столицы. В связи с этим, была проведена дополнительная обработка исходных данных с целью выявить наиболее точное распределение ОУ, с учётом данной особенности. Таким образом, было установлено, что количество организаций, предоставляющих образовательные услуги и находящихся в подчинении Департамента образования и науки города Москвы, насчитывает 673 объекта.

Образовательные организации представлены во всех административных округах Москвы (рис 2). Первое место по количеству учреждений занимает Южный административный округ (87 ОУ разного типа). В тройку лидеров также входят Северный и Юго-Западный административные округа (79 и 78 ОУ разного типа, соответственно). Слабо связанные с основной территорией столицы Зеленоградский, Новомосковский и Троицкий административные округа представляют своего рода «образовательную периферию» города, количество ОУ в них минимально (18, 15 и 8 ОУ разного типа соответственно). Эти же три округа обладают наименьшей численностью населения и, как следствие, наименьшим количеством потенциальных потребителей образовательных услуг.

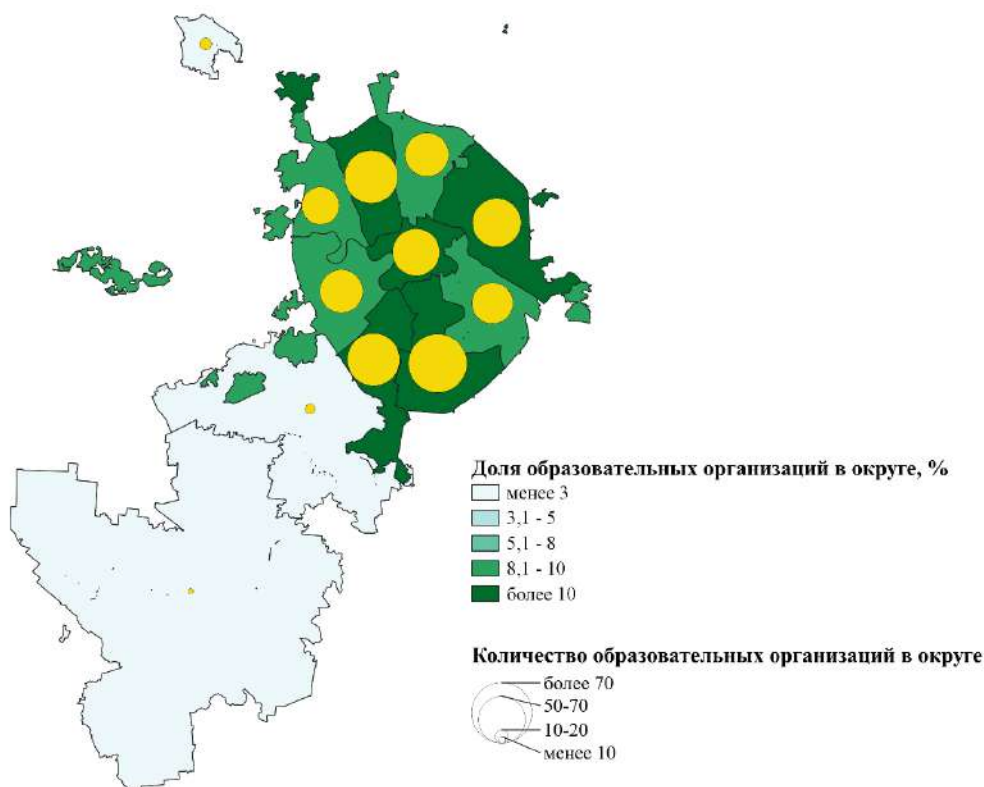


Рис. 2. Размещение образовательных организаций, находящихся в подчинении Департамента образования и науки города Москвы, по административным округам, 2025 г. [Портал открытых данных..., 2025]

Fig. 2. Placement of educational organizations, subordinate to the Department of Education and Science of the City of Moscow, by administrative districts, 2025 [Open Data Portal..., 2025]

Спектр предоставляемых образовательных услуг в Москве разнообразен и охватывает все ступени и уровни (табл 1). Больше всего в городе из рассматриваемой выборки насчитывается общеобразовательных организаций (517 объектов). Количество же дошкольных организаций минимально (3 объекта). Однако данный феномен, как уже было отмечено ранее, объясняется тем, что многие общеобразовательные организации, являясь образовательными центрами, реализуют в том числе и данный уровень образования.

Тем не менее, наличие и количество ОУ разного типа по административным округам варьирует. Как и в предыдущем случае, наименьшее разнообразие типов ОУ имеет место в трёх округах: Новомосковском (2 типа ОУ), Троицком (3 типа ОУ), и Зеленоградском (4 типа ОУ). Полный спектр образовательных организаций разного типа присутствует лишь в двух округах: Северном и Западном.

В значительной степени данное обстоятельство объясняется уже не только демографическими показателями, но географическими и историческими причинами. Проникновение ОУ разного типа носит диффузный характер. Как уже было сказано ранее, данные округа слабо связаны с основной территорией столицы (в особенности это относится к Зеленоградскому административному округу, занимающему эксклавное положение), в виду достаточно позднего их включения в состав города Москвы. Как следствие, сеть ОУ в них характеризуется более слабой развитостью.

Таблица 1
Table 1

Распределение образовательных организаций Москвы, находящихся в подчинении Департамента образования и науки города Москвы, по типам и административным округам, 2025 г.
Distribution of educational organizations of Moscow, subordinate to the Department of Education and Science of the City of Moscow, by types and administrative districts, 2025

Тип образовательной организации	Восточный	Западный	Зеленоградский	Новомосковский	Северный	Северо-Восточный	Северо-Западный	Троицкий	Центральный	Юго-Восточный	Юго-Западный	Южный	Итого
дошкольная образовательная организация	–	1	–	–	1	–	–	1	–	–	–	–	3
образовательная организация высшего образования	1	1	1	–	1	1	1	–	1	1	1	1	10
общеобразовательная организация	52	54	14	14	60	49	43	6	47	49	69	60	517
организация дополнительного образования	3	3	1	1	4	3	4	–	6	1	3	4	33
организация дополнительного профессионального образования	2	1	–	–	3	1	–	–	4	2	1	2	16
профессиональная образовательная организация	14	4	2	–	10	11	8	1	12	8	4	20	94
Итого	72	64	18	15	79	65	56	8	70	61	78	87	673

Источник [Портал открытых данных..., 2025]

Влияние образования на городскую среду. Образование оказывает значительное и многогранное влияние на пространственное развитие городской среды. В данном процессе особенно значительна роль высших учебных заведений. Развитие системы высшего образования способствует повышению квалификации рабочей силы, что положительно сказывается на привлечении инвестиций и способствует региональному развитию. Мультипликативный эффект от данного процесса приводит к тому, что городские районы с высоким уровнем образования часто имеют низкий уровень безработицы, более высокие доходы и, как следствие, снижается уровень различных правонарушений, делая городскую среду безопаснее. В свою очередь, это делает город привлекательным для жителей и туристов. Образовательные учреждения служат местами для взаимодействия различных социальных групп, что положительно сказывается на социальной интеграции. Кроме того, образование влияет на градостроительные решения, так как образовательные учреждения требуют определённой инфраструктуры (например, транспорт, жилье, общественные пространства), что может изменить облик города.

Использование комплексных аналитических моделей (*SWOT* и *PESTEL*) позволяет выявить ключевые факторы, определяющие образовательный потенциал Москвы как стратегический ресурс бренда города [Kotler, 2022].

Рассмотрим влияние образования на городскую среду Москвы через *SWOT*-анализ (сильные и слабые стороны, возможности и угрозы).

К сильным сторонам (*S*) столицы безусловно можно отнести такие аспекты, как высокая концентрация ведущих университетов и исследовательских центров (МГУ, ВШЭ, МГИМО, МФТИ и др.), а также обладание развитой образовательной инфраструктурой: школы, лицеи, технопарки, детские технополисы. Приток молодежи, способствует созданию «креативного класса» и формированию динамичной городской атмосферы. Благодаря этому Москва является главным образовательным и научным брендом России, узнаваемым в мире.

Слабые стороны (*W*) формируются во многом за счёт того, что концентрация «интеллектуального капитала» в столице ведёт к дисбалансу с регионами (утечка талантов из регионов в Москву). Кроме того, внутри самого города имеет место быть неравномерное качество школ и вузов: образуется разрыв между элитными и массовыми заведениями. Стоит отметить также слабую международную конкурентоспособность большинства вузов по сравнению с мировыми центрами.

В свою очередь возможности (*O*) обусловлены такими факторами, как развитие «университетских экосистем» и инновационных кластеров (например, Сколково, кампусы ВШЭ), привлечение иностранных студентов и создание имиджа Москвы как глобального образовательного центра, использование образовательных проектов для редевелопмента территорий и улучшения городской среды. Также широкое распространение в постковидный период получило внедрение новых форматов обучения: онлайн-образование, *EdTech*, появление гибридных кампусов. Немаловажным фактором является расширение партнерств с зарубежными университетами и научными центрами.

Угрозы (*T*) проявляются главным образом в виде относительной международной изоляции России. Длительная международная изоляция может снизить привлекательность Москвы как образовательного хаба. На фоне этого возрастает риск «утечки мозгов» за границу после обучения. Усиливается конкуренция глобальных образовательных центров, таких как Лондон, Берлин, Шанхай, Сингапур и т.д. Важной проблемой является также интенсификация социальной стратификации: престижное образование становится доступно не всем.

PESTEL-анализ позволяет рассмотреть влияние образования на городскую среду Москвы через призму таких аспектов как политика, экономика, общество, технологии, экология и правовая сфера.

С точки зрения политики (*P*) Москва является центром принятия решений, что обеспечивает приоритетное финансирование образования и науки. В городе активно

развиваются государственные программы, направленные на повышение качества и доступности образования («Московская электронная школа», национальные проекты в сфере науки и образования). Реализуется поддержка развития технопарков, инновационных кластеров и кампусов, соответствующих мировому уровню.

Для экономики (E) важность представляет тот факт, что вузы и научные центры Москвы создают высококвалифицированные кадры для экономики знаний. Приток студентов и ученых стимулирует спрос на жильё, транспорт, а также различные сервисы, что в свою очередь способствует развитию местной экономики. Кроме того, Москва выступает в качестве лидера в развитии *EdTech* и стартапов, связанных с образованием. Формируется экономическая зависимость от качества образования: если выпускники не будут конкурентоспособны, город потеряет инвестиционную привлекательность.

Общественная (S) составляющая проявляется в том, что образование выступает в качестве социального лифта, повышающего мобильность и интеграцию новых жителей в городскую среду. Приток молодежи формирует культурное и социальное разнообразие, а вокруг престижных школ и вузов формируются «точки престижа», повышающие стоимость жилья и статус районов. При этом существует опасность усиления социального расслоения, проявляющаяся в нарастающей разнице между элитным и массовым образованием.

С точки зрения технологий (T) Москва – лидер в цифровизации школ и вузов (электронные дневники, онлайн-курсы, VR/AR в образовании). Многие столичные университеты генерируют технологические инновации, поддерживают стартапы, создают образовательные и исследовательские лаборатории. Однако на фоне этого возникают новые вызовы. В частности увеличивается цифровой разрыв между престижными вузами и средними образовательными учреждениями.

Влияние образования на городскую среду проявляется и в экологическом аспекте (E). Так, кампусы и образовательные кластеры становятся драйверами «зеленой урбанистики» (пример: эко-инициативы МГУ, кампус ВШЭ с энергоэффективными зданиями). Школьные и университетские проекты по экологии вовлекают обучающихся в устойчивое развитие города. Одновременно с этим рост числа кампусов и студентов увеличивает нагрузку на транспорт и коммунальную инфраструктуру, что, безусловно, является проблемой.

В рамках правовой сферы (L) важно отметить, что законодательная база необходима для поддержки креативных индустрий и образовательных инноваций. Федеральные законы и московские программы определяют приоритеты развития образования (например, лицензирование вузов, стандарты качества), а развитие партнерств вузов с бизнесом требует гибкой правовой среды. Вместе с тем, существует ряд международных правовых ограничений, таких как признание дипломов, ограничения в международных рейтингах.

Интеграция *SWOT*- и *PESTEL*-анализа позволяет комплексно оценить внутренние и внешние факторы влияния образования на развитие Москвы и их влияние на позиционирование столицы (табл. 2).

С учётом текущей социально-экономической и геополитической обстановки в России и мире, могут быть предложены следующие варианты решения выявленных проблем. Во-первых, необходима переориентация на рынки Глобального Юга и ЕАЭС. В частности, она может быть реализована за счёт продвижения англоязычных программ московских вузов для студентов из Китая, Индии, Ирана, стран СНГ и Африки – в страны, где у России имеются сильные позиции. Во-вторых, в условиях снижения мобильности академических обменов с зарубежными странами, возможно развитие внутрироссийской академической мобильности на базе ведущих университетов Москвы. Это позволит компенсировать снижение иностранного студенческого трафика и укрепить статус столицы как главного научного центра страны. В-третьих, для нивелирования разрыва между элитным и массовым образованием, необходимо ввести обязательные программы выравнивания качества образования в школах города за счёт возможностей профессиональной переподготовки и повышения квалификации педагогов.

Таблица 2
Table 2

Интегрированная *SWOT+PESTEL*-модель: образование и бренд Москвы.
Составлено Ямамурой Д.Н.
Integrated *SWOT+PESTEL* model: education and Moscow brand. Compiled by Yamamura D.N.

<i>SWOT</i>	<i>PESTEL</i> -связки	Импlications для бренд-стратегии Москвы
Сильные стороны (S)	Поддержка образования и науки (P); цифровизация и <i>EdTech</i> (T); университеты как культурные центры (S, C)	Позиционирование Москвы как «города знаний и инноваций».
Слабые стороны (W)	Социальное неравенство (S); перегруженность инфраструктуры (E); ограниченная международная конкурентоспособность (E, P)	Концепт «города равных возможностей», акцент на доступность и интеграцию кампусов в городскую ткань.
Возможности (O)	Международные рейтинги и партнерства (P, L); экономика знаний (E); гибридные кампусы (T); «зелёное образование» (E)	Укрепление образа Москвы как «международного образовательного хаба Восточной Европы».
Угрозы (T)	Международная изоляция (P, L); «утечка мозгов» (S, E); глобальная конкуренция (E); давление на инфраструктуру (E)	Фокус на локальных инновациях и формировании уникальной образовательной идентичности.

Кроме того, необходимо активное внедрение в практику образовательной деятельности использования потенциала музеев-заповедников и парков Москвы как площадок для регулярных внеаудиторных занятий. Это позволит снизить нагрузку на школьные кабинеты и сделать качественное образование доступным для школ с разным уровнем финансирования. В качестве возможного и вполне реализуемого шага в решении существующих проблем может являться включение реальных кейсов от управ районов в учебные программы географических и прочих специальностей, в рамках которых студенты разрабатывают проекты благоустройства или логистики, а город получает свежие идеи.

Таким образом, интегрированная *SWOT+PESTEL*-модель показывает, что образование в Москве – это стратегический актив, который выступает системообразующим фактором бренд-стратегии Москвы. Оно определяет конкурентные преимущества и уязвимости города, формирует глобальное позиционирование и задаёт векторы стратегического развития.

Образовательные ресурсы города. Город представляет собой уникальное пространство, наполненное объектами и явлениями, которые могут рассматриваться в качестве образовательных ресурсов (табл. 3). Важно отметить, что городской объект или явление становится образовательным, если горожанин наделяет его образовательной ценностью, используя для своих формальных, неформальных и информальных образовательных практик. Образовательная ресурсность определяется не только особенностями самого объекта, но и особенностями человека, его использующего [Буланов, 2021].

Прежде всего, Москва знаменита своим историко-культурным наследием, что вполне объяснимо. Здесь издавна создавались, веками накапливались объекты, ставшие в настоящее время широко известными достопримечательностями.

Таблица 3
Table 3Классификация образовательных ресурсов города. Составлено Ямамурой Д.Н.
Classification of educational resources of the city. Compiled by Yamamura D.N.

Категория	Вид
Объекты	
Образование и наука	ВУЗы, ССУЗы, школы, учреждения дополнительного образования, НИИ, НИЦ, библиотеки
Культура	Театры, музеи, галереи, культурные центры
Промышленность и сфера услуг	Заводы, фабрики, органы государственного и муниципального управления
Городские пространства	Парки, скверы, улицы, площади, транспортная инфраструктура
Явления и процессы	
События	Праздники, фестивали, ярмарки
Инициативы и проекты	Социальные, экономические, экологические, культурные

Транспортная система Москвы: метрополитен, наземный транспорт, подвесные дороги – особый вид объектов, имеющих важное инфраструктурное и историко-культурное значение. Станции Московского метро, особенно в пределах кольцевой линии, являются, по истине, подземными музеями и воплощают шедевры живописного оформления, напоминают о судьбоносных вехах истории страны, свидетельствуют о достижениях инженерной мысли. Новые станции московского метрополитена выделяются креативным подходом к дизайну, являясь зачастую тематическими арт-объектами, наполнившими городское пространство современной эстетикой, воплощенной в новых материалах.

Особое место в историко-культурном пространстве Москвы занимают объекты, включенные в список Всемирного наследия ЮНЕСКО, как выдающиеся достояния всего человечества. Таких объектов в Москве три [Шульгина, Шульгина, 2019]: Московский Кремль и Красная площадь; Церковь Вознесения в Коломенском; Ансамбль Новодевичьего монастыря.

Москва всегда занимала лидирующие позиции в производственной, научной, образовательной, инновационной сферах. Объекты, связанные с этими видами деятельности являются ценными ресурсами познавательного туризма. В Москве сложился развитый музейно-выставочный комплекс, демонстрирующий исторические артефакты и современные достижения страны во многих областях.

Москва со времен своего основания активно «притягивала» к себе множество талантливых людей, прославивших не только город, но всю нашу страну. В Москве родилось значительное количество выдающихся деятелей разных эпох. Память об этих людях бережно хранится в музеях, музеях-усадебках, музеях-заповедниках, которые являются объектом посещения большого количества туристов. Памятные места, связанные с жизнью и деятельностью выдающихся горожан рассредоточены по всей территории Москвы, что можно видеть на примере карты, отражающей литературные места города [Литературная география..., 2022] (рис. 3).



Рис. 3. Важнейшие литературные места Москвы [Литературная география..., 2022]
Fig. 3. The most important literary places in Moscow [Literary Geography..., 2022]

На территории Москвы расположены 5 государственных музеев-заповедников разного типа, что видно даже из их названий:

- Государственный музей-заповедник «Московский Кремль»,
- Государственный историко-архитектурный, художественный и ландшафтный музей-заповедник «Царицыно»,
- Московский государственный объединённый музей-заповедник: музей-заповедник «Коломенское», усадьба «Измайлово»,
- Музей-заповедник «Кузьминки-Люблино»,
- Музей-заповедник «Останкино и Кузово».

Каждый из этих музеев-заповедников имеет свой сайт с описанием всех достопримечательностей и программами экскурсий.

Уникальность познавательных ресурсов Москвы состоит в том, что в условиях мегаполиса объекты природного наследия не только сочетаются с объектами культурного наследия, но и являются его составной частью. Особенно это ярко проявляется в природно-исторических парках, где архитектурные шедевры органично вписаны в окружающие ландшафты, зачастую являющиеся творениями выдающихся ландшафтных дизайнеров. Сокольники, Измайлово, Кузьминки-Люблино, Царицыно, Покровское-Стрешнево – наглядные примеры объектов смешанного – природно-культурного наследия. Такие объекты размещены за пределами центральной части города

В качестве объекта познавательного туризма Москвы немаловажное значение имеет топонимика города, сведения о которой часто упоминается в городских экскурсиях, как свидетельство о древней истории города и всей страны. Названия районов, улиц, площадей, переулков, проспектов, бульваров, проездов Москвы имеют разное происхождение. В московской топонимике отражаются все эпохальные события России и многие значимые события мира; история Москвы и её природные особенности; имена выдающихся деятелей культуры, науки, искусства, политики; производственная и другие виды деятельности; национальные и бытовые традиции; устремлённость в будущее. Вследствие такой значительной концентрации объектов познавательного туризма в центре Москвы, именно эта часть её территории концентрирует наибольшую часть туристского потока нашей столицы.

Таким образом, Москва является признанным в нашей стране и за рубежом наиболее привлекательным центром познавательного туризма России. Этому способствует целый комплекс факторов: историко-культурных, экономических, социальных, инфраструктурных, инновационных, в результате которых на территории Москвы формировался уникальный познавательно-туристский потенциал, созданы благоприятные условия для туристского развития.

Ресурсный потенциал Москвы позволяет развивать самые разнообразные виды познавательного туризма (рис. 4).

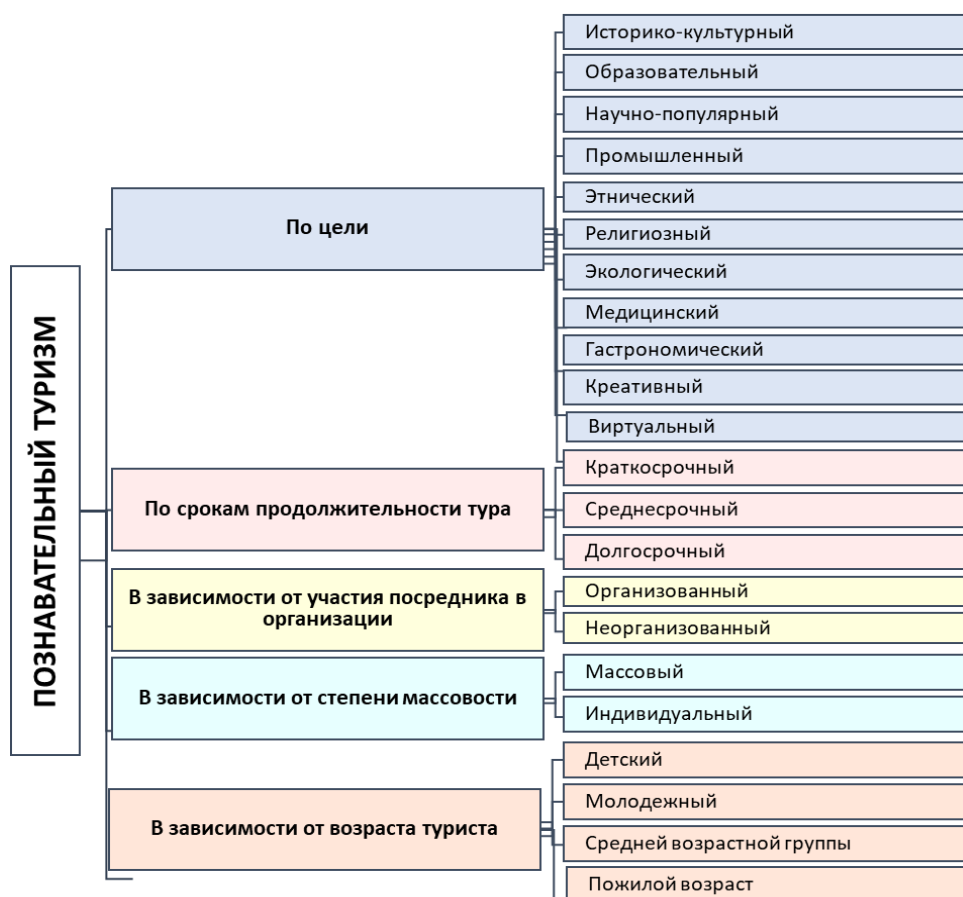


Рис. 4. Основные виды познавательного туризма в Москве. Составлено Шульгиной О.В.

Fig. 4. Main types of educational tourism in Moscow. Compiled by Shulgina O.V.

Кроме объектов, городская среда, как правило, насыщена различными явлениями и процессами. К таковым можно отнести различные события (сезонные ярмарки, празднования, фестивали и т.д.), инициативы и проекты (культурные, социальные, экологические, экономические и т.д.). Использование этих явлений и процессов в образовательных целях может способствовать лучшему пониманию специфики города, как системы, значительно обогатить учебный процесс, сделать его более практическим и интерактивным, а также способствовать развитию критического мышления и социальной активности (например, в формате волонтерской деятельности).

Методы использования в образовании городских ресурсов. Использование городских ресурсов в образовании может быть реализовано через различные методы и подходы. В целом, они корреспондируются с конвенциональными методами научного исследования.

Прежде всего, стоит отметить полевой метод, который может быть реализован посредством образовательных экскурсий и практик. В ходе полевых исследований могут проводиться отработка умений проведения социальных опросов и интервью. Это

позволяет грамотно интерпретировать природные наблюдения, анализировать статистические источники, проводить научное осмысление результатов исследования в системе «природа-общество-человек». По авторским полевым измерениям проводятся геоэкологические исследования, примерами которых могут служить публикации студентов географических направлений Московского городского педагогического университета [Шульгина, 2022].

Так, например, студенческие исследования, проведённые в 2020–2021 гг., придали идее экологического каркаса Москвы географический контекст и цифровое пространственное видение, а также снабдили её конкретными рекомендациями для познавательной и образовательной деятельности. Установлено, что при среднем показателе обеспеченности территориями природного комплекса в 25,8 м² на одного жителя, эта цифра колеблется в пределах от 46,1 до 12,9 м² в зависимости от конкретного района (рис. 5). Наибольшей долей озеленённых пространств (исключая территории Новой Москвы) располагают жители Восточного, Западного и Северо-Западного административных округов; наименьшей – жители Центрального, Северо-Восточного и Северного округов [Володина, 2020; Володина, 2021].

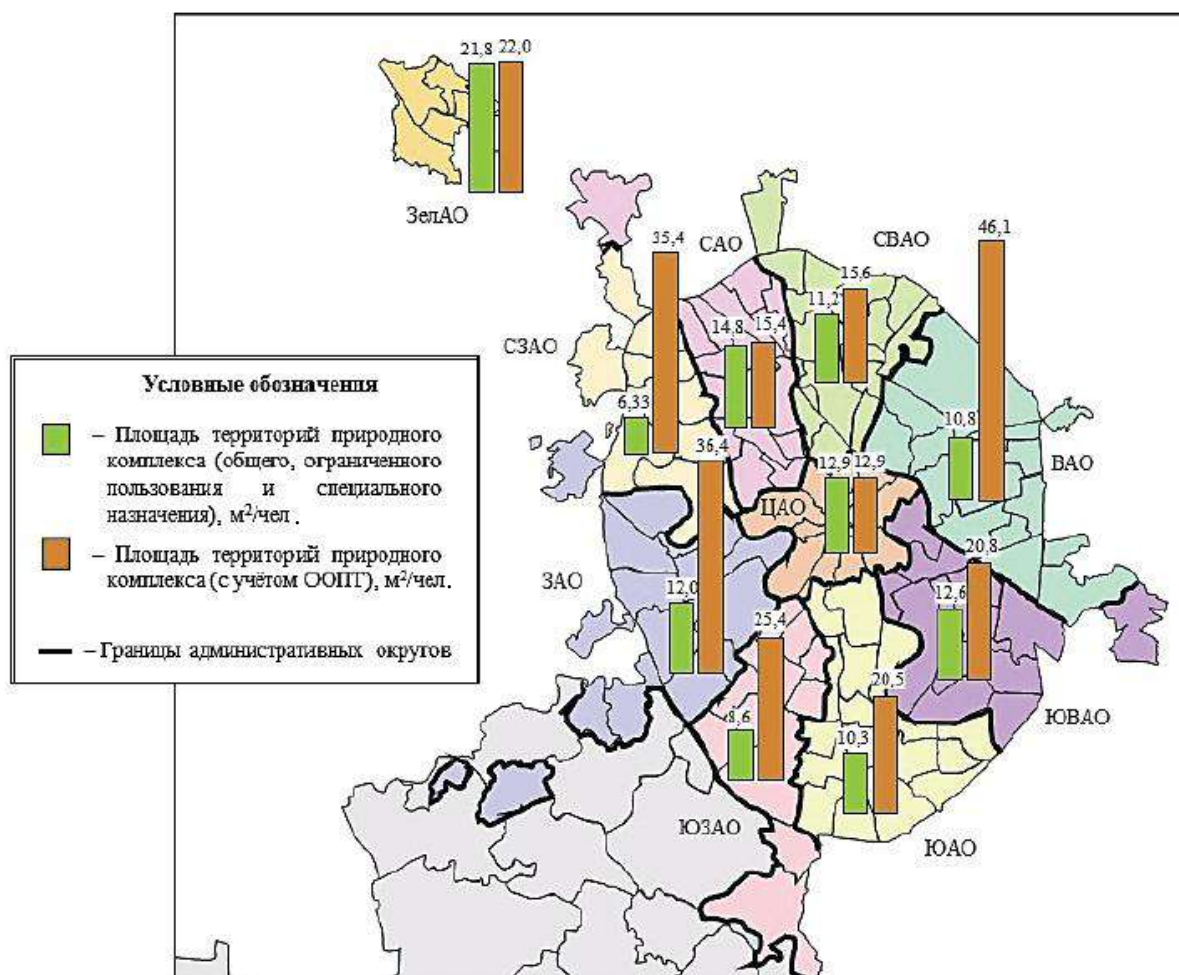


Рис. 5. Обеспеченность жителей города Москвы природными территориями по административным округам с учетом ООПТ — особо охраняемых природных территорий (пример студенческого исследования)

Fig. 5. Provision of Moscow residents with natural areas by administrative districts, taking into account SPNAs – specially protected natural areas (example of student research)

Характерным примером здесь также выступает проведённый в 2020 г. комплексный разбор экологических последствий возведения крупной автомагистрали внутри города – фрагмента Северо-Восточной хорды близ Ховрино. Автором был зафиксирован один из результатов этого анализа: с помощью изолиний наглядно показана картина шумового загрязнения территории (рис. 6). Известно, что избыточный шум наносит вред здоровью. Предельно допустимым значением, не ведущим к тревожности и соматическим либо психологическим сдвигам, является 55 дБ. В изученном же районе громкость достигала 71 дБ всего в 40 м от трассы [Нелюбин, 2020]. Если к изложенному добавить фактор светового загрязнения и трансформацию улично-дорожной сети, осложняющую перемещение местных жителей, то нельзя не разделить вывод автора о насущной необходимости тщательной оценки рациональности сооружения масштабных автодорог в Москве с учётом всех составляющих качества жизни населения ещё на этапе предпроектных разработок.

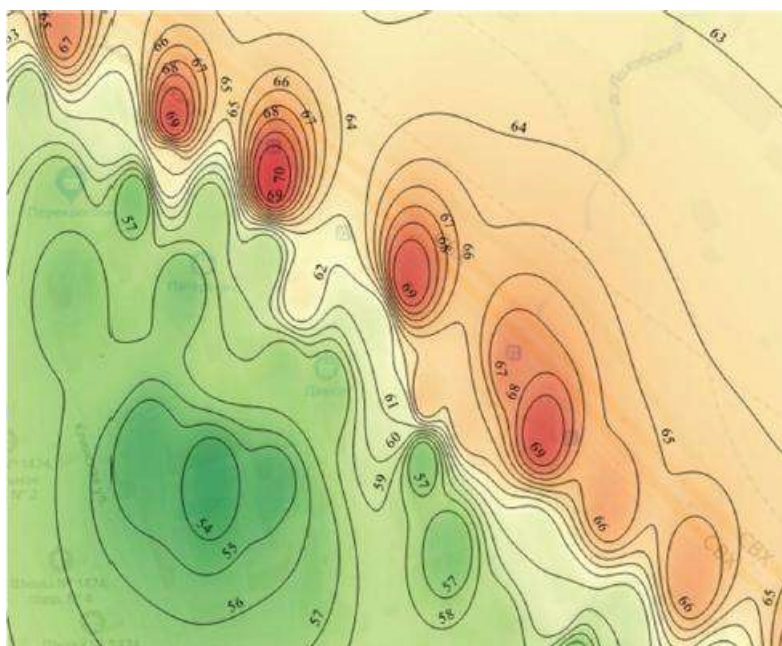


Рис. 6. Уровень шума рядом с Северо-Восточной хордой в районе Ховрино города Москвы, дБ (пример студенческого исследования)

Fig. 6. Noise level near the North-Eastern Chord in the Khovrino district of Moscow, dB (example of student research)

Кроме полевого метода, довольно многогранны возможности использования различных методов обобщения. В эпоху цифровизации практически отсутствует проблема доступа к первичным данным. Данные могут быть подвергнуты статистическому анализу обучающимися, для выявления закономерностей и тенденций развития различных подсистем и отдельных компонентов городской среды. Особая роль в данном процессе отводится геоинформационным методам исследования, которые широко используются для анализа городских данных и визуализации информации о городской среде, в том числе посредством тематического картографирования.

В этом контексте стоит отметить работу, победившую в 2025 году на конкурсе «Код науки», которая была посвящена анализу тенденций преступности в Москве за период 2014–2024 гг. В ней был рассмотрен ряд показателей, отражающих территориальную специфику преступлений, а также установлено, что в пределах Москвы проходит устойчивая линия размежевания между «Западом» и «Востоком», проявляющаяся в различиях уровня преступлений, совершаемых лицами, не имеющими постоянного дохода. В целом, в территориальной специфике преступности столицы прослеживается определённая пространственная иерархия, укладывающаяся в рамки центрo-периферической модели, где

«Центр» представлен территорией, для которой характерна совокупность высоких показателей преступности в то время, как «Полупериферия» и «Периферия» характеризуются более значительной вариацией соотношения высоких, средних и низких значений показателей преступности (рис. 7) [Гниломедова, 2025].

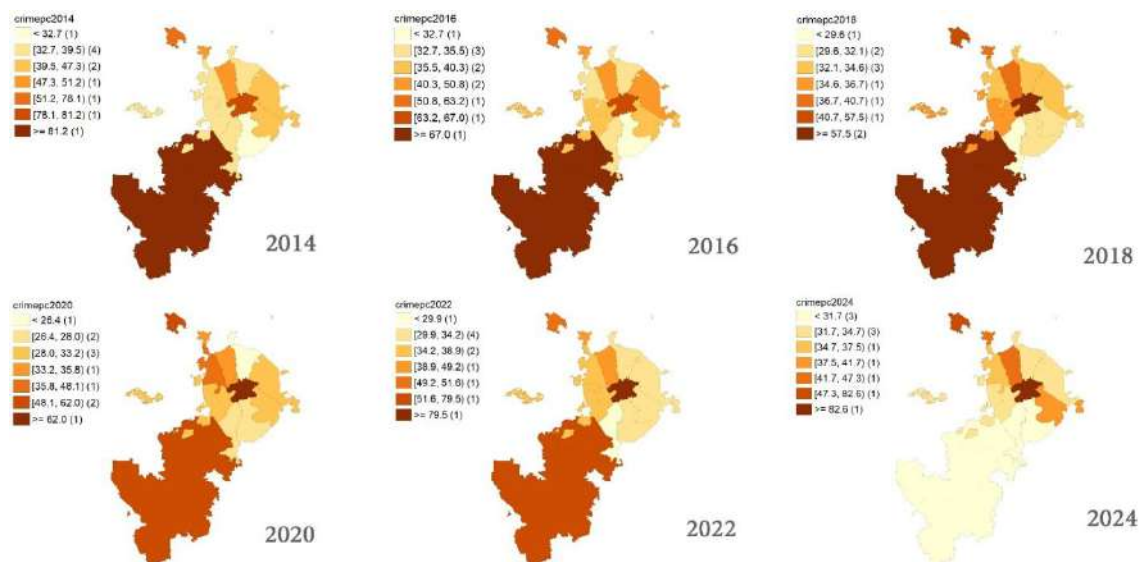


Рис. 7. Динамика душевых показателей преступлений по административным округам г. Москвы, 2014–2024 гг. (количество преступлений на 10 тыс. чел.) (пример студенческого исследования)

Fig. 7. Dynamics of per-capita crime indicators by administrative districts of Moscow, 2014–2024 (number of crimes per 10,000 people) (example of student research)

При помощи картографических методов обучающиеся имеют возможность выявлять пространственные особенности развития городской среды. В дальнейшем различия территориальной организации объектов, процессов и явлений могут быть сопоставлены при помощи сравнительно-географического метода. В свою очередь это может найти отражение в проектной деятельности, связанной с городскими проблемами, такими как экология, транспорт, социально-экономическое развитие или в краеведческой деятельности. Привлечение студентов к разработке решений для реальных городских задач позволяет более комплексно подойти к изучению проблем урбанизации, что особенно важно в контексте развития экологической, экономической, политической и географической культуры [Быховская, 2011].

Городские ресурсы в синтезе с технологиями виртуальной и дополненной реальности могут также использоваться для создания виртуальных экскурсий и интерактивных образовательных программ. К числу примеров можно отнести два общедоступных в интернете аудиотура на платформе *IZI.TRAVEL* – «Памятные места моей малой родины – Можайского района города Москвы» и «Абрикосовы в Москве XIX века» [Чеснок, 2020; 2021]. Оба проекта описаны в профильных публикациях, востребованы у столичной аудитории и отмечены многочисленными позитивными рецензиями. Исследовательская деятельность в данном направлении продолжает развиваться.

Довольно сложно переоценить важность перечисленных выше подходов и методов в образовательной деятельности. Однако необходимо отметить, что их реализация становится возможной при условии разработки или совершенствовании учебных планов, которые включают изучение городской среды в контексте различных предметов. Более того, объединение различных дисциплин (например, география, экология, экономика, социология и т.д.) позволит более комплексно подойти к изучению городских проблем.

Важным условием достижения эффективности использования городских ресурсов в образовательной деятельности является установление партнерских отношений с местными

организациями (образовательными, культурными и пр.), которые, с одной стороны, могут облегчить доступ к соответствующим ресурсам в образовательных и исследовательских целях, что может быть использовано для реализации образовательных проектов для горожан. С другой стороны, они могут обеспечить возможность прохождения учебных стажировок и практик для студентов.

Заключение

Подводя итог проведённого исследования, остановимся на ключевых выводах.

Во-первых, обоснованы концептуальные рамки образовательной геоурбанистики, как перспективного направления в системе общественно-географических наук. Структура направления охватывает четыре ключевых блока: территориальную организацию образования, влияние образования на среду, городские ресурсы и методы их использования в образовании. Такой подход позволяют не только анализировать территорию Москвы с точки зрения пространственного размещения образовательной инфраструктуры, но и предлагать практические решения по повышению эффективности использования образовательных ресурсов в интересах развития мегаполиса и совершенствования системы образования.

Во-вторых, проведённый пространственный анализ показал, что территориальная организация образовательных организаций, подчинённых Департаменту образования и науки города Москвы, характеризуется выраженной дифференциацией. Максимальная концентрация учреждений наблюдается в Южном, Северном и Юго-Западном административных округах, тогда как минимальная – в Зеленоградском, Новомосковском и Троицком округах, где образовательная инфраструктура остаётся наименее развитой. Выявленные диспропорции объясняются сочетанием демографических (низкая численность населения), исторических (позднее включение в состав Москвы) и географических (эксклавное положение Зеленограда, удалённость ТиНАО) факторов, что подтверждает необходимость внедрения мер по выравниванию образовательного пространства столицы.

В-третьих, посредством синтеза *SWOT*- и *PESTEL*-моделей доказано, что образование выступает стратегическим фактором развития городской среды Москвы. Оно формирует конкурентные преимущества столицы как «образовательного хаба» и «города знаний», одновременно порождая вызовы в виде оттока талантов, социальной стратификации и инфраструктурной нагрузки, которые могут быть нивелированы путём внедрения ряда управленческих решений, таких как переориентация на новые рынки потребителей образовательных услуг и новые форматы сотрудничества местных органов власти с образовательными учреждениями. В целом, влияние образования на городскую среду превращает его в стратегический ресурс для формирования бренда Москвы. Оно усиливает конкурентоспособность столицы, формирует образ «интеллектуального мегаполиса» и задает повестку для долгосрочного позиционирования города на международной арене.

В-четвёртых, проведена систематизация познавательных ресурсов Москвы и выделены их ключевые категории, включающие объекты (вузы, музеи, транспортная инфраструктура, ООПТ) и явления (события, проекты). Систематизация данных ресурсов позволяет рассматривать мегаполис как «единую образовательную платформу», а сами они могут эффективно использоваться как в формальном, так и в неформальном образовании, а также в развитии познавательного туризма.

В-пятых, образовательная геоурбанистика обладает значительным дидактическим потенциалом для совершенствования содержания географических и смежных дисциплин. Интеграция городских ресурсов через полевые практики, геоинформационные технологии, проектную деятельность и виртуальные экскурсии способствует формированию у обучающихся системного пространственного мышления, краеведческой культуры и навыков решения реальных городских проблем.

Список источников

- Горычева С.Н., Звяглова М.В., Игнатьева Е.Ю., Кукушкина А.Г. 2025. Образовательная урбанистика. Великий Новгород, Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, 105 с.
- Гохберг Л.М., Кузнецова Т.Е., Рудь В.А. 2011. Инновационные кластеры в экономике России: перспективы и механизмы развития. М., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 56 с.
- Лешуков О.В., Евсеева Д.Г., Громов А.Д., Платонова Д.П. 2017. Оценка вклада региональных систем высшего образования в социально-экономическое развитие регионов России. М., НИУ ВШЭ, 30 с.
- Литературная география России. Под ред. Ю.А. Веденина, В.Н. Калуцкова. М., Изд-во МГУ, 295 с.
- Портал открытых данных Правительства Москвы. Электронный ресурс. URL: <https://data.mos.ru/> (дата обращения 08.08.2025)
- Шульгина О.В., Воронова Т.С., Гайворон Т.Д., Грушина Т.П., Майнашева Г.М., Самусенко Д.Н. 2025. Географическое москвоведение. М., ИНФРА-М, 244 с.
- Шульгина О.В., Шульгина Д.П. 2019. Культурное и природное наследие России. М., Издательство Юрайт, 177 с.

Список литературы

- Бакланов П.Я. 2019. Территориальная организация и пространственное развитие: соотношение понятий и процессов. В кн.: Геосистемы восточных районов России: особенности их структур и пространственного развития. Владивосток, Издательство Дальнаука: 10–16.
- Быховская И.М. 2011. Прикладной вектор культурологии: искомое и сущее. Вестник Кемеровского государственного университета культуры и искусств, 14: 21–40.
- Буланов М.В., Россинская А.Н., Асонова Е.А. 2021. Образовательная урбанистика: опыт описания ключевых понятий. Научно-педагогическое обозрение, 6(40): 236–245. <https://doi.org/10.23951/2307-6127-2021-6-236-245>
- Володина М.В. 2021. Природные территории как экологический каркас Москвы и объекты рекреационно-познавательной деятельности. В кн.: Бюллетень института естествознания и спортивных технологий. М., Медиагруппа «ХАСК»: 8–15.
- Володина М.В. 2020. Природные территории Москвы как объект географического исследования. В кн.: Шаг в науку. Материалы IV Научно-практической конференции молодых ученых, Москва, 18 декабря 2020. М., Московский городской педагогический университет: 779–782.
- Гамаюнов О.А. 2024. Экологическая урбанистика – инновационный подход к планированию городской среды. Вестник Керченского государственного морского технологического университета, 4: 45–51.
- Глазычев В.Л. 2008. Урбанистика. М., Европа, 219 с.
- Глозман О.С. 2017. Тенденции подземной урбанизации. Academia. Архитектура и строительство, 2: 79–83.
- Гниломедова Р.А. 2025. Геоинформационный анализ преступности в городе. Наука в мегаполисе, 5(73): 8.
- Гончарова В.А. 2022. Содержание профессиональной подготовки учителей английского языка с позиции образовательной урбанистики. Alma Mater (Вестник высшей школы), 1: 73–80.
- Зубаревич Н.В. 2003. Социальное развитие регионов России: проблемы и тенденции переходного периода. М., УРСС, 261 с.
- Игнатьева Е.Ю., Горычева С.Н., Звяглова М.В. 2022. Образовательная урбанистика в контексте дидактики. Перспективы науки и образования, 4(58): 42–57. <https://doi.org/10.32744/pse.2022.4.3>
- Илларионова Л.П. 2024. Образовательная урбанистика в профессиональной подготовке педагога. В кн.: Современное профессиональное образование: опыт, проблемы, перспективы. Материалы международной научно-практической конференции, Орёл, 07–08 октября 2024. Орёл, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева: 145–152.
- Лаппо Г.М. 1997. Литературная геоурбанистика. В кн.: Экономическая и социальная география на пороге XXI века. Смоленск, Смоленский гуманитарный университет: 97–109.

- Леонтьева Е.Ю. 2023. Сенсорная урбанистика: введение в предметное поле. Социология города, 3: 71–84. https://doi.org/10.35211/19943520_2023_3_71
- Лисовец И.М. 2014. Город в проблемном поле культурологической урбанистики. В кн.: Современный город: социальность, культуры, жизнь людей. Материалы XVII Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 14–15 апреля 2014. Екатеринбург, Негосударственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Гуманитарный университет: 48–52.
- Нелюбин А.В. 2020. Комплексный анализ проблемы строительства крупных автомобильных магистралей в черте города на примере участка северо-восточной хорды в районе Ховрино города Москвы. В кн.: Шаг в науку. Материалы IV Научно-практической конференции молодых ученых (II всероссийской), Москва, 18 декабря 2020. М., Московский городской педагогический университет: 815–818.
- Новая Москва: исследование пространственного развития. 2019. М., Стрелка КБ, 140 с.
- Олесик Н.С. 2006. Военная геOURбанистика и военная география. Военная мысль, 4: 38–47.
- Пилясов А.Н. 2009. География инноваций: от пространства к процессу. Смоленск, Ойкумена, 512 с.
- Соломин В.П., Летягин Л.Н., Игнатьев Д.Ю. 2014. Образовательный универсум города: педагогические аспекты философской урбанистики. Нижегородское образование, 2: 124–129.
- Тархов С.А. 2013. Социально-экономическая география: ее сущность, предмет изучения и методы. Региональные исследования, 3(41): 9–13.
- Федорова М.А., Чурилова И.Н., Винникова Т.А. 2023. Подготовка студентов-переводчиков с позиций образовательной урбанистики. Ярославский педагогический вестник, 1(130): 66–74. https://doi.org/10.20323/1813_145X_2023_1_130_66_74
- Чеснок В.А. 2021. Памятные места моей малой родины – Можайского района города Москвы: аудиотур на платформе izi.travel. В кн.: #ScienceJuice2020. Сборник статей и тезисов, Москва, 23–27 ноября 2020. М., ПАРАДИГМА: 209–213.
- Чеснок В.А. 2020. Проект «Абрикосовы в Москве XIX века» (аудиотур на платформе мобильного приложения IZI.TRAVEL). В кн.: Шаг в науку. Материалы IV Научно-практической конференции молодых ученых (II всероссийской), Москва, 18 декабря 2020. М., МГПУ: 830–834.
- Шевелев А.Н. 2022. Историко-образовательная урбанистика как перспективное направление историко-педагогических исследований. В кн.: Перспективы развития исследований в сфере наук об образовании. Материалы международной научно-практической конференции, Москва, 06–07 декабря 2021. М., Российская академия образования: 120–123.
- Шоломова Т.В. 2019. Философская урбанистика и педагогическое петербурговедение в контексте университетского образования. Идеи и идеалы, 11(4–1): 205–216. <https://doi.org/10.17212/2075-0862-2019-11.4.1-205-216>
- Шульгина О.В. 2022. Географические исследования пространства Москвы в студенческих научных и проектных работах. В кн.: UniverCity: Города и Университеты. М., Издательство «Экон-Информ: 133–148.
- Florida R. 2002. The Rise of the Creative Class. New York, Basic Books, 404 p.
- Glaeser E. 2011. Triumph of the City. New York, Penguin Press, 352 p.
- Landry C. 2008. The Creative City: A Toolkit for Urban Innovators. 2nd ed. London, Earthscan, 300 p.
- Kotler P. 2002. Marketing Places. New York, Simon and Schuster, 400 p.
- Sassen S. 2001. The Global City: New York, London, Tokyo. 2nd ed. Princeton, Princeton University Press, 447 p.

References

- Baklanov P.Y. 2019. Territorial Organization and Spatial Development: Concepts and Processes. In: Geosystems of the Eastern Regions of Russia: Features of Their Structures and Spatial Development. Vladivostok, Publ. Izdatelstvo Dalnauka: 10–16 (in Russian).
- Bykhovskaya I.M. 2011. Prikladnoy vektor kulturologii: iskomoye i sushcheye [Applied Vector of Cultural Studies: the Sought and the Existing]. Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta kultury i iskusstv, 14: 21–40.
- Bulanov M.V., Rossinskaya A.N., Asonova E.A. 2021. Educational Urban Studies: Approach to Describing Key Concepts. Pedagogical Review, 6(40): 236–245 (in Russian). <https://doi.org/10.23951/2307-6127-2021-6-236-245>

- Volodina M.V. 2021. Prirodnyye territorii kak ekologicheskiy karkas Moskvy i obyekty rekreatsionno-poznavatel'noy deyatel'nosti [Natural Areas as an Ecological Framework for Moscow and Objects of Recreational and Educational Activities]. In: Byulleten instituta estestvoznaniya i sportivnykh tekhnologii [Bulletin of the Institute of Natural Science and Sports Technology]. Moscow, Publ. Mediagruppa "KhASK": 8–15.
- Volodina M.V. 2020. Prirodnyye territorii Moskvy kak ob'ekt geograficheskogo issledovaniya [Natural Areas of Moscow as an Object of Geographical Research]. In: Shag v nauku [Step into Science]. Proceedings of the IV Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Moscow, 18 December 2020. Moscow, Publ. Moskovskiy gorodskoy pedagogicheskiy universitet: 779–782.
- Gamayunov O.A. 2024. Ecological Urbanism is an Innovative Approach to Planning the Urban Environment. Bulletin of the Kerch State Marine Technological University, 4: 45–51 (in Russian).
- Glazychev V.L. 2008. Urbanistika [Urban Studies]. Moscow, Publ. Evropa, 219 p.
- Glozman O.S. 2017. Trends of Underground Urbanization. Academia. Architecture and Construction, 2: 79–83 (in Russian).
- Gnilomedova R.A. 2025. Geoinformation Analysis of Crime in Moscow. Science in a Megapolis, 5(73): 8 (in Russian).
- Goncharova V.A. 2022. Content of Professional Training of English Language Teachers from the Perspective of Educational Urbanistics. Alma Mater (Higher School Bulletin), 1: 73–80 (in Russian).
- Zubarevich N.V. 2003. Sotsialnoye razvitiye regionov Rossii: problemy i tendentsii perekhodnogo perioda [Social Development of Russian Regions: Problems and Trends of the Transition Period]. Moscow, Publ. URSS, 261 p.
- Ignatyeva E.Yu., Gorycheva S.N., Zvyaglova M.V. 2022. Educational Urbanistics in the Context of Didactics. Perspectives of Science and Education, 4(58): 42–57 (in Russian). <https://doi.org/10.32744/pse.2022.4.3>
- Illarionova L.P. 2024. Educational Urbanism in the Professional Training of a Teacher. In: Modern professional education: experience, problems, prospects. Materials of the international scientific and practical conference, Orel, 7–8 October 2024. Orel, Publ. Oryol State University named after I.S. Turgenev: 145–152 (in Russian).
- Lappo G.M. 1997. Literary Geourbanistics. In: Economic and Social Geography on the Threshold of the 21st Century. Smolensk, Publ. Smolensk Humanitarian University: 97–109 (in Russian).
- Leontyeva E.Yu. 2023. Sensory Urbanism: Introduction to Subject Field. Sociology of the city, 3: 71–84 (in Russian).
- Lisovets I.M. 2014. Gorod v problemnom pole kulturologicheskoy urbanistiki [The City in the Problematic Field of Cultural Urbanism]. In: Sovremennyy gorod: sotsialnost. Kultury, zhizn lyudey [The Modern City: Sociality, Cultures, and People's Lives]. Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference, Yekaterinburg, 14–15 April 2014. Yekaterinburg, Publ. Negosudarstvennoye obrazovatel'noye uchrezhdeniye vysshego professional'nogo obrazovaniya Gumanitarnyy universitet: 48–52.
- Nelyubin A.V. 2020. Kompleksnyy analiz problemy stroitel'stva krupnykh avtomobil'nykh magistralei v cherte goroda na primere uchastka severo-vostochnoy khordy v rayone Khovrino goroda Moskvy [A Comprehensive Analysis of the Problem of Construction of Major Highways within the City: The Case of a Section of the North-East Chord in the Khovrino District of Moscow]. In: Shag v nauku [Step into Science]. Proceedings of the IV Scientific and Practical Conference of Young Scientists (II All-Russian), Moscow, 18 December 2020. Moscow, Publ. Moskovskiy gorodskoy pedagogicheskiy universitet: 815–818.
- Novaya Moskva: issledovanie prostranstvennogo razvitiya [New Moscow: A Study of Spatial Development]. 2019. Moscow, Publ. Strelka KB, 140 p.
- Olesik N.S. 2006. Voyennaya geourbanistika i voyennaya geografiya [Military Geourbanistics and Military Geography]. Voyennaya mysl, 4: 38–47.
- Pilyasov A.N. 2009. Geografiya innovatsiy: ot prostranstva k protsessu [The Geography of Innovation: From Space to Process]. Smolensk, Publ. Oykumena, 512 p.
- Solomin V.P., Letyagin L.N., Ignatiev D.Yu. 2014. Educational Universum of the City: Pedagogical Aspects of Philosophical Urbanistics. Nizhny Novgorod Education, 2: 124–129 (in Russian).
- Tarkhov S.A. 2013. Human Geography: Its Nature, Subject, and Methodology. Regional Research, 3(41): 9–13 (in Russian).

- Fedorova M.A., Churilova I.N., Vinnikova T.A. 2023. Teaching Interpreters in the Framework of Urban Educational Environment. Yaroslavl pedagogical bulletin, 1(130): 66–74 (in Russian). https://doi.org/10.20323/1813_145X_2023_1_130_66_74
- Chesnok V.A. 2021. Pamyatnyye mesta moyey maloy rodiny – Mozhayskogo rayona goroda Moskvy: audiotur na platforme izi.travel [Memorable Places in My Small Homeland – the Mozhaisk District of Moscow: an Audio Tour on the izi.travel Platform]. In: #ScienceJuice2020. Collection of articles and abstracts, Moscow, 23–27 November 2020. Moscow, Publ. “PARADIGMA”: 209–213.
- Chesnok V.A. 2020. Proekt “Abrikosovy v Moskve XIX veka” (audiotur na platforme mobil'nogo prilozheniya IZI.TRAVEL) [The “Aprikosovs in 19th-Century Moscow” Project (Audio Tour on the IZI.TRAVEL Mobile App Platform)]. In: Shag v nauku [Step into Science]. Proceedings of the IV Scientific and Practical Conference of Young Scientists (II All-Russian), Moscow, 18 December 2020. Moscow, Publ. MGPU: 830–834.
- Shevelev A.N. 2022. Istoriko-obrazovatel'naya urbanistika kak perspektivnoye napravleniye istoriko-pedagogicheskikh issledovaniy [Historical and Educational Urban Studies as a Promising Direction of Historical and Pedagogical Research]. In: Perspektivy razvitiya issledovaniy v sfere nauk ob obrazovanii [Prospects for the Development of Research in the Sphere of Educational Sciences]. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Moscow, 6–7 December 2021. Moscow, Publ. Russian Academy of Education: 120–123.
- Sholomova T.V. 2019. Philosophical Urban Studies and Pedagogical Saint Petersburg Studies in the Context of University Education. Ideas and Ideals, 11(4–1): 205–216 (in Russian). <https://doi.org/10.17212/2075-0862-2019-11.4.1-205-216>
- Shulgina O.V. 2022. Geograficheskie issledovaniya prostranstva Moskvy v studencheskikh nauchnykh i proektnykh rabotakh [Geographical Explorations of Moscow's Space in Student Research and Project Work]. In: UniverCity: Goroda i Universitety [UniverCity: Cities and Universities]. Moscow, Publ. “Ekon-Inform”: 133–148.
- Florida R. 2002. The Rise of the Creative Class. New York, Basic Books, 404 p.
- Glaeser E. 2011. Triumph of the City. New York, Penguin Press, 352 p.
- Landry C. 2008. The Creative City: A Toolkit for Urban Innovators. 2nd ed. London, Earthscan, 300 p.
- Kotler P. 2002. Marketing Places. New York, Simon and Schuster, 400 p.
- Sassen S. 2001. The Global City: New York, London, Tokyo. 2nd ed. Princeton, Princeton University Press, 447 p.

*Поступила в редакцию 11.09.2025;
поступила после рецензирования 15.04.2026;
принята к публикации 14.05.2026*

*Received September 11, 2025;
Revised April 15, 2026;
Accepted May 14, 2026*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шульгина Ольга Владимировна, доктор исторических наук, кандидат географических наук, доцент, профессор департамента образовательного проектирования Института естествознания и спортивных технологий, Московский городской педагогический университет, г. Москва, Россия

Ямамура Дмитрий Николаевич, кандидат географических наук, доцент, доцент департамента естествознания Института естествознания и спортивных технологий, Московский городской педагогический университет, г. Москва, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Olga V. Shulgina, Doctor of Historical Sciences, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Educational Design, Institute of Natural Science and Sports Technologies, Moscow City University, Moscow, Russia

Dmitry N. Yamamura, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Natural Science, Institute of Natural Science and Sports Technologies, Moscow City University, Moscow, Russia

УДК 502.3; 504.03 (571.53)
DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-3-681-693
EDN VVQVPT

Усолье-Сибирское: экологические проблемы и пути развития

¹Калихман Т.П., ²Калихман А.Д.

¹Лаборатория устойчивого развития Байкальского региона
ФИЦ «Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского СО РАН»
Россия, 664033, Иркутск, ул. Фаворского 1
²ФГБУ «Заповедное Прибайкалье»
Россия, 664050, Иркутск, ул. Байкальская, 291б
kalikhman@irigs.irk.ru, inba@irk.ru

Аннотация. Цель исследования – анализ современного состояния города Усолье-Сибирское Иркутской области и перспектив развития, связанных с последовавшими после окончания деятельности градообразующего предприятия «Усольехимпром» событиями: от получения статуса территории опережающего социально-экономического развития до назначения госкорпорации «Росатом» безальтернативным ликвидатором накопленного вреда и включением в перечень атомных городов. По состоянию на начало 2025 г. вредные отходы не ликвидированы, предложения об организации здесь Федерального центра химии с новыми рабочими местами имеют весьма отдаленную перспективу. В качестве актуальной альтернативы рассматривается рекреационная деятельность, помогающая благоустраивать общественные городские пространства и создавать современную инфраструктуру пребывания.

Ключевые слова: Усольехимпром, накопленный вред, ртутное загрязнение, рекультивация, рекреация, внешние эффекты

Для цитирования: Калихман Т.П., Калихман А.Д. 2026. Усолье-Сибирское: экологические проблемы и пути развития. Региональные геосистемы, 50(3): 681–693. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-681-693 EDN: VVQVPT

Usolye-Sibirskoye: Environmental Issues and Development Paths

¹Tatyana P. Kalikhman, ²Arkady D. Kalikhman

¹A.E. Favorsky Irkutsk Chemistry Institute of SB RAS,
Baikal Region Sustainable Development Laboratory
1 Favorsky St., Irkutsk 664033, Russia,
²Zapovednoye Pribaykalye,
291b Baikalskaya St., Irkutsk 664050, Russia,
kalikhman@irigs.irk.ru; inba@irk.ru

Abstract. A decade has passed since the town of Usolye-Sibirskoe was officially mapped as one with environmental problems of the federal level. It allows us to summarize the results of the effort to alleviate the damage accumulated due to the work of UsolyeKhimProm, former town-forming enterprise that has ceased operation. We analyze the events beginning with the town obtaining the status of an advanced development territory to the appointment of the Rosatom state corporation to be a single organizer of the demolition of several hundred buildings, the construction of an eco-technopark for handling waste of I and II classes of danger, including mercury-containing waste, and general recultivation of the polluted territory. As of the end of 2024, the organiser had failed to meet the planned work schedule and to establish the ecopark. The proposals for the organization of the Federal Chemical Center in the next few years and the creation of up to ten thousand new jobs on the purified site have a very distant perspective,

© Калихман Т.П., Калихман А.Д., 2026

even despite the inclusion of Usolye-Sibirskoe in the list of the country's atomic cities and towns. In the article, we suggest that the town's economy should rely on the recreational industry rather than return to chemical production. The former will effectively improve public urban spaces, build a new infrastructure for residents' and visitors' stay, include elements of an accessible environment, if provided with support from the town administration.

Keywords: UsolyeKhimProm, accumulated damage, mercury pollution, regeneration, recreation, external effects

For citation: Kalikhman T.P., Kalikhman A.D. 2026. Usolye-Sibirskoye: Environmental Issues and Development Paths. Regional geosystems, 50(3): 681–693 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-681-693 EDN: VVQVPT

Введение

Более чем три с половиной столетия жизни Усо́лья-Сиби́рского включили как появление здесь первого солеваренного завода, так и деятельность советского «Усо́льехимпро́ма» с постперестроечным падением химического производства. Известно, что село и уже более века город Усо́лье-Сиби́рское славился не только солеварением, но также железоделательным, мыловаренным, кожевенным, кирпичным, спичечным производствами. Отличалось Усо́лье разнообразием религиозной и культурной жизни, связанной с периодом пребывания здесь на каторге декабристов, затем ссыльных участников первого и второго польского восстания. При солеваренном заводе была построена Спасская церковь (взорванная в 1936 г.), а затем открыты лечебные свойства соляных источников, на которых возник широко известный и в наши дни, теперь под официальным названием санаторно-курортное учреждение «Усо́лье» [Шаманский, 2019].

В советский период индустриализация города и деятельность сети химических производств с 1936 по 2017 гг. привели к деградации больших городских площадей. В 2018 г. власти Иркутской области впервые официально объявили о необходимости военизированной охраны территории «Усо́льехимпро́ма» и подготовки документов для включения в государственный Реестр объектов накопленного вреда, допускающего выделение средств федеральной целевой программы на ликвидацию экологического ущерба от деятельности химических производств [Мамонтова, 2018]. В той же статье отмечалась особая опасность бывшего цеха ртутного электролиза, проблемы с большими скоплениями ртути, а также мародерство на территории, сдача в аренду помещений майнинговым фермам при малом внимании к происходящему органов Ростехнадзора и природоохранной прокуратуры. Повестка рекультивации загрязненных городских земель стала с того времени одной из основных в жизни Усо́лья-Сиби́рского, оттеснив на второй план проекты благоустройства города, рекреационной деятельности.

Городской округ город Усо́лье-Сиби́рское расположен на левом берегу р. Ангары и находится в 70 км к северо-западу от Иркутска. Через город проходят старый участок федеральной трассы Р255 «Сибирь» и Транссибирская железнодорожная магистраль. По состоянию на 01.01.2025 г. население составляет 71 694 чел. [Численность постоянного ..., 2025], находится на 228-м месте из 1124 городов страны и 10-м – в Иркутской области. Площадь города составляет 7,9 тыс. га [Официальный сайт ..., 2025]. Промышленные объекты Усо́лья-Сиби́рского занимают значительные территории, в частности, только участок бывшего предприятия «Усо́льехимпро́м» занимает половину города (рис. 1).

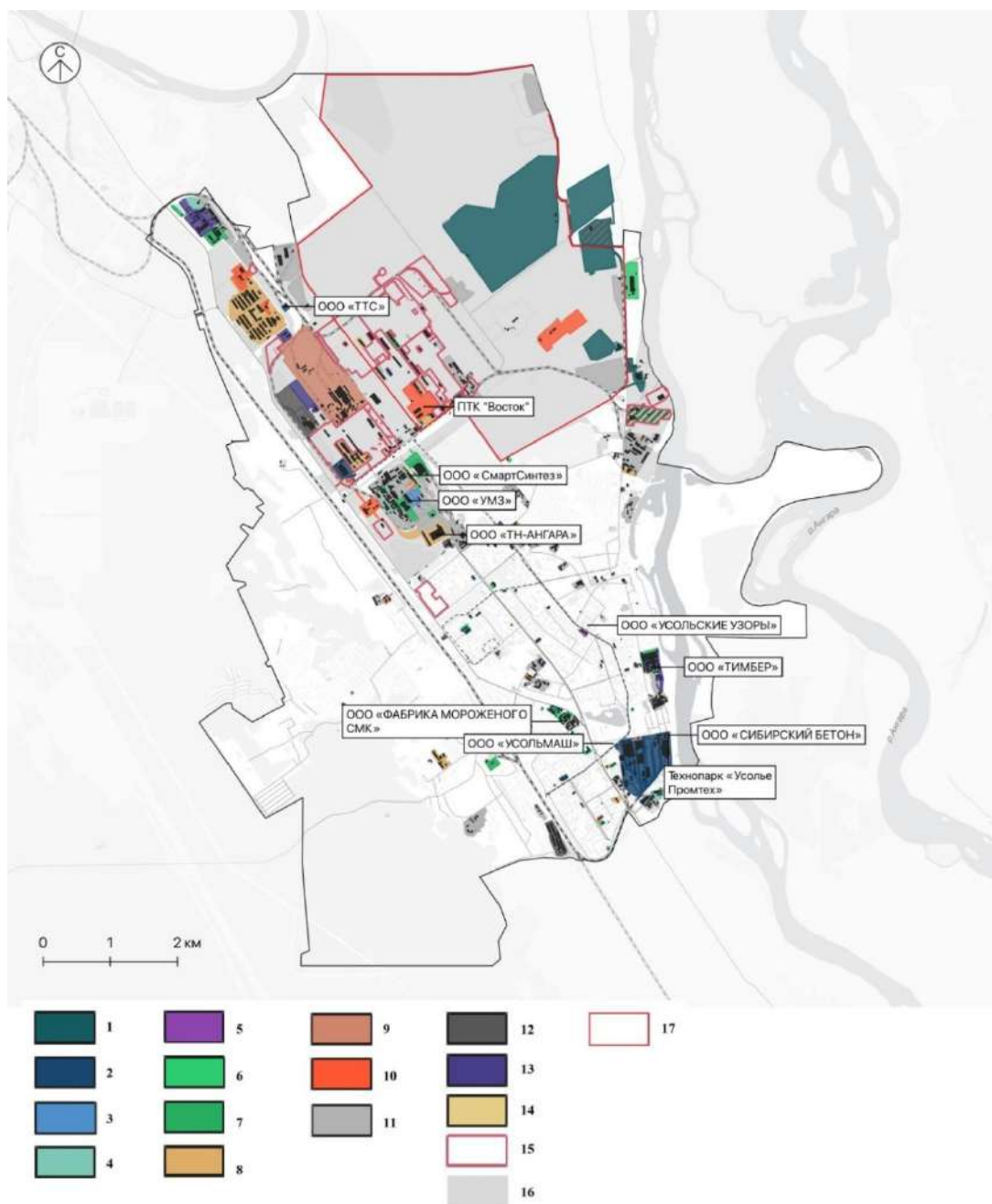


Рис. 1. Промышленные зоны города Усолье-Сибирское

Секторы промышленности (действующие предприятия): 1 – добыча полезных ископаемых, 2 – машиностроение, 3 – металлургия и металлообработка, 4 – строительные и нерудные материалы, 5 – текстильная и легкая промышленность, 6 – пищевая промышленность, 7 – лесопромышленный комплекс, 8 – химическая промышленность, 9 – энергетика и коммунальное хозяйство, 10 – переработка отходов производства и потребления, 11 – нет данных; Иные секторы: 12 – логистика, склады, транспорт, 13 – торговля оптовая и розничная, 14 – строительство, 15 – существующие инвестплощадки, 16 – функциональные (производственные) зоны ПЗ-1, ПЗ-2, ПЗ-3, ПЗ-4, СНЗ-2 (зона специального назначения); Территории ликвидированных предприятий: 17 – промплощадка бывшего «Усольехимпром»

Fig. 1. Ussolye-Sibirskoye town industrial zones

Industrial sectors (active enterprises): 1 – mining, 2 – mechanical engineering, 3 – metallurgy and metalworking, 4 – construction and non-metallic materials, 5 – textile and light industry, 6 – food industry, 7 – timber industry, 8 – chemical industry, 9 – energy and communal services, 10 – waste recycling and consumption, 11 – no data; Other sectors: 12 – logistics, warehouses, and transportation, 13 – wholesale and retail trade, 14 – building construction, 15 – existing investment sites, 16 – functional areas of Industrial Zone -1, Industrial Zone -2, Industrial Zone -3, Industrial Zone -4, and SPZ-2 (special-purpose zone); Territories of enterprises that have been closed down: 17 – the former UssolyeKhimProm industrial site

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются геоэкологические и экономико-географические особенности Усо́лья-Сиби́рского, включая институциональные.

Работа выполнена в ходе полевых исследований, интервьюирования лиц, принимающих решения, анализа статистических данных. Основным методом стал анализ возможностей рекультивации участка накопленного экологического вреда, связанных с последствиями деятельности градообразующего предприятия «Усо́льехомпро́м», экономического потенциала современного города и перспектив развития рекреации. Также использовались картографические методы, в т.ч. дистанционные и ГИС-картографирование.

Результаты и их обсуждение

Институциональные рамки

Вовлеченность города и его администрации в проекты федерального уровня, связанная с окончанием деятельности «Усо́льехимпро́ма», можно анализировать, исходя из оценок институциональных нормативных положений, принятых для решения задач будущего развития Усо́лья-Сиби́рского. Первым можно считать наделение города статусом территории опережающего социально-экономического развития (ТОСЭР) в начале 2016 г. [О создании территории ..., 2016], содействующим привлечению инвестиций и созданию новых рабочих мест, не связанных с деятельностью градообразующих предприятий ООО «Усо́льехимпро́м» и ООО «Усо́лье-Сиби́рский Силико́н», и определяющим допустимые виды экономической деятельности при реализации инвестиционных проектов. Появление за десятилетие в среднем по одному предприятию в год свидетельствует о невысокой эффективности института ТОСЭР, учитывая падение численности населения города в этот период с 77,4 до 71,7 тыс. чел. Очевидно, что декларации ТОСЭР не привели к заметному изменению социально-экономической ситуации.

Следующим, промежуточным, по сути, положением, стало включение в федеральный проект «Чистая страна» национального проекта «Экология», чему предшествовали попадание в апреле 2018 г. в р. Ангару неочищенных сточных вод, сбрасывание на грунт в июне 2018 г. нескольких тонн четыреххлористого кремния с возбуждением уголовного дела СК РФ, введение режима ЧС в ноябре 2018 г. вследствие утечки опасного вещества из емкости и угрозы ухода на город облака хлористого водорода, разгерметизация подземной цистерны в октябре 2019 г. с выбросом газа, констатация в конце 2019 г. властями области опасности очага ртутного загрязнения на месте работы цеха ртутного электролиза, следуя сетевым сообщениям [Кушниренко, 2020]. Выброс отходов из давно не работающих очистных сооружений бывшего «Усо́льехимпро́ма» в Ангару летом 2020 г. послужил сигналом к принятию кардинальных решений на высшем властном уровне.

Решения можно отнести к следующим институциональным положениям, озвученным как в виде президентских распоряжений [О мерах по предупреждению ..., 2020; Перечень поручений ..., 2020], так и в виде распоряжений Правительства Российской Федерации. Сроки исполнения, изложенных в четырех пунктах поручений, ограниченные двумя месяцами, не могли дать реальную оценку «объемов и стоимости работ по изоляции и (или) приведению в безопасное состояние объектов ...», хотя для «работ по проектированию ликвидации накопленного вреда окружающей среде» была безальтернативно определена Государственная корпорация (ГК) по атомной энергии «Росатом» [Об определении единственного ..., 2020] с заданием «обеспечить организацию незамедлительного выполнения работ». Перечисленные поручения сразу же были уточнены и дополнены «дорожной картой» в правительственных поручениях из

46 пунктов мероприятий по устранению загрязнений с указанием их содержания, сроков работ и двух десятков исполнителей от Росгвардии до администрации Усолья-Сибирского [Об утверждении плана ..., 2020].

Десять простых в реализации пунктов «по защите населения» были выполнены в срок, как и девять пунктов по передаче в собственность Иркутской области объектов недвижимости, трудно проверяемых из-за демонтажа большинства наземных строений. Из шести сопутствующих ликвидации объектов накопленного вреда пунктов, по сути декларативных, а также тринадцати пунктов «создания условий социально-экономического развития» не выполненными ГК «Росатом» до конца 2024 г. остались три основных: «строительство экотехнопарка по обращению с отходами I и II классов опасности», «работа с ртутьсодержащими отходами», «ввод экотехнопарка в эксплуатацию». Восемь пунктов ключевого раздела организации работ по ликвидации накопленного вреда можно считать определяющими, где частично локализована нефтяная линза и устроена противодиффузионная завеса вдоль берега Ангары, перезатарены емкости с опасными отходами, но в итоге не выполненным осталось «восстановление нарушенного состояния окружающей среды, в том числе ликвидация накопленного вреда», намеченное на конец 2024 г. Таким образом, спешно принятые поручения и распоряжения, не позволившие детально оценить объем планируемых работ и возможности исполнителей, дали результаты, существенно отличные от предполагаемых и исходно озвученных.

В период реализации перечисленных распоряжений ГК «Росатом» и входящее в его структуру предприятие «Федеральный экологический оператор» (ФЭО) инициировали в 2022 г. план создания на территории одного из семи в стране комплексов по переработке отходов I и II классов опасности, названного экотехнопарк «Восток» [Обосновывающая документация..., 2020], но большой производственно-технический комплекс не появился до настоящего времени. Следующим институциональным проектом, который декларировала ГК «Росатом» в конце 2022 г., стало объявление о создании Федерального центра химии [О разработке федерального ..., 2022], хотя его параметры продолжают обсуждаться [Иванова и др., 2024]. Одной из последних инициатив «Росатома», контролирующего территорию бывшего «Усольехимпрома» площадью в 610 га, стало включение города Усолья-Сибирского, якобы следуя указаниям власти, в атомные города страны, 28-м по счету, при этом не связанным с реализуемыми в стране атомными проектами, но с целью его социального развития [Усолье-Сибирское..., 2023]. Можно было бы не считать последний институциональный акт возможной экспансией ядерной энергетики на город, но появилась самая последняя инициатива ГК «Росатом». Речь идет о планируемой Сибирской атомной станции [Генеральная схема ..., 2024] и возможном ее размещении на рассматриваемой территории [Приложение № 4 ..., 2024]. Следует отметить, что строительство АЭС в самом обеспеченном электроэнергией регионе страны – Иркутской области – кажется малообоснованным. Таким образом, становится понятным, что ежегодными предложениями ведомственных инициативных проектов ГК «Росатом» пытается увести на второй план представление достоверной информации, непосредственно относящейся к путям ликвидации накопленного вреда и рекультивации территории, избежать обсуждения причин возникающих отклонений от их соответствия «дорожной карте», проведения анализа адекватности доступных корпорации технологий, их потенциальной способности к решению задач подобной сложности.

Рекультивация

Организация работ по ликвидации накопленного вреда на территории промышленной площадки «Усольехимпрома» и восстановление нарушенного состояния окружающей среды в общем случае можно назвать рекультивацией, что и предусматривалось правительственным распоряжением № 2819-р. Началу реализации мероприятий, в соответствии с пунктом 20, предшествовала разработка обосновывающей документации [Обосновывающая документа-

ция..., 2021], охватывающей территории городского округа г. Усолье-Сибирское, включенные в государственный реестр объектов накопленного вреда окружающей среде (ГРОНВОС) приказом Минприроды России от 29.07.2020 № 507. Перечислены подлежащие ликвидации 10 основных объектов: шламонакопитель, площадка производства жидкого хлора, производство эпихлоргидрина (цех 5001), установка размещения отходов производства эпихлоргидрина в отработанную соляную камеру скважины № Р-2х, площадка по производству ацетиленовой группы, корпуса цехов ртутного электролиза 2101 и 2102 как источники ртутного загрязнения, полигон ТКО, иловые карты, шламовая карта КОС-2, водозабор «Ангара». Дан перечень и кадастровые номера выявленных 95 мест загрязнений территории.

Независимые оценки проведенных к настоящему времени ФЭО и ГК «Росатом» работ содержатся в упомянутом выше отчете мэра города за 2024 г., из которого следует: «Рекультивация промышленной площадки «Усольехимпром» предусматривает демонтаж 368 зданий, сооружений и коммуникаций строительным объемом 6,1 млн м³, дробление образовавшихся после демонтажа строительных отходов с получением инертного материала, который будет использован для создания изолирующего слоя при рекультивации шламонакопителя», а также дана информация: «Выполнены следующие работы: вывезены с территории промплощадки и утилизированы отходы II-IV классов опасности в количестве 136,18 тонны, ранее перезатаренные из 17 аварийных емкостей; демонтированы 281 надземных и 329 подземных частей зданий; произведено дробление и перемещение на шламонакопитель для его рекультивации 532 тыс. тонн строительных конструкций от демонтажа зданий и сооружений». В отчете неопределенно упоминается наличие площадки нефтяной линзы и предусмотренное устройство противомиграционной фильтрующей завесы, обеспечивающей биодеструкцию нефтепродуктов.

Таким образом, можно заключить, что обозначенный в пунктах «дорожной карты» срок выполнения основных работ до конца 2024 г. не соблюдается, а уже сделанное к этому сроку составляет небольшую часть из запланированного, ведущего к восстановлению нарушенной окружающей среды. Демонтаж зданий и другие, технологически простые этапы не снимают вопроса о продолжении деятельности уже на этапе актуального и давно ожидаемого перехода к применению сложных технологий, до настоящего времени не прошедших испытаний на участках с распределенными по глубине в грунте отходов ртути различной концентрации. Предполагается, что извлечение и переработка отходов станет возможной после возведения и пуска большого производственно-технического комплекса «Восток». Поэтому на данном этапе трудно даже примерно оценить перспективы и конкретные даты окончания работ, о чем наверняка знают ее исполнители, а также надзорные природоохранные и властные органы.

Производственную деятельность, связанную с рекультивацией промышленной площадки бывшего «Усольехимпрома», можно рассматривать по аналогии с известными в микроэкономике внешними эффектами или экстерналиями, а также общественными благами, не отвечающими рыночным механизмам. В данном случае внешние эффекты и общественные блага связаны исключительно с государственной политикой, не считающейся с издержками. Декларируемая благоприятная окружающая среда на месте промплощадки в результате деятельности ГК «Росатом» относится к категории положительных внешних эффектов для их потребителя – населения города. Однако на настоящем этапе следует говорить о недостаточном уровне осуществляемых работ и низкой экономической эффективности использования на промплощадке доступных госкорпорации ресурсов даже в отсутствие рыночной конкуренции.

Подходящее для описываемой ситуации определение внешних эффектов может быть следующим: «Внешние эффекты – величина полезности или издержек, которые не отражены (неспецифицированы) в условиях контрактов» [Аузан и др., 2011]. Поэтому косвенно о полезности или издержках можно узнать как из условий самих контрактов, так и из результатов их исполнения. Из отчета мэра города за 2024 г., упоминаемого выше вместе с перечислением

выполненных работ, следует: «Между ФГКУ «Дирекция по ликвидации НВОС и ОБ ГТС полигона «Красный Бор» и ФГУП «ФЭО» заключены следующие государственные контракты № 1/2022ЕИ от 11.04.2022, № 3/2022ЕИ от 29.11.2022 на выполнение работ по ликвидации накопленного вреда окружающей среде на территории городского округа г. Усолье-Сибирское Иркутской области». В ежегодно публикуемых ФЭО «Отчетах по экологической безопасности» приводятся полные сведения о контрактах, где дополнительно указаны контракты: № 5/2020ЕИ от 27.11.2020, № 6/2020ЕИ от 27.11.2020. При этом в отчете за 2024 г. речь идет об условиях контрактов 2020 г. и 2022 г. [Отчет по экологической ..., 2024]. Нет информации о новых контрактах, направленных на реализацию ключевых пунктов «дорожной карты» с переходом к строительству и пуску экотехнопарка «Восток» для извлечения и последующей переработки ртутьсодержащих и других отходов I и II классов опасности, пусть и с выходом за пределы ранее запланированных сроков.

В складывающейся ситуации трудно сделать заключение о времени появления внешних эффектов, а также возможных вариантов интернализации, поскольку их позитивность может наступить только после полной ликвидации накопленного вреда и восстановления нарушенного состояния окружающей среды. Не следует забывать о паллиативе обсуждаемых внешних эффектов, связанном с проектом создания Федерального центра химии в Усолье-Сибирском, который «создаст около 10 000 рабочих мест в горизонте до 2035 года» [Иванова и др., 2024, с. 44]. Следуя логике авторов статьи, такой центр, планируемый на территории рекультивации, практически повторит структуру бывшего «Усольехимпрома» и занятость на нем населения города. Здесь настораживает отсутствие достоверных экономических оценок в предложениях по созданию Федерального центра химии. Сравнительно недавний опыт закрытия правительством страны в связи с банкротством производства поликристаллического кремния в Усолье-Сибирском (2005–2013 гг.) на дочернем предприятии «Усольехимпрома» – ООО «Усолье-Сибирский силикон» – и заводе «Нитол», финансово поддержанном госкорпорацией «Роснано» [Гадалова и др., 2010], по-видимому, не стал поучительным примером недооценки экономической конъюнктуры [НИТОЛ ..., 2025].

Планы ГК «Росатом», обладающей значительными ресурсами на уровне государственного ведомства и назначенной единственным оператором по ликвидации накопленного вреда бывшего «Усольехимпрома», обещающей оперативное решение системных проблем окончательной рекультивации территории, наряду с декларациями создания Федерального центра химии вызывают определенное недоверие. Достаточно вернуться к подобному проекту ГК «Росатом», так же единственного оператора по ликвидации накопленного вреда Байкальского целлюлозно-бумажного комбината, где из 14 карт-накопителей шламлигнина реальная работа ведется только на двух, хотя обсуждение доступных технологий переработки отходов продолжается [Воронов, 2022].

Реальная оценка складывающейся ситуации показывает, что в качестве экономической альтернативы подобной перспективы может быть, например, продолжение развития рекреационного направления, успешно реализуемого в городе.

Экономический потенциал города

Экономический потенциал Усо́лья-Сибирского можно представить в виде состояния ее основных секторов по известной с середины прошлого века модели Фишера, Кларка и Фурастье [Занадворов, Занадворова, 2003]. Первичный сектор, включающий как сельское хозяйство, так и добычу полезных ископаемых, определяется во многом географическим положением города, а в итоге не всегда отделен от вторичного сектора. Отсутствие занятых сельским хозяйством предприятий замещается практически неисчерпаемым ресурсом месторождения каменной соли в пределах города, составляющим историю его существования со времени возникновения.

В структуре промышленного производства, согласно отчету мэра города за 2024 г., на добычу полезных ископаемых приходится 33,3 %, на обрабатывающие производства

58,5 %, а на электроэнергию, водоснабжение, водоотведение, ликвидацию отходов и загрязнений – 8,2 % [Отчет мэра города ..., 2025]. При этом промышленное производство в структуре экономики города составляет 37 % в объеме выручки от реализации товаров и услуг, что можно считать суммарно приходящимся на первичный сектор с предприятием ЦДПС «Усолье» (Центр добычи и переработки соли), и вторичный сектор с АО «Усолье-Сибирский Химфармзавод», ООО «Усольмаш», ООО Горно-промышленная компания «Недра», ООО «Тимбер», ООО «Сарма Компани», АО «Усольские Мясопродукты» и другими. Численность работников в первичном и вторичном секторах, с учетом около 150 занятых в ЦДПС «Усолье» и около 5 000 на обрабатывающих производствах, позволяет отнести город в сложившейся экономике к типу постиндустриального общества [Кукушкин, 2020]. Позитивная тенденция развития секторов дополняется расположенными рядом с городом, хотя и в соседнем муниципальном образовании – Усольский район, крупными сельскохозяйственными предприятиями СХОАО «Белореченское» и СХПК «Усольский свинокомплекс».

Постиндустриальный город допускает наибольшую занятость населения в третичном секторе, до 70 %, что в Усолье-Сибирском представлено торговыми и финансовыми услугами, общественным питанием, бытовыми, транспортными, рекреационными услугами, административным управлением [Смирнов, Безвербный, 2022]. Сектор четвертичный принято определять экономикой знаний, образовательной средой, ее доступностью и качеством. В городе этот сектор обеспечивается техникумами сферы обслуживания, индустриальным, медицинским, педагогическим колледжами и филиалом Иркутского национального исследовательского технического университета, что полностью удовлетворяет потребности города и района.

Рекреация

История города Усолья-Сибирского всегда была связана не только с солеварением, традиции которого сохраняет крупнейшее в России предприятие по добыче, производству, реализации пищевой и технической соли ООО «Руссоль» [Руссоль ..., 2025], но и с лечебными свойствами соляных источников, на базе которых в середине XIX в. возник один из первых курортов Сибири, известный в наше время как санаторий «Усолье» [Шаманский, 2019]. Запасы соли здесь оцениваются в более 4 млрд т, содержание хлорида натрия (NaCl) в рассоле – 90,3–98,5 %.

В третичном секторе экономики этого среднего по показателям города рекреационно-туристские услуги находят вполне значимое место. Благодаря этому сектору Усолье-Сибирское избежало драматических трансформаций, связанных с закрытием градообразующих производств, также как, например, город Углич в Ярославской области, ставший впоследствии одним из лидеров по развитию туризма среди малых городов страны [Щегольков, Метелкина, 2017].

Согласно регулярно обновляемой классификации ОКВЭД (Общероссийский классификатор видов экономической деятельности), к предприятиям туристического сектора в городе можно отнести 25 со следующими видами прямых и косвенных услуг: размещения посетителей, общественного питания, туристических агентств, культурно-спортивно-зрелищных учреждений, а также санаторно-курортных. Всего в туристической индустрии занято 0,3 тыс. чел., или 2,5 % от общего числа занятых в третичном секторе. Основную долю занятых в организациях туристической индустрии составляют муниципальные учреждения культуры (58 %), однако отмечается вероятность недооценки численности персонала других индустрий в связи с неполным предоставлением сведений о занятости в органы учета. Значимый вклад вносит санаторно-курортная деятельность (25 % от занятых в сфере туризма). В целом вклад туристической индустрии в валовый городской продукт составляет 1,2 % [Оценка валового ..., 2023].

Рекреационно-туристское направление в деятельности администрации города находит свое подтверждение в проекте «Концепции туристического центра города Усолье-Сибирское» и недавно принятом постановлении об утверждении соответствующего перечня мероприятий [Об утверждении перечня ..., 2024]. Появление такой концепции является продолжением более чем десятилетней работы по обновлению и ремонту городской инфраструктуры общественных пространств, созданию новых локальных и линейных участков, обеспеченных современными формами пребывания жителей и гостей города, включая элементы доступной среды. В таблице приведены данные об основных городских проектах и сроках их реализации [Отчет мэра города ..., 2025].

Проекты благоустройства городской среды и сроки их реализации
Urban environment improvement projects and their implementation dates

№ п/п	Проект	Автор	Реализация
1	Вся соль Сибири: «Озеро Молодежное», связующее поколения (победитель Всероссийского конкурса проектов создания комфортной городской среды в 2020 г.)	Архитектурная мастерская MAD FOX, администрация города	2021 г.
2	Центральная улица вдоль трамвайных путей: «Концепция благоустройства ул. Интернациональной «Город из трамвайного окна» (победитель Всероссийского конкурса лучших проектов создания комфортной городской среды в 2022 г.)	Архитектурная мастерская MAD FOX, администрация города	2023 г.
3	Центральная улица вдоль трамвайных путей, второй этап: «Концепция благоустройства территорий улиц Менделеева и Интернациональная «Город из трамвайного окна 2: молекулярное наследие» (победитель Всероссийского конкурса лучших проектов создания комфортной городской среды в 2023 г.)	Архитектурная мастерская MAD FOX, администрация города	2024 г.
4	Промышленное наследие, объекты «Усольехимпром», «Спичечная фабрика» и другие, третий этап: «Город из трамвайного окна 3: промышленная симфония» (победитель Всероссийского конкурса лучших проектов создания комфортной городской среды в 2023 г.)	Архитектурная мастерская MAD FOX, администрация города	2025 г.
5	Формирование современной городской среды, проект «Народные инициативы: проспект Комсомольский, ул. Есенина, ул. Толбухина, ул. Ленина, ул. Дзержинского.	Администрация города	2018–2025 гг.

По сведениям администрации Усолья-Сибирского к началу 2025 г. город располагал коллективными средствами размещения, включающими 8 гостиниц, 4 хостела с 224 номерами и 438 местами. Санаторий «Усолье» кроме своих лечебно-оздоровительных функций владеет гостиницей на 38 номеров и 43 места, а также корпусом для собственных клиентов из 112 номеров на 213 мест, включая отдельные и сблокированные коттеджи. Система общественного питания – одна из самых подвижных в сфере среднего и малого бизнеса. По сведениям администрации Усолья-Сибирского к началу 2025 г. в городе насчитывалось 2 ресторана (общее число мест – 140), 38 кафе (1 800 мест), 1 кафетерий (8 мест), 25 закусочных (138 мест), 11 баров (512 мест, 6 заведений «на вынос»), 15 буфетов (170 мест) и работающих только в утреннее и дневное время 24 столовые, включая столовые учебных заведений (2 513 мест).

Таким образом, сложившееся рекреационно-туристское направление можно отнести к экономически состоятельному, обеспеченному заметной поддержкой администрации города в реализации проектов благоустройства общественных пространств.

Заключение

Обсуждение будущего города Усолья-Сибирского принято связывать с восстановлением химического производства, наряду с существующей добычей соли и санаторно-курортным комплексом. Инвестиционные проекты в рамках ТОСЭР дополняют в ограниченных масштабах развитие таких отраслей, как фармацевтика, металлургия, машиностроение, деревообработка. Планы ГК «Росатом», связанные с относительно «простыми и быстрыми» решениями многолетних системных проблем окончательной рекультивации территории, наряду с декларациями создания Федерального центра химии вызывают определенное недоверие. Сходный по сложности проект ГК «Росатом» как единственного оператора по ликвидации накопленного вреда Байкальского целлюлозно-бумажного комбината привел к ситуации, когда из 14 карт-накопителей шлам-лигнина реальная работа ведется только на двух, хотя обсуждение доступных технологий переработки отходов продолжается. Поэтому содержание «дорожной карты» из правительственных распоряжений пятилетней давности по итоговой рекультивации территории накопленного вреда бывшего «Усольехимпрома», судя по темпам ее реализации, нуждается если не в кардинальном пересмотре, то возможно в подключении других исполнителей или существенной корректировке.

Патерналистская практика деятельности ГК «Росатом» в зонах экологических проблем и бедствий на бывших промышленных территориях практически не опирается на экономический и человеческий ресурс городов, таких как Усолье-Сибирское или Байкальск. Можно только предположить, что предоставление возможности городам самостоятельного выбора средств и путей ликвидации накопленного вреда и рекультивации при том же доступе к финансовым ресурсам оказалось бы намного эффективнее политизированного ведомственного подхода к решению задачи. Становится очевидным отсутствие у ГК «Росатом» адекватных поставленным задачам надежно отработанных технологий извлечения и переработки отходов, как следует из практики Усолья-Сибирского и Байкальска, вероятно, в силу профессиональной специфики. Кажется недостаточно оправданным реализация проекта по созданию Федерального центра химии.

В складывающейся экологической ситуации вокруг города Усолья-Сибирского в последнее десятилетие, включая введение режима ЧС в ноябре 2018 г., последующие президентские поручения и правительственные распоряжения по ликвидации накопленного вреда на территории бывшего «Усольехимпрома», администрация города формально оказывалась в стороне от принимаемых властных решений в виде «дорожной карты», где ей отводилась вспомогательная роль «сопровождения и обслуживания» деятельности единственного исполнителя работ по восстановлению нарушенной окружающей среды. Подобное сопровождение сохраняет за администрацией ответственность за все, что происходит на промплощадке, располагающейся в границах городского округа. Мероприятия с номерами 13–18 «дорожной карты», связанные с земельными отношениями, исполнение которых возложено на Правительство Иркутской области, вполне допускают фиксацию и формирование земельных участков, изъятие земель промышленного назначения из территории округа и передачи иным собственникам и арендаторам. Тем не менее, земли промплощадки являются федеральной собственностью, средства на рекультивацию и развитие субсидируются через федеральный бюджет и структуру федерального уровня (ГК «Росатом»). Очевидно, что бессистемность земельных отношений негативно влияет на перспективы развития города. Одним из логичных вариантов решения этой проблемы могло бы стать отделение промышленной площадки от пространства города как территории с федеральным статусом.

Важно отметить, что именно в эти годы администрация города продолжала сохранять свою социальную эффективность с акцентом на ресурсы саморазвития, как это видно, например, по отчетам мэра города. Давление политических институтов федерального и

регионального уровней удавалось удачно трансформировать в дополнительные ресурсы на социальные нужды и благоустройство дворовых, уличных, спортивных и общественных пространств. Администрация города постоянно подчеркивала позитивное отношение к ежегодным инициативам ГК «Росатом», не отдавая предпочтение деятельности, обобщенно называемой рекультивацией, перед не менее важной для жителей деятельностью, условно называемой рекреацией. Таким образом, продолжение правильного позиционирования городских властей по отношению к условной границе между рекультивацией и рекреацией должно позволить в будущем оптимальным образом использовать возможности развития и повышения уровня жизни населения, независимо от пока еще несостоявшихся внешних эффектов и их интернализации.

Список источников

- Аузан А.А., Дорошенко М.Е., Иванов В.В., Елисеев А.Н., Калягин Г.В., ... Шульга И.Е. 2011. Институциональная экономика: новая институциональная экономическая теория. М., ИНФРА-М, 446 с.
- Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2042 года: Распоряжение Правительства РФ № 4153-р от 30.12.2024. Электронный ресурс. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/411153731/> (дата обращения: 12.07.2025).
- Занадворов В.С., Занадворова А.В. 2003. Экономика города. М., Академкнига, 267 с.
- Кушниренко А. 2020. Что известно об экологических проблемах в Усолье-Сибирском. Электронный ресурс. URL: <https://tass.ru/obschestvo/9146523> (дата обращения: 12.07.2025)
- Мамонтова Ю. 2018. «Ящик Пандоры» усольской промплощадки пора закрыть. Электронный ресурс. URL: <https://www.ogirk.ru/2018/08/01/yashhik-pandory-usolskoj-promploshhadki-pora-zakryt/?ysclid=mcud1423tv774786751> (дата обращения: 12.07.2025)
- НИТОЛ. Усольехимпром. Поликремний. 2025. Электронный ресурс. URL: http://irkipedia.ru/content/nitol_usolehimprom_polikremniy (дата обращения: 12.07.2025)
- О мерах по предупреждению и устранению загрязнения окружающей среды на территории городского округа г. Усолье-Сибирское Иркутской области: Распоряжение Президента РФ № 189-рп от 30.07.2020. Электронный ресурс. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565414541?ysclid=mtn3mmzchk467253193> (дата обращения: 12.07.2025)
- О разработке федерального проекта «Создание Федерального центра химии в Усолье-Сибирском» (Иркутская область): Поручение Заместителя Председателя Правительства Российской Федерации – Министра промышленности и торговли Д.В. Мантурова № МД-П9-16735 от 5.10.2022.
- О создании территории опережающего социально-экономического развития «Усолье-Сибирское»: Постановление Правительства РФ № 135 от 26.02.2016.
- Об определении единственного исполнителя осуществляемых Минприроды России закупок работ, связанных с выполнением комплекса неотложных мер, направленных на приведение в безопасное состояние объектов, расположенных на территории городского округа г. Усолье-Сибирское Иркутской области и подвергшихся загрязнению в результате экономической деятельности, связанной с производством химической продукции: Распоряжение Правительства РФ от 21.08.2020 № 2149-р. Электронный ресурс. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565591811?ysclid=mtn2zn0qls551752389> (дата обращения: 12.07.2025).
- Об утверждении перечня мероприятий проекта «Концепция туристического центра города Усолье-Сибирское»: Постановление администрации города Усолье-Сибирское № 1753-па от 13.06.2024.
- Об утверждении плана мероприятий ("дорожной карты") по предупреждению и устранению загрязнения окружающей среды на территории городского округа г. Усолье-Сибирское Иркутской области в результате экономической деятельности, связанной с производством химической продукции» (с изменениями на 21 июня 2024 года): Распоряжение Правительства РФ № 2819-р от 29.10.2020. Электронный ресурс. URL:

- <https://meganorm.ru/Data2/1/4292850/4292850214.htm?ysclid=mtn3bmkmrf489878332> (дата обращения: 12.07.2025)
- Обосновывающая документация по объекту. 2020. Производственно-технический комплекс по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов I и II классов опасности «Восток». Электронный ресурс. URL: https://rosatom-rei.ru/wp-content/uploads/2020/11/Ob_doc.pdf?ysclid=mcj91zv6tv877997401 (дата обращения: 12.07.2025).
- Обосновывающая документация по объекту. 2021. «Выполнение работ по проектированию ликвидации накопленного вреда окружающей среде на территории городского округа Усолье-Сибирское Иркутской области». Электронный ресурс. URL: <https://rosfeo.ru/assets/lib/767/od.pdf?ysclid=mcj5y4ye12769030626> (дата обращения: 12.07.2025).
- Отчет мэра города Усолье-Сибирское о результатах своей деятельности, о результатах деятельности администрации города и иных подведомственных ему органов местного самоуправления, о социально-экономическом положении города, в том числе о решении вопросов, поставленных Думой, за 2024 год: Решение Думы города Усолье-Сибирское № 34/8 от 29.05.2025. Электронный ресурс. URL: <https://usolie-sibirskoe.ru/mer/otchety-mera> (дата обращения: 12.07.2025)
- Отчет по экологической безопасности за 2024 год. Федеральное государственное унитарное предприятие «Федеральный экологический оператор». 2024. М., ГК «Росатом», ФГУП «ФЭО», 48 с.
- Оценка валового городского продукта г. Усолья-Сибирского. 2023. Электронный ресурс. URL: https://docs.google.com/document/d/1qpjluq8rUVg9rObNjYQkzvir9Jr15_meB5z6yKFcw/edit?tab=t.0 (дата обращения: 12.07.2025).
- Официальный сайт города Усолье-Сибирское. Электронный ресурс. URL: <https://usolie-sibirskoe.ru/arh/territorialnoe-planirovanie> (дата обращения: 12.07.2025).
- Перечень поручений по итогам совещания об экологической ситуации в Усолье-Сибирском: Распоряжение Президента РФ № Пр-1210 02.08.2020. Электронный ресурс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_359037/ (дата обращения: 12.07.2025)
- Приложение № 4 к Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики до 2042 года». Перечень планируемых к строительству и вводу в эксплуатацию атомных электростанций (Сибирская АЭС, Иркутская область): Распоряжение Правительства РФ № 4153-р от 30.12.2024. Электронный ресурс. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/411153731/> (дата обращения: 12.07.2025)
- Руссоль – крупнейший производитель соли в России. Электронный ресурс. URL: <https://russalt.ru> (дата обращения: 12.07.2025).
- Усолье-Сибирское включили в список атомных городов России. 2023. Областная газета, 06.03.2023. Электронный ресурс. URL: <https://www.ogirk.ru/2023/03/06/usolie-sibirskoe-vkljuchili-v-spisok-atomnyh-gorodov-rossii/?ysclid=mcifautty1670042367> (дата обращения: 12.07.2025).
- Численность постоянного населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2025 года. Электронный ресурс. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (дата обращения: 12.07.2025).

Список литературы

- Воронов Ю.П. 2022. Сотрудничество как лучший способ конкуренции (на примере исследований и проектов по экологии Байкала). ЭКО, 8: 54–66.
- Гадалова О., Котенко А., Кравченко А., Миркурбанов Х., Одинокое В. 2010. Создание производства поликристаллического кремния электронного качества из моносилана. Промышленные нанотехнологии, 1: 4–8.
- Иванова У.С., Зворыкина Ю.В., Василькова М.В., Олейник А.В. 2024. Принципы приращения национального благосостояния на примере разработки Федерального центра химии в г. Усолье-Сибирское. Прогрессивная экономика, 1: 32–54. https://doi.org/10.54861/27131211_2024_1_32
- Кукушкин С.Н. 2020. Четырехсекторная модель экономики. Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, 1(1): 25–31. <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2020-1-25-31>

- Смирнов О.О., Безвербный В.А. 2022. Потенциал развития секторов экономики малых городов России: современные тенденции. Социум и власть, 1(91): 62–74. <https://doi.org/10.22394/1996-0522-2022-1-62-74>
- Шаманский С.В. 2019. Город, рожденный у соли: очерки истории города Усолье-Сибирское, 1669–1945 гг.: 350-летию города посвящается. Иркутск, Оттиск, 207 с.
- Щегольков Ю.Ю., Метелкина П.В. 2017. Развитие туризма в малых городах России. Мир новой экономики, 11(1): 86–91.

References

- Voronov Yu.P. 2022. Cooperation as the Best Way to Compete (Based on Research and Projects on Baikal Ecology). ECO, 8: 54–66 (in Russian).
- Gadalova O., Kotenko A., Kravchenko A., Mirkurbanov Kh., Odinkov V. 2010. Sozdanie proizvodstva polikristallicheskogo kremniya ehlektronnogo kachestva iz monosilana [Production of Electronic-Grade Polycrystalline Silicon from Monosilicon]. Promyshlennye nanotekhnologii, 1: 4–8.
- Ivanova U.S., Zvorykina Yu.V., Vasilkova M.V., Oleinik A.V. 2024. Principles of Improving National Welfare by the Example of Project Development of the Federal Center of Chemistry in Usolye-Sibirsky. Progressivnaya ekonomika, 1: 32–54 (in Russian). https://doi.org/10.54861/27131211_2024_1_32
- Kukushkin S.N. 2020. Four-Sector Model Economy. Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics, 1(1): 25–31 (in Russian). <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2020-1-25-31>
- Smirnov O.O., Bezverbny V.A. 2022. Potential for Developing Sectors of the Economy of Small Cities in Russia: Modern Trends. Society and Power, 1(91): 62–74 (in Russian). <https://doi.org/10.22394/1996-0522-2022-1-62-74>
- Shamanskiy S.V. 2019. Gorod, rozhdeniy u soli: ocherki istorii goroda Usolye-Sibirskoe, 1669–1945 gody: 350-letiyu goroda posvyashchaetsya [A City Born Near Salt: Essays on the History of Usolye-Sibirskoye, 1669–1945: Dedicated to the 350th Anniversary of the City]. Irkutsk, Publ. Ottisk, 207 p.
- Shehegol'Ko Yu.Yu., Metelkina P.V. 2017. Development of Tourism in Small Towns of Russia. The world of new economy, 11(1): 86–91 (in Russian).

*Поступила в редакцию 07.10.2025;
поступила после рецензирования 14.01.2026;
принята к публикации 11.02.2026*

*Received October 07, 2025;
Revised January 14, 2026;
Accepted February 11, 2026*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Калихман Татьяна Петровна, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории устойчивого развития Байкальского региона, ФИЦ «Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского СО РАН», Иркутск, Россия

Калихман Аркадий Давидович, доктор физико-математических наук, профессор, внештатный научный сотрудник научного отдела, ФГБУ «Заповедное Прибайкалье», Иркутск, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatyana P. Kalikhman, Doctor of Science (Geography), Leading Researcher at the Baikal Region Sustainable Development Laboratory, Federal Research Center "A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences", Irkutsk, Russia

Arkady D. Kalikhman, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Freelance Researcher of the Scientific Department, Federal State Budgetary Institution "Zapovednoye Pribaikalie", Irkutsk, Russia

УДК 379.85
DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-3-694-706
EDN WBWWTV

Ювелирный туризм: дестинации России и мира

Сарафанов А.А., Сарафанова А.Г.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Россия, 199991, Москва, Ленинские горы, 1
alexsarafanov@mail.ru, anastasyast@yandex.ru

Аннотация. Авторами подчёркивается важность развития внутреннего вида туризма: ювелирного. В горных и предгорных районах России есть потенциал для развития не только горнолыжного, экологического, геммологического, но и ювелирного вида туризма. Он ориентирован на энтузиастов и ценителей драгоценных камней, стремящихся изучить их, побывать в шахтах и рассмотреть процесс огранки. Цель статьи: изучить ювелирный туризм и потенциал территорий для ювелирных туров. Задача: изучить возможность диверсификации туристского потока, используя эмоциональную составляющую тура. Анализируя поисковые данные, авторы приводят определение ювелирного туризма, описывают его взаимосвязь с геотуризмом и геонаследием. Актуальность исследования обосновывается необходимостью систематизации информации по ювелирному туризму как немассовому эксклюзивному виду туризма. В статье рассмотрены примеры зарубежных ювелирных дестинаций и территория России, обладающая соответствующими туристскими ресурсами.

Ключевые слова: ювелирный туризм, геммологический туризм, драгоценные камни, месторождение, ювелирный тур, геотуризм

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания географического факультета и НИР «Географические технологии комплексного освоения и устойчивого развития туристско-рекреационного пространства регионов России и мира в условиях глобальных изменений» в МГУ имени М.В. Ломоносова.

Для цитирования: Сарафанов А.А., Сарафанова А.Г. 2026. Ювелирный туризм: дестинации России и мира. Региональные геосистемы, 50(3): 694–706. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-694-706
EDN: WBWWTV

Jewelry Tourism: Destinations in Russia and Worldwide

Alexander A. Sarafanov, Anastasiya G. Sarafanova

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, Moscow 199991, Russia
alexsarafanov@mail.ru, anastasyast@yandex.ru

Abstract. The authors emphasize the importance of developing jewelry tourism as a domestic tourism category. Russia's mountainous and foothill regions offer potential for developing not only skiing, ecotourism, and gemological tourism, but also jewelry tourism. This type of tourism appeals to enthusiasts and connoisseurs of precious stones who seek to study them, visit mines, and observe the cutting process. The study aims to reveal jewelry tourism and the potential of these regions for jewelry tours. The objective is to explore the possibility of diversifying tourist flows by leveraging the emotional component of tours. Analyzing research data, the authors provide a definition of jewelry tourism and describe its relationship with geotourism and geoheritage. The relevance of the study is justified by the need to systematize information on jewelry tourism as a non-mass, exclusive type of tourism. The article examines examples of international jewelry destinations and Russian territories with relevant tourism resources.

Keywords: jewelry tourism, gemological tourism, precious stones, deposits, jewelry tours, geotourism

Acknowledgements: the research was carried out within the framework of state assignment to the Faculty of Geography and under the research project "Geographical technologies for the integrated development and sustainable development of the tourist and recreational space of the regions of Russia and the world in the context of global changes" at Lomonosov Moscow State University

For citation: Sarafanov A.A., Sarafanova A.G. 2026. Jewelry Tourism: Destinations in Russia and Worldwide. Regional Geosystems, 50(3): 694–706 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-694-706 EDN: WBWWTV

Введение

Нескончаемый поток информации, навязчивая агрессивная реклама, обычные туры с массовым спросом и другие факторы делают потенциального потребителя невосприимчивым к большинству предложений. Туристские дестинации ищут альтернативы, чтобы уйти от «серийного производства» туристских продуктов и услуг [Richards, Wilson, 2006]. Ювелирный туризм как своеобразный нишевый вид туристской отрасли способствует получению несоизмеримых впечатлений. Процесс добычи драгоценных камней, спуск в шахты, процесс огранки и производства украшения в купе с легендами и историями формируют целую экономику потребительского опыта. Ювелирное ремесло становится не просто деломпроизводством, а ресурсом туристского интереса. В целом ювелирный туризм строится вокруг желания роскоши, благополучия, отрыва от реальности. Эти свойства позволяют рассматривать его с позиции «экономики впечатлений» [Pine, Gilmore, 1999]. Потребитель «...испытывает страсть к впечатлениям и руководствуется количеством позитивных эмоций...» [Александрова, 2015], а ювелирный туризм – это эмоции зрительного восприятия и пример того, как желание увидеть/изучить украшения превратилось в вид туризма.

Александрова А.Ю. [2015] пишет о классификации туристского опыта, где выделяет эмоциональный, сенсорный, поведенческий и когнитивный опыт. Если применить эту градацию к ювелирному туризму, мы получим:

- эмоциональный – прекрасное настроение от увиденной красоты минералов, эстетические чувства;
- сенсорный – ощущение «примерить на себя»;
- поведенческий – реализация на практике, возможность погрузиться в среду ювелирного дела (посещение месторождений, мастер-классы огранки);
- когнитивный – получение информации из экскурсий или самостоятельного изучения.

Авторы Н.Б. Беленкова, А.Б. Елина, О.А. Лях говорят о минералогическом туризме – посещение геологических и спелеологических объектов, заброшенных шахт, предприятий по добыче твердых полезных ископаемых и производству изделий из добываемых материалов. Однако существенное отличие заключается в самостоятельной добыче минералов туристами [Котова, Шипшинская, 2017]. По мнению авторов, минералогический туризм – это составная часть ювелирного.

Геммологический туризм включает посещение месторождений камнесамоцветного сырья, их изучение, возможный сбор как драгоценных, так и полудрагоценных камней. Ювелирный же туризм – это путешествие в места происхождения минералов и драгоценных камней, в места огранки и производства ювелирных изделий, в музеи ювелирного искусства, на выставки, ярмарки, конференции.

Объекты и методы исследования

В процессе работы над статьёй авторами использовались такие методы как: анализ, синтез, обобщение. В работе использовались научные труды как отечественных, так и зарубежных ученых. Объект исследования – ювелирный туризм. Практическая значимость состоит в анализе ювелирного туризма как одного из нишевых видов туризма. Научная новизна исследования заключается в подробном рассмотрении дестинаций развития ювелирного туризма с целью диверсификации туристского потока, а также вызвана отсутствием достаточных исследований на эту тему. В виде схемы представлена концепция гео- и горнодобывающего наследия, в том числе ювелирного. Рассмотрены примеры сохранения геологических объектов в рамках развития геотуризма в Мексике, Бразилии. Подробно изучены Бразилия (туры в Музеи с голубым турмалином Параиба, ювелирный шоппинг бренда *H.Stren*), Португалия, Иран, Австралия, Танзания, Финляндия, Шри-Ланка, ЮАР и другие направления. В России точками притяжения ювелирных туристов стали: Калининградская, Костромская, Архангельская, Иркутская, Владимирская и другие области, Республика Саха (Якутия), Уральский федеральный округ, Москва и Санкт-Петербург. Авторами выделены виды туризма, связанные с ювелирной отраслью, способные пробудить и удовлетворить эмоциональные запросы потребителей.

Результаты и их обсуждение

Авторы придерживаются трактовки понятия ювелирный туризм, данной Л.С. Тимофеевой, А.А. Стрельниковой, Ф.Г.Вагаповой [2019, с. 81] «это путешествия, совершаемые на месторождения минералов и драгоценных металлов, в места производства и продажи ювелирных изделий, в учреждения, занимающиеся сбором, хранением, изучением и экспонированием предметов ювелирного искусства с познавательными и/или деловыми целями».

Часто встречаемое понятие Бриллиантовые туры – посещение ювелирных предприятий, специализирующихся на огранке камней, а также вероятная последующая покупка драгоценных украшений.

Л.С. Тимофеева и другие [2019] выделяют культурно-познавательную и деловую формы ювелирного туризма. По составу путешественников подразделение идёт на исследователей и профессионалов, соответственно.

Посещение шахт носит типичный геотуристический характер. Геотуризм на горнодобывающих объектах сложен, поскольку шахты обычно находятся в отдалённых районах, шумные, лишены удобств и, возможно, загрязняют окружающую среду.

Геологические объекты, найденные в результате горнодобывающей деятельности, вносят культурный вклад в район добычи. Их нельзя понимать исключительно как геообъекты или места добычи полезных ископаемых; скорее, их следует рассматривать как целостный ландшафт геодобычи полезных ископаемых (рис. 1), охватывающий как природные, так и культурные элементы.

С.D. Prosser [2018] подчёркивает, что добыча полезных ископаемых, несмотря на то, что приводит к утрате георазнообразия и геонаследия, представляет собой уникальную возможность открыть «окна» в затемнённую геологию.

С утилитарной точки зрения, взаимоотношения в контексте добычи полезных ископаемых обеспечивают людей минеральными, драгоценными ресурсами и приносят экономические и социальные выгоды. Горнодобывающим предприятиям стоит выделять ресурсы на компенсацию ущерба окружающей среде, что может быть достигнуто путём поддержки геоконсервации, геотуризма и геопарков.

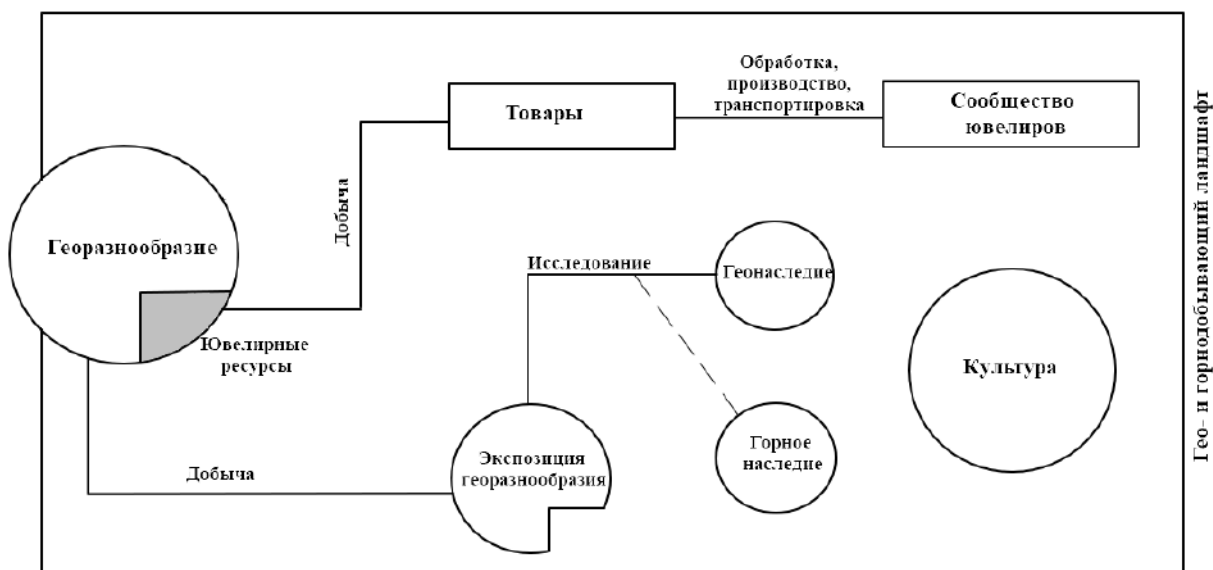


Рис. 1. Концепция гео- и горнодобывающего наследия, в том числе ювелирного. Источник: составлено авторами
Fig. 1. The concept of geological and mining heritage, including the jewel one

Например, в геологическом парке «Комарка Минера» (Мексика) находится район добычи серебра, Пачука-Реаль-дель-Монте, слава которого зародилась ещё в XVI веке. Минеральные жилы и залежи обсидиана, изначально обеспечивавшие этому региону стратегическую экономическую и военную мощь, теперь стали ресурсом для геообразования и геотуризма [Cruz-Pérez et al., 2017].

Другим примером сохранения геологических объектов горнодобывающей промышленности являются методы работы на территориях старых карьеров в штате Сан-Паулу в Бразилии. Эти геообъекты находятся под защитой государства как муниципальные геологические парки [Carneiro, 2016]. Другие территории, не используемые в качестве геологических объектов, представлены в реестре маршрутов старых разведочных работ на россыпное золото и алмазы в шахте Шапада (*Chapada*).

Город Ору-Прету, штат Минас-Жерайс, юго-восток Бразилии, признанный «Старой горнодобывающей деревней», известный золотодобычей, которая создала и развила весь регион штата. Это был один из важнейших бразильских городов XVIII века и первый город, включённый в Список всемирного наследия ЮНЕСКО [Cavalcanti et al., 2023].

Месторождение Ашуде-Бокейран служит международной научной лабораторией для геологических наук. В нескольких музейных экспозициях представлены минералогические образцы с этого месторождения, как, например, в Музее естественной истории в Лондоне, где представлена коллекция драгоценных камней королевы, включая голубой турмалин Параиба [Dos Santos Costa et al., 2024]. Ювелирный тур по Бразилии включает посещение изумрудных и аметистовых шахт, месторождений турмалина Параиба (довольно редкий минерал). Здесь можно посетить ресторан, расположенный в заброшенном аметистовом стволе и зайти в местную церковь, стены и алтари которой сделаны из аметиста.

В Бразилию туристы едут за ювелирным шоппингом, за брендом украшений *H. Stren*. Сейчас почти в каждом отеле Южной Америки есть бутик этого бренда, хотя когда-то основатель компании продавал свои украшения под стенами гостиниц. Культурные центры *H. Stren* в месяц посещают более 10 тыс. чел., реализована возможность наблюдения за работой ювелиров.

Золотоносное месторождение Сан-Мартинью (северная зона Осса-Морена, Португалия) имеет два типа рудных парагенезисов, связанных с месторождением золота, каждый из которых обладает специфическими морфологическими и термическими характеристиками [De Oliveira et al., 2001].

Иран обладает большим количеством действующих и заброшенных шахт, а также обширными геолого-геоморфологическими, историческими и культурными явлениями, что обеспечивает огромный потенциал для ювелирного туризма, развития сельских районов и регионов. Иранская горнодобывающая промышленность переживает период бума в плане инвестиций в геологоразведку, расширения действующих шахт и открытия новых [Ghazi et al., 2021].

В Австралии в заброшенный карьер добычи опалов Лунатик-Хилл организованы туры: возможен спуск в шахты, мастер-класс полировки опала. Кроме того, в июле проходит Опаловый фестиваль, посвященный драгоценным камням и шахтёрам.

Танзанит добывается исключительно в Танзании, на плато Мерелани. Ювелирный тур можно совместить с экологическим и горным, так как плато находится близко от национального парка Аруша и от горы Килиманджаро. Турист может спуститься в шахту на глубину 1 км и увидеть всю используемую машинную технику и рабочих.

Рудник «Лампиваара» в Финляндия функционирует только для туристов. Здесь посетители могут сами искать минералы, а если найдётся аметист, то забрать его с собой бесплатно. И такие раскопки месторождений аметиста оказались гораздо выгоднее промышленного производства [Аметистовый рудник «Лампиваара»..., 2025].

На острове Ратнапура (Шри-Ланка) добывается звёздчатый сапфир. Стоит отметить ручной сбор сапфиров, что заслуживает отдельного внимания. Шахты 30 м глубиной, тоннели в сотни метров открыты для туристов. Рядом с государственными шахтами открыты фабрики (несколько человек, которые на глаз определяют, как обработать камень) для посещения туристов с возможностью увидеть процесс огранки. В ювелирный тур можно включить сафари по национальным паркам, водопадам и подъём на Пик Адама. Так же здесь можно приобрести синий сапфир, стоимость карата около 150 долларов США, что в 5 раз ниже, чем в России.

ЮАР, главный поставщик алмазов, с радостью встречает туристов на Куллинанском алмазном руднике, где в 1905 году нашли 621-граммовый алмаз – самый большой и дорогой в мире [Роман с камнем:..., 2025].

В музее им. Гарри Опенгеймера в Израиле представлены копии наиболее известных бриллиантов в мире, в рамках экскурсий рассказывают о ценообразовании стоимости бриллиантов, об отличиях оригиналов и подделок, об истории развития обработки алмазов, в том числе показывают процесс.

Посетить музей серебра и совершить ювелирный тур стоит в город Таско, Латинская Америка. Это «серебряный» город, своё название он получил не просто так: все жители, живущие здесь заняты серебряным промыслом от добычи до создания украшений.

В Колумбии в поездку лучше отправить через туркомпанию, тогда удастся посетить сразу три изумрудные шахты: «Мусо», «Коскес», «Чивор».

Женева – уголок часовых механизмов, из-за запрета носить ювелирные украшения после XVI века именно часы украшают золотом и драгоценными камнями.

Нью-Йорк и прогулка по кварталу *Diamond District*, полностью посвящённый ювелирному мастерству. Здесь так же сосредоточены винтажные украшения. Эта улица снята в фильме «Неограниченные драгоценности» (2019 г.), что говорит о пересечении кино- и ювелирного туризма.

Индия, Джайпур, и переливающаяся палитра камней (изумруд, рубин, сапфир). Каждый магазин – это мини-мастерская, где турист может увидеть работу мастера.

Создаются великолепные разноцветные украшения, а также традиционные индийские изделия – джадау.

Чехия и её чешский гранат, добыча которого ведется с VI века. В городе Турнов расположен Центр граната, при нем находится музей и сюда реализуются ювелирные туры. В 2009 году подобный музей появился в Праге, туристам доступен поиск граната в специально приготовленной песочной смеси.

Район Дера Дубая знаменит золотым рынком Gold Souk, но кроме покупки, здесь можно увидеть одежду из золота, старинные нагрудные украшения и *Najmat Taiba* – «Звезду Таиба».

Некоторые шахты мира, такие как рудник Бингем-Каньон в штате Юта, который является крупнейшей рукотворной выработкой и самой глубокой открытой шахтой в мире, подземные шахты *Queen Coal* и *Pioneer*, соляные шахты *Psychedelic* в России, шахты *Barton Garnet* в Нью-Йорке и соляная шахта *Salina Turda* в Румынии, привлекают множество геотуристов. Серебряный рудник *Sala* в Швеции известен как самый глубокий отель в мире.

Это лишь некоторые примеры любопытных и необычных ювелирных направлений, кроме того проходят международные тематические выставки. В Италии в городе Виченце проходит выставка *Vicenza Oro*, охватывающая 145 стран. Азиатская ярмарка *Asia's Fashion Jewellery & Accessories Fair* проходит три раза в год, на ней можно увидеть модные ювелирные украшения и аксессуары, которые вскоре появятся в магазинах. Проходит 3 раза в год, поток свыше 100 тыс. чел. каждый раз. *Hong Kong Fashion Jewellery & Gem Fair* вторая масштабная международная выставка в Гонконге (два раза в год).

Стоит рассмотреть места притяжения ювелирного туризма и в Российской Федерации (рис. 2).



Рис. 2. Карта-схема регионов РФ, на территории которых реализуются ювелирные туры
Источник: составлено авторами

Fig. 2. Schematic map of the regions of the Russian Federation where jewelry tours are offered
(Compiled by the authors)

Калининград по праву стоит назвать сердцем добычи янтаря. Изначально его собирали вручную после сильных бурь, в XIX веке добыча стала вестись в промышленных масштабах. В музее янтаря в области проводят экскурсии и мастер-классы, а также художественные выставки, где художники применяют янтарь в своих работах. Здесь сувениры из янтаря можно купить почти везде. В Литве летом пользуется популярностью маршрут «Янтарный путь»: посещение музея, залива Юодкранте, этнографической деревни Каркле (туристам разрешён поиск литовского золота), янтарных мастерских города Паланги. С 2009 года в этом городе проходит событие «Янтарные выходные» – своего рода чемпионат по сбору янтаря, конкурсы по изготовлению и прочее. Все ювелирные туры в Калининградскую область включают визит Янтарного комбината, смотровую площадку Приморского карьера. В рамках тура или экскурсии можно посидеть на «янтарном троне», примерив историческую одежду. Еще в 2018 году годовой поток туристов на комбинат был свыше 100 тыс. чел., сейчас эта цифра выше 200 тыс. чел.

Костромская область известна брендом «Золотое Красноселье». Каждый год проходит фестиваль «Золотое кольцо России». Это сочетание и событийного и ювелирного туризма [Барков, 2018]. Кроме того, разработан и реализуется маршрут «Кострома – ювелирная столица России». При заводе «Красносельский ювелирпром» проводятся экскурсии и мастер-классы от эскиза ювелирного украшения до готового изделия. В 2010 году здесь создан ювелирный кластер, объединивший 24 организации [Стрельникова, 2021].

На Урале сформировался своеобразный бренд территории, связанный с ювелирным и камнерезным искусством. Здесь проходят международные выставки-ярмарки, сосредоточены специализированные музеи, проводятся конференции и мастер-классы и иные событийные мероприятия. Уральский туристический геммологический потенциал уникален, ему нет равных в мире, здесь добывают практически все драгоценные камни и металлы, за исключением ювелирной бирюзы [Беленков, 2012]. Геодезические изменения эпохи палеозоя привели к формированию здесь множества уникальных камней, многие разновидности которых не встречаются больше нигде на планете. Благодаря Уралу Россия не уступает Европе в создании превосходных украшений. По Уральскому федеральному округу реализуется около 50 ювелирных туров. В Челябинской области в «Русской Бразилии» находится шесть действующих месторождений от кварца до граната. Крупнейшее месторождение пьезокварца – Астафьевское, открыто для туристов, желающих поискать минералы. Коркинский каменноугольный разрез содержит россыпи тёмных самоцветов. На месте современного г. Березовский (окрестности Екатеринбурга) еще в 1745 году было открыто месторождение золота [Сарайкина, Сотова, 2020]. За 280 лет построено более тысячи шахт. Музей золота был создан в 1970 году, туристы могут увидеть «богатейшую коллекцию минералов Березовского золоторудного месторождения и образцов золотосодержащих пород» [Данилевский, 1959]. Проект «Самоцветное кольцо Урала» – Екатеринбург, Реж, Малышево, Мурзинка. Для Свердловской области, Екатеринбурга и других муниципальных образований геолого-минералогический туризм может считаться основой для развития туристической отрасли.

В Якутию организованы бриллиантовые туры, причем тур будет бесплатным при условии покупки украшений на сумму свыше 200 тыс. руб. Однако, сам трансфер до Якутии стоит прилично, что позволяет говорить о турах «люкс», а суровые климатические условия в купе с отсутствием инфраструктуры не позволяют формировать постоянный туристский спрос. В республике сосредоточены месторождения аметиста, кварца, шпинели, изумруда. Малонахотское месторождение одно из посещаемых туристами, так как рядом база отдыха «Нахот» с термальными водами [Афанасьева, Иванова, 2018]. В Якутии функционирует алмазно-бриллиантовый кластер, включающий в себя предприятия по добыче алмазов и золота, алмазообрабатывающее и ювелирное производство, сбытовые сети. Регион имеет экспортные возможности поставки бриллиантов и ювелирной продукции [Неустроев, 2011]. Дальневосточный регион является лидером по добыче алмазов (26 % в мире и 95 % в России).

В Архангельской области стоит выделить месторождение алмазов имени Ломоносова, но предприятие Севералмаз закрытое, с опасным производством и не занимающееся туристской деятельностью. Так что попасть можно в ближайший посёлок алмазодобытчиков, но и это затруднительно из-за транспортной доступности.

В 1948 году в России на границе Якутии и Иркутской области открыто единственное месторождение чароита (Сиреневый камень). Наложён даже запрет на добычу свыше 100 т, чтобы не привести к истощению ресурса. Сам карьер закрыт для посещения, но в селе Смоленщина находится компания «Байкалкварцсамоцветы», где выставлены экспонаты Сиреневого камня и кипит работа ювелиров [Роман с камнем:..., 2025].

Говоря про Россию нельзя не упомянуть Алмазный Фонд на территории Московского Кремля, музей Фаберже (много утраченных культурных ценностей и не выставляемые ранее произведения известных ювелиров) [Музей Фаберже, 2025], Золотую и Бриллиантовую кладовую Эрмитажа в Санкт-Петербурге. Тур «Золотой квадрат Санкт-Петербурга», идущий «по следам истории» дома ювелира Карла Фаберже: посещение петроградской стороны «северной столицы», где ранее размещались эмальерные мастерские братьев-ювелиров Петровых; экскурсия по Большой морской улице к бывшему дому Карла Фаберже и в музей мастера; мастер-класс по инкрустации пасхального яйца в стиле Фаберже.

В Кемеровской области стоит выделить три района, стремящихся развивать ювелирный туризм. «Первый район – Горно-Шорский (Тельбесская группа железорудных месторождений), второй – Салаирский (Салаиро-Урская группа месторождений), третий – Мунгатский (халцедоны р. Мунгат)» [Разволяев, Берлякова, 2022]. На Каменушинском месторождении для любителей геммологических находок встречается малахит.

Алтай – алмазы, изумруды, рубины, нефриты, бирюза, аквамарин и прочее – «если составлять геммологическую карту, то Алтай будет в числе значимых регионов страны» [Таратина, 2021]. Маршруты в сёла Черновая, Берёзовка, к Осиновскому месторождению, ручью Камбалин. Регион знаменит камнерезным искусством. Туристы могут побывать на камнерезных предприятиях, например, на Колыванской фабрике.

В Костромской и Владимирской области с IX века мастера занимались филигранью, тончайшее кружево из металлической проволоки. Сейчас и в Крыму можно найти такие сувениры. Так же в Крыму туристы могут собрать коллекцию минералов в конгломератах горы Демерджи (розовый гранит, кварцит, кальцит и красную яшму) без ущерба для природы, так как запасы указанных минералов в конгломератах значительны [Гусев, 2021].

Отдельное направление в ювелирном деле, горячая сольвычегодская эмаль. В XVII веке финифть получает распространение в Архангельской, Ростовской областях. Первоначально это были композиции из цветов, преимущественно тюльпаны. В Ростове в музее финифти проводятся экскурсии, как часть промышленного туризма, мастер-классы. Сегодня произведения финифти можно купить в фирменных магазинах в Москве, Санкт-Петербурге, Ярославле и некоторых других городах России.

Северная чернь – соединение чёрного сплава с серебром путем плавления. Неповторимые узоры, сложность орнаментов берут свое начало из Великого Устюга (XVII век). Здесь расположен завод «Северная Чернь», где реализуется промышленный туризм и можно увидеть производство изделий, в том числе гравировку штихелем. На заводе есть как индивидуальные экскурсии, так и групповые (около 50 чел.).

В России достаточно много районов с небольшими россыпями золота, отработка которых существующими промышленными технологиями экономически невыгодна. Особенно это актуально для Иркутской области. Потенциальное развитие «золотого туризма» способно увеличить туристский поток в область и удовлетворить особые впечатления и ощущения туристов, в рамках которого появляется возможность непосредственно поучаствовать в процессе добычи одного из самых благородных металлов.

Заброшенные шахты могут стать потенциальными местами притяжения туристов, здесь можно познакомиться с историей добычи минералов, увидеть остатки оборудования. Например, Мурманская область, аметистовые шахты на Терском берегу Белого моря. Шахты заброшены и имеют статус государственного природного геологического памятника. В Свердловской области, заброшенные минеральные копи около деревни Мурзинка, туристы могут испытать удачу в поисках кристаллов корунда и граната альмандин. На подобные заброшенные шахты стоит организовывать тематические ювелирные туры. Заброшенная в 2017 году после затопления грунтовыми водами алмазная шахта «Мирная» стала достопримечательностью, это вторая в мире по величине шахта после каньона Бингхэма. В 1976 году на шахту был проведён первый тур для компании *De Beer*, но в связи с долгим трансфером и небольшим сроком визы, само посещение заняло 20 минут. В 2024 году решили возобновить добычу алмазов на карьере с учётом прошлых ошибок и строительства специальных скважин и ледяной стены. В городе Березовском помимо единственного в России музея золота находятся и заброшенные золотодобывающие шахты, где до сих пор можно найти интересные камни. А вот посёлок Вершино-Дарасунский в Забайкалье при принятии решения о затоплении последней шахты «Юго-Западная» вероятно опустеет совсем и туристов здесь не будет. Местным жителям по сути негде будет работать, а климатические условия не позволяют заниматься земледелием, что вынуждает их уезжать в соседние сёла.

Развитие внутреннего туризма спровоцировало спрос на специфические туры: к месторождениям минералов, в «сокровищницы» при заводах и музеях, на ювелирные мастер классы и прочее. По мнению авторов, можно выделить следующие неординарные и увлекательные виды туризма ювелирной направленности:

- минералогический (геолого-минералогический) туризм, сопряжённый с увлечением твердыми полезными ископаемыми и коллекционированием минералов;
- геммологический туризм, нацеленный на посещение месторождений камнесамоцветного сырья с целью поиска и сбора образцов для коллекций или декоративного творчества, а также знакомство с месторождением;
- янтарный туризм: туры по месторождениям янтаря, истории, заводам янтарного производства – туристские маршруты «Янтарный путь Руси»;
- «золотой» туризм или туризм с добычей золота в регионы, где промышленная добыча золота прекращена;
- бриллиантовый туризм (бриллиантовые туры в Якутию);
- промысловый ювелирный туризм (финифть, северная чернь);
- туры по ювелирным брендам H. Stren, Chamovskikh, Sokolov, ЭПЛ Даймонд, Epic Jewellery, Kintsugi Jewellery, Gucci, Chanel, Mercury и другие;
- ювелирный шоппинг-туризм.

Путешественники стали менее восприимчивы к традиционным предложениям («шаблонность» туристского продукта), потому что сформировался спрос на персонализированные туры взамен ординарного массового турпродукта. В Калининград едут по местам сбора янтаря, в Вологодскую область за изучением техники чернения серебра, в Якутию за чистейшими бриллиантами, в Кострому как в столицу ювелирного дела, в Санкт-Петербург за культурой ювелирного мастерства и прочее. Именно ювелирные туры позволяют получить новый навык: добыть самостоятельно в шахте или карьере драгоценное сырьё, забрать его с собой или отдать на обработку и наблюдать за процессом огранки. И это получится целая история украшения. В провинциальных городах потребители стали чаще покупать эксклюзивные изделия местных мастеров, что резко снизило спрос на брендовые товары. Это также дало толчок к популяризации финифти и изделиям из натуральных камней.

Если смотреть на эмоциональную составляющую, то украшения стали обладать собственной историей или выступать элементом самовыражения, так как в условиях перенасыщенного рынка ценность ювелирного изделия заключается не только в дизайне и используемом материале. Рынок ювелирных произведений искусства сместился от потокового производства к кастомизации. Потребитель участвует в выборе материала, дизайне, создании изделия, гравировке – это возможно именно при ювелирных турах.

Заключение

Туристическое использование горнодобывающего ландшафта сосредоточено на активных видах отдыха (например, внедорожные маршруты, пешие прогулки, катание на лыжах и скалолазание), культурном туризме, а также образовательном, научном (например, посещение для наблюдения за минералогическим разнообразием и добычей горных пород) и ювелирном туризме. Итак, почему же ювелирный туризм? Неординарный туризм, с помощью которого узнаются виды драгоценных камней, познаётся процесс добычи в шахтах или карьерах, а, так же, самый захватывающий момент – огранка в ювелирное изделие. Драгоценные камни привлекают внимание, способствуют формированию образа (бренда) территории, а события (фестивали, ярмарки и т.д.) формируют легенды регионов. Геммология – это важная часть культурного наследия. Цель ювелирного туризма – погружение в геммологию, ювелирное искусство, изучение свойств драгоценных камней, историй предприятий и различных технологий. Он способствует поддержке инфраструктуры и заселённости удалённых регионов. Ювелирный туризм активно развивается за рубежом, в России ювелирные туры не пользуются постоянным спросом. Отчасти это связано с отсутствием транспортной логистики, так как большинство месторождений драгоценных камней находится в труднодоступных местах. Для жителей городов – это возможность отдохнуть от шума и реализовать мечту поиска сокровищ. Для регионов, толчок для развития туристской отрасли, особенно где нет иных центров притяжения для туристов. По результатам проведённого исследования авторами составлена карта-схема территорий ювелирного туризма. Уральский федеральный округ насыщен разнообразными ювелирными турами, в Калининградскую область едут за янтарём, а в Республику Саха (Якутия) едут за якутскими бриллиантами (твёрдый чистый камень с разнообразным оттенком), получившими известность и за рубежом.

Список источников

- Аметистовый рудник «Лампиваара» в Лоусто. Электронный ресурс. URL: https://kontour.ru/wiki/Финляндия/Музеи_и_памятники/Аметистовый_рудник_Лампиваара_в_Лоусто/ (дата обращения 15.10.2025).
- Данилевский В.В. 1959. Русское Золото. История открытия и добычи до середины XIX в. М., Металлургиздат, 380 с.
- Музей Фаберже. Электронный ресурс. URL: https://fabergemuseum.ru/?utm_source=tickets.fsv (дата обращения 02.10.2025).
- Роман с камнем: как добывают алмазы, изумруды и рубины. Электронный ресурс. URL: <https://www.mywaymag.ru/travel/roman-s-kamnem-gde-i-kak-dobyvayut-almazы-izumrudy-i-rubiny/> (дата обращения 12.10.2025).

Список литературы

- Александрова А.Ю. 2015. Туристская поездка как сумма впечатлений. Российские регионы: взгляд в будущее, 2(3): 12–17.
- Афанасьева Т.В., Иванова С.А. 2018. Месторождения полезных ископаемых Южной Якутии как объекты геолого-минералогического туризма. Вестник Северо-Восточного Федерального Университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле, 4(12): 60–71.

- Барков Д.Е. 2018. Костромской ювелирный промысел. В кн.: Наука сегодня: теоретические и практические аспекты. Материалы международной научно-практической конференции, Вологда, 27 декабря 2017. Вологда, Маркер: 192–193.
- Беленков Н.Б. 2012. Минералогический туризм на Урале: возможности и проблемы. Как открыть миру самоцветную шкатулку России? Вестник Уральского отделения Российского минералогического общества, 9: 5–11.
- Гусев А.И. 2021. Потенциал геммотуризма в Южном Федеральном округе. В кн.: Science and Education: Problems and Innovations. Международная научно-практическая конференция, Пенза, 27 июня 2021. Пенза, Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.): 16–20.
- Котова О., Шипшинская Р.Г. 2017. Проведение сравнительного анализа курортов Балтийского побережья – г. Паланга и Зеленоградский городской округ. В кн.: Научные достижения и открытия современной молодежи. Международная научно-практическая конференция, Пенза, 17 февраля 2017. Пенза, Наука и Просвещение: 728–730.
- Неустроев С.С. 2011. Основные направления инновационного развития экономики Республики Саха (Якутия). Журнал правовых и экономических исследований, 3: 150–154.
- Разволяев Д.О., Берлякова О.Г. 2022. Геммотуризм в Кузбассе. В кн.: Фундаментальные и прикладные аспекты устойчивого развития ресурсных регионов. Всероссийская научная конференция с международным участием, Новокузнецк, 07–10 декабря 2021. Новокузнецк, Кемеровский государственный университет: 208–212.
- Сарайкина С.В., Сотова Л.В. 2020. Золотопромышленный комплекс и туризм. *Norwegian Journal of Development of the International Science*, 38–1: 15–20.
- Стрельникова А.А. 2021. Ювелирные кластеры России: туристский потенциал. В кн.: Историко-культурное наследие как потенциал развития туристско-рекреационной сферы. Материалы X Всероссийской научно-практической конференции, Казань, 16–18 апреля 2021. Казань, Академия наук Республики Татарстан: 218–220.
- Таратина А.А. 2021. Геммотуризм – инновация в индустрии туризма Республики Алтай и Алтайского края. В кн.: Инновационные технологии управления и стратегии территориального развития туризма и сферы гостеприимства. Материалы IV Международной научно-практической конференции, Москва, 24 сентября 2021. М., Российский государственный университет туризма и сервиса: 751–757.
- Тимофеева Л.С., Стрельникова А.А., Вагапова Ф.Г. 2019. Экономика впечатлений как фактор развития ювелирного туризма. Современные проблемы сервиса и туризма, 13(2): 79–91. <https://doi.org/10.24411/1995-0411-2019-10207>.
- Carneiro C.D.R. 2016. Glaciação Antiga no Brasil: Parques Geológicos do Varvito e da Rocha Moutonnée Nos Municípios de Itu e Salto, SP. *Terræ Didática*, 12(3): 209–219. <https://doi.org/10.20396/td.v12i3.8647898>.
- Cavalcanti J.A.D., da Silva M.S., Schobbenhaus C., Atencio D., Mota de Lima H. 2023. Geoconservation of Geological and Mining Heritage Related to Banded Iron Formation of Itabira Group, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: A challenging Issue. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 11(1): 118–148. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2022.12.002>.
- Cruz-Pérez M.A., Canet C., Salgado-Martínez E. 2017. Connecting Geoheritage and Society at the Comarca Minera UNESCO Global Geopark, Mexico. *GGN NewsLetter*, 3: 19–20.
- De Oliveira D.P.S., Robb L.J., Inverno C.M.C. 2001. The São Martinho Gold Occurrence, NE Ossa Morena Zone, Portugal: Geological Setting and Ore Genesis. In: *Mineral Deposits at the Beginning of the 21st Century*. Swets & Zeitlinger Publishers Lisse: 791–793. <https://doi.org/10.1201/9781003077503-201>.
- Dos Santos Costa S.S., Leite do Nascimento M.A., Nobre da Silva M.L. 2024. Geological and Mining Heritages in the Seridó UNESCO Global Geopark: Ediacaran to Cambrian Mineral Deposits Revealed by Historical Mines in Northeast Brazil. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 12(2): 311–332. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2024.04.004>.
- Ghazi J.M., Hamdollahi M., Moazzen M. 2021. Geotourism of Mining Sites in Iran: An Opportunity for Sustainable Rural Development. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 9(1): 129–142. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2021.02.004>.
- Pine B.J., Gilmore J.H. 1999. *The Experience Economy: Work is Theatre & Every Business a Stage*. Boston, Harvard Business School Press, 254 p.

- Prosser C.D. 2018. Geoconservation, Quarrying and Mining: Opportunities and Challenges Illustrated Through Working in Partnership with the Mineral Extraction Industry in England. *Geoheritage*, 10(2): 259–270. <https://doi.org/10.1007/s12371-016-0206-z>.
- Richards G., Wilson J. 2006. Developing Creativity in Tourist Experiences: A Solution to the Serial Reproduction of Culture? *Tourism Management*, 27(6): 1209–1223. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2005.06.002>.

References

- Aleksandrova A.Yu. 2015. Turistskaya poezdka kak summa vpechatleniy [A Tourist Trip as a Sum of Impressions]. *Rossiyskie regiony: vzglyad v budushchee*, 2(3): 12–17.
- Afanasyeva T.V., Ivanova S.A. 2018. Deposits of Mineral Resources of South Yakutia as Objects of Geological and Mineralogical Tourism. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Series of Earth Sciences*, 4(12): 60–71 (in Russian).
- Barkov D.E. 2018. Kostromskoy yuvelirnyy promysel [The Kostroma Jewelry Industry]. In: *Nauka segodnya: teoreticheskie i prakticheskie aspekty* [Science Today: Theoretical and Practical Aspects]. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Vologda, 27 December 2017. Vologda, Publ. Marker: 192–193.
- Belenkov N.B. 2012. Mineralogicheskiy turizm na Urale: vozmozhnosti i problemy. Kak otkryt' miru samotsvetnuyu shkatulku Rossii? [Mineralogical Tourism in the Urals: Opportunities and Challenges. How to Reveal Russia's Gemstone Chest to the World?]. *Vestnik Ural'skogo otdeleniya Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva*, 9: 5–11.
- Gusev A.I. 2021. Potential Gemotourism in the South Federal District. In: *Science and Education: Problems and Innovations. International Scientific and Practical Conference*, Penza, 27 June 2021. Penza, Publ. Nauka i Prosveshcheniye (IP Gulyayev G.Yu.): 16–20 (in Russian).
- Kotova O., Shipshinskayte R.G. 2017. Provedeniye sravnitel'nogo analiza kurortov Baltiyskogo poberezhia – g. Palanga i Zelenogradskiy gorodskoy okrug [Comparative Analysis of Baltic Coast Resorts: Palanga and Zelenogradsk Urban District]. In: *Nauchnyye dostizheniya i otkrytiya sovremennoy molodezhi* [Scientific Achievements and Discoveries of Modern Youth]. International Scientific and Practical Conference, Penza, 17 February 2017. Penza, Publ. Nauka i Prosveshcheniye: 728–730.
- Neustroev S.S. 2011. Key Directions of Innovation Development of Economy of Sakha (Yakutia). *Journal of Legal and Economic Studies*, 3: 150–154 (in Russian).
- Razvolyaev D.O., Berlyakova O.G. 2022. Gemmotourism in Kuzbass. In: *Fundamental and Applied Aspects of Sustainable Development of Resource Regions. All-Russian Scientific Conference with International Participation*, Novokuznetsk, 7–10 December 2021. Novokuznetsk, Publ. Kemerovskiy gosudarstvennyy universitet: 208–212 (in Russian).
- Saraykina S.V., Sotova L.V. 2020. Gold Industry and Tourism. *Norwegian Journal of Development of the International Science*, 38–1: 15–20 (in Russian).
- Strelnikova A.A. 2021. Jewelry Clusters in Russia: Tourism Potential. In: *Historical and Cultural Heritage as a Potential for the Development of the Tourism and Recreation Sphere. Proceedings of the 10th All-Russian Scientific and Practical Conference*, Kazan, 16–18 April 2021. Kazan, Publ. Akademiya nauk Respubliki Tatarstan: 218–220 (in Russian).
- Taratina A.A. 2021. Gemmoturizm – innovatsiya v industrii turizma Respubliki Altay i Altayskogo kraia [Gem-Tourism: An Innovation in the Tourism Industry of the Altai Republic and Altai Krai]. In: *Innovatsionnyye tekhnologii upravleniya i strategii territorial'nogo razvitiya turizma i sfery gostepriimstva* [Innovative Management Technologies and Strategies for Territorial Tourism and Hospitality Development]. Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference, Moscow, 24 September 2021. M., Publ. Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet turizma i servisa: 751–757.
- Timofeeva L.S., Strelnikova A.A., Vagapova F.G. 2019. Experience Economy as Jewelry Tourism Development Factor. *Service & Tourism: Current Challenges*, 13(2): 79–91 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/1995-0411-2019-10207>.
- Carneiro C.D.R. 2016. Glaciação Antiga no Brasil: Parques Geológicos do Varvito e da Rocha Moutonnée Nos Municípios de Itu e Salto, SP. *Terræ Didática*, 12(3): 209–219. <https://doi.org/10.20396/td.v12i3.8647898>.

- Cavalcanti J.A.D., da Silva M.S., Schobbenhaus C., Atencio D., Mota de Lima H. 2023. Geoconservation of Geological and Mining Heritage Related to Banded Iron Formation of Itabira Group, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: A challenging Issue. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 11(1): 118–148. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2022.12.002>.
- Cruz-Pérez M.A., Canet C., Salgado-Martínez E. 2017. Connecting Geoheritage and Society at the Comarca Minera UNESCO Global Geopark, Mexico. *GGN NewsLetter*, 3: 19–20.
- De Oliveira D.P.S., Robb L.J., Inverno C.M.C. 2001. The São Martinho Gold Occurrence, NE Ossa Morena Zone, Portugal: Geological Setting and Ore Genesis. In: *Mineral Deposits at the Beginning of the 21st Century*. Swets & Zeitlinger Publishers Lisse: 791–793. <https://doi.org/10.1201/9781003077503-201>.
- Dos Santos Costa S.S., Leite do Nascimento M.A., Nobre da Silva M.L. 2024. Geological and Mining Heritages in the Seridó UNESCO Global Geopark: Ediacaran to Cambrian Mineral Deposits Revealed by Historical Mines in Northeast Brazil. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 12(2): 311–332. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2024.04.004>.
- Ghazi J.M., Hamdollahi M., Moazzen M. 2021. Geotourism of Mining Sites in Iran: An Opportunity for Sustainable Rural Development. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 9(1): 129–142. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2021.02.004>.
- Pine B.J., Gilmore J.H. 1999. *The Experience Economy: Work is Theatre & Every Business a Stage*. Boston, Harvard Business School Press, 254 p.
- Prosser C.D. 2018. Geoconservation, Quarrying and Mining: Opportunities and Challenges Illustrated Through Working in Partnership with the Mineral Extraction Industry in England. *Geoheritage*, 10(2): 259–270. <https://doi.org/10.1007/s12371-016-0206-z>.
- Richards G., Wilson J. 2006. Developing Creativity in Tourist Experiences: A Solution to the Serial Reproduction of Culture? *Tourism Management*, 27(6): 1209–1223. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2005.06.002>.

*Поступила в редакцию 22.10.2025;
поступила после рецензирования 03.12.2025;
принята к публикации 08.02.2026*

*Received October 22, 2025;
Revised December 03, 2025;
Accepted February 08, 2026*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сарафанов Александр Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры рекреационной географии и туризма географического факультета, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Сарафанова Анастасия Геннадьевна, научный сотрудник кафедры рекреационной географии и туризма географического факультета, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander A. Sarafanov, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Department of Recreational Geography and Tourism, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Anastasiya G. Sarafanova, Research Assistant, Department of Recreational Geography and Tourism, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia



УДК 911.3:656
DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-3-707-720
EDN XECUMA

Пространственная логистика в системе общественной географии: теоретические основания

Мафратоглу М.

Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена
Россия, 191186, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 48
m.mafratoglu@gmail.com

Аннотация. Пространственная организация логистических потоков приобретает особое значение в условиях усложнения транспортных сетей, коридоров, узлов и режимов инфраструктурной связанности. Несмотря на наличие работ по географии транспорта, территориальной логистике, транспортно-логистическим системам, транспортно-логистическому пространству и классической логистике, логистическое измерение потоков остается понятийно рассредоточенным между несколькими исследовательскими традициями. Цель исследования состоит в теоретическом обосновании пространственной логистики как отдельного направления исследований в системе географии транспорта и общественной географии, уточнении ее понятийных границ и отличий от классической логистики. Методологическую основу статьи составляют сравнительный понятийный анализ, теоретическая реконструкция и дисциплинарная интерпретация. Показано, что пространственную логистику целесообразно рассматривать не как новую самостоятельную дисциплину и не как расширенную версию прикладной логистики, а как формируемую субдисциплину в системе географии транспорта, приобретающую общественно-географическое значение при анализе территориальной организации потоков, различий доступа, инфраструктурной включенности и пространственной асимметрии. Установлено, что отличие пространственной логистики от классической определяется не фактом учета пространства, а его статусом в исследовательской постановке: в классической логистике пространство чаще выступает параметром эффективности, размещения и маршрутизации, тогда как в пространственной логистике – структурой доступа, связанности, инфраструктурной селективности и территориальных последствий движения потоков. Основной результат статьи состоит в обосновании минимального аналитического порога пространственно-логистического анализа, включающего четыре взаимосвязанных признака: потоковую привязку, инфраструктурную обусловленность, режим доступа и территориальный эффект. Предложенная рамка позволяет отличать пространственно-логистический анализ от операционного анализа доставки, морфологического описания транспортной сети и общего анализа территориальной организации, а также формирует теоретическую основу для последующей конкретизации анализа протяженных инфраструктурных систем.

Ключевые слова: пространственная логистика, география транспорта, общественная география, территориальная организация, инфраструктурная связанность, режимы доступа, транспортно-логистические системы, пространственно-логистический анализ

Для цитирования: Мафратоглу М. 2026. Пространственная логистика в системе общественной географии: теоретические основания. Региональные геосистемы, 50(3): 707–720. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-707-720 EDN: XECUMA

Spatial Logistics in the System of Human Geography: Theoretical Foundations

Mustafa Mafratoglu

Herzen State Pedagogical University of Russia
48 Moika Emb., St. Petersburg 191186, Russia
E-mail: m.mafratoglu@gmail.com

Abstract. The spatial organization of logistical flows becomes especially significant as transport networks, corridors, nodes, and regimes of infrastructural connectivity grow more complex. Although transport geography, territorial logistics, studies of transport-logistics systems and transport-logistics space, international transport corridors, and classical logistics all address related issues, the logistical dimension of flows remains conceptually dispersed across several research traditions. The aim of the study is to substantiate spatial logistics as a distinct research direction within transport geography and human geography, to clarify its conceptual boundaries, and to distinguish it from classical logistics. The article is based on comparative conceptual analysis, theoretical reconstruction, and disciplinary interpretation. The study shows that spatial logistics should not be regarded as a new independent discipline or as an extended version of applied logistics, but rather as an emerging subdiscipline within transport geography that acquires broader human-geographical significance through the study of territorially organized flows, differences in access, infrastructural inclusion, and spatial asymmetry. The distinction between classical and spatial logistics is defined not by the mere presence of space in the analysis, but by the analytical status assigned to it. In classical logistics, space most often functions as a parameter of operational efficiency, location, routing, and coordination. In spatial-logistical analysis, it becomes a structure of access, connectivity, infrastructural selectivity, and territorial consequences. The main result of the study is the substantiation of a minimal analytical threshold for identifying spatial-logistical analysis. This threshold includes four interrelated features: flow attachment to a specific network, route, node, or corridor; infrastructural conditioning; access regime; and territorial effect. The proposed framework makes it possible to distinguish spatial-logistical analysis from operational delivery analysis, morphological description of transport networks, and general analysis of territorial organization. It also provides a theoretical basis for further specification of spatial-logistical analysis in relation to extended infrastructure systems.

Keywords: spatial logistics, transport geography, human geography, territorial organization, infrastructure connectivity, access regimes, transport-logistics systems, spatial-logistical analysis

For citation: Mafratoglu M. 2026. Spatial Logistics in the System of Human Geography: Theoretical Foundations. *Regional Geosystems*, 50(3): 707–720 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-707-720 EDN: XECUMA

Введение

В современных исследованиях логистика чаще всего трактуется как система управления потоками, ориентированная на координацию операций, снижение издержек и повышение надежности перемещения ресурсов [Christopher, 2023]. Такая постановка сохраняет прикладную значимость, однако оказывается недостаточной там, где потоки проходят через протяженные инфраструктурные сети, узлы, коридоры и неодинаковые уровни региональной связанности. В подобных условиях предметом анализа становятся не только операции перемещения, но и пространственные структуры, в которых потоки закрепляются, перераспределяются, ограничиваются или переориентируются [Hesse, Rodrigue, 2004; Coe, 2020; Hesse, 2020]. В более широком геоэкономическом контексте инфраструктурная связанность участвует в формировании функциональной географии, конфигурация которой не всегда совпадает с политико-административным членением пространства [Ханна, 2019]. Для пространственно-логистического анализа этот тезис важен постольку, поскольку позволяет рассматривать линии, коридоры и узлы как элементы устойчивых межтерриториальных связей, а не только как технические объекты перемещения.

Проблема состоит не в дефиците исследований транспортных потоков, сетей и коридоров, а в понятийной рассредоточенности их логистического измерения. В международной литературе эта проблематика раскрывается через исследования логистики, грузовых потоков, логистического пространства и глобальных цепей поставок [Hesse, Rodrigue, 2004; Coe, 2020; Hesse, 2020]; в российской – через географию транспорта, территориальную логистику, транспортно-логистическое пространство, транспортные коридоры и теорию территориальной организации [Конькова, 2012;

Бакланов, 2013; Нефедова, 2015; Хирофуми, 2024]. Однако поток в этих подходах часто описывается либо в логике операционного управления, либо через параметры сети, коридора или территориальной организации. Его пространственное закрепление, режим прохождения, доступ к инфраструктуре и территориальные последствия требуют специальной исследовательской рамки.

В предлагаемой интерпретации пространственная логистика определяется как формируемая субдисциплина в системе географии транспорта, а не как новая самостоятельная дисциплина или расширение прикладной логистики. В ее фокусе находится поток как пространственно закреплённый процесс прохождения через инфраструктурные, коридорные, узловые и институциональные условия. В таком понимании она связывает категории сети, маршрута, узла, транспортно-географического положения, доступности и связанности [Тархов, 2005; Нефедова, 2015; Rodrigue, 2024] с общественно-географической интерпретацией территориальной организации, инфраструктурной неоднородности и различий доступа [Гладкий, 2016; Шарыгин, 2017; Дружинин, 2022]. Именно эта промежуточная позиция позволяет избежать двух крайностей: сведения логистики к прикладной оптимизации доставки и, напротив, необоснованного выделения пространственной логистики в самостоятельную дисциплину.

Цель статьи состоит в теоретическом обосновании пространственной логистики как отдельного направления исследований в системе географии транспорта и общественной географии. Для достижения этой цели решаются четыре задачи: выявить основные группы понятий пространственно-логистической проблематики в российской и международной литературе; разграничить пространственную и классическую логистику по исследовательскому объекту, роли пространства и типу интерпретации потоков; обосновать транспортно-географические основания данного подхода; раскрыть его общественно-географическое значение через анализ территориальной организации, инфраструктурной связанности и пространственной асимметрии.

Основная гипотеза состоит в том, что научная устойчивость пространственной логистики определяется не самим употреблением термина, а его точным позиционированием в географии транспорта и общественной географии. В этом случае предметом анализа становится не поток как таковой, а режим его прохождения через сети, коридоры, узлы и инфраструктурно-институциональные условия, а также последствия такого прохождения для территориальной организации.

Научная новизна статьи заключается в систематизации рассредоточенных в разных исследовательских традициях представлений о логистическом измерении пространства. В качестве разграничительной рамки предлагается минимальный аналитический порог пространственно-логистического анализа, включающий четыре взаимосвязанных признака: потоковую привязку, инфраструктурную обусловленность, режим доступа и территориальный эффект. Эта рамка объединяет потоки, узлы, сети, инфраструктуру и территориальную организацию в совокупность проверочных условий, позволяющих определить переход от транспортного или операционного анализа к пространственно-логистической постановке.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования выступает пространственная логистика как формируемое направление исследований в системе географии транспорта и общественной географии. Предмет исследования составляют ее дисциплинарное положение, понятийные границы и объяснительный потенциал при анализе инфраструктурных сетей, коридоров, узлов, условий доступа и территориальных различий связанности.

Материалом исследования послужили три группы источников. Первая включает работы по географии логистики, географии транспорта, исследованиям логистических потоков, глобальным цепям поставок и классической логистике; она использовалась для

выявления связки «поток – сеть – узел – коридор». Вторая представлена российскими исследованиями географии транспорта, территориальной логистики, транспортно-логистических систем, транспортно-логистического пространства и международных транспортных коридоров; она позволила уточнить, как логистическая проблематика входит в транспортно-географический анализ. Третья объединяет работы по территориальной организации, территориальным социально-экономическим системам, общественной и гуманитарной географии; она использовалась для интерпретации территориальных эффектов, связанности, включенности и асимметрии. Такое деление источников отражает не формальную классификацию литературы, а логику движения от потока и сети к территориальной организации и общественно-географической интерпретации.

Корпус источников формировался не как систематический библиометрический обзор, а по принципу теоретической релевантности: учитывались работы, в которых логистический поток рассматривался не только как объект управления, но и через сеть, узел, коридор, инфраструктурную связанность, территориальную организацию или режим доступа. Узкооперационные исследования без пространственно-географической интерпретации в основной корпус не включались.

Исследование выполнено в формате теоретико-концептуального анализа, поскольку его задача состоит в уточнении условий, при которых логистический поток может рассматриваться как объект географического анализа, а не в измерении потоков или оценке эффективности отдельных транспортных систем. Поэтому в центре внимания находится связь потока с инфраструктурной сетью, коридорными и узловыми структурами, режимами доступа и территориальными последствиями его организации.

Методическая логика исследования основана на сочетании сравнительного понятийного анализа, теоретической реконструкции и дисциплинарной интерпретации. Сравнительный понятийный анализ используется для разграничения классической логистики, территориальной логистики, географии транспорта, транспортно-логистических систем и пространственной логистики. Теоретическая реконструкция позволяет выделить в разных исследовательских традициях общие элементы, где поток трактуется как процесс, закрепленный внутри инфраструктурных сетей, узлов, коридоров и режимов доступа. Дисциплинарная интерпретация определяет, почему этот уровень анализа имеет основу в географии транспорта, но приобретает более широкий общественно-географический смысл через категории территориальной организации и пространственной асимметрии.

Сопоставление смежных понятий проводилось по четырем аналитическим осям: наличие конкретной потоковой привязки; зависимость потока от инфраструктурной конфигурации; учет режима доступа к сети, коридору или узлу; выявление территориального эффекта. Эти оси использовались не как количественные показатели, а как проверочные условия для фиксации перехода от общего описания перемещения или сети к собственно пространственно-логистической постановке. Итоговая формулировка этих условий как минимального аналитического порога представлена в разделе результатов. Тем самым методика сопоставления задает не шкалу оценки, а процедуру понятийного отбора: она показывает, какие признаки должны одновременно присутствовать, чтобы поток рассматривался не как перевозочная операция, а как пространственно организованный процесс.

Границы исследования определяются его теоретико-концептуальным характером: основное внимание уделяется понятийным и дисциплинарным основаниям пространственно-логистического подхода. Статья не предлагает количественной методики оценки потоков, не строит индекс пространственно-логистической эффективности и не подменяет собой отраслевой анализ конкретных транспортных систем; эмпирическая конкретизация этой рамки требует отдельного исследования.

Результаты и их обсуждение

Поскольку исследование имеет теоретико-концептуальный характер, результаты представлены как система понятийных разграничений, уточняющих статус пространственно-логистического анализа в географии транспорта и общественной географии. В данном случае результатом является не эмпирическое измерение потоков, а уточнение того уровня анализа, на котором поток становится объектом пространственно-географической интерпретации. Логика анализа выстраивается от смежных понятийных оснований к разграничению с классической логистикой, затем – к определению транспортно-географической основы, общественно-географического значения и минимального аналитического порога.

В литературе пространственно-логистическая проблематика проявляется не как единое направление, а как совокупность направлений исследований, в которых поток, сеть, коридор, узел, доступность и территориальная организация рассматриваются преимущественно раздельно. Поэтому речь идет не об отсутствии необходимых понятий, а об их рассредоточенности: одни работы сильнее раскрывают морфологию транспортной сети, другие – размещение логистических объектов, третьи – макрорегиональные коридоры и инфраструктурную связанность, четвертые – территориальную организацию и пространственные различия развития. Именно эта рассредоточенность объясняет необходимость не нового термина как такового, а разграничительной рамки, позволяющей определить, когда анализ потока становится пространственно-логистическим. В связи с этим ключевая задача состоит в уточнении уровня анализа, на котором поток одновременно связан с транспортной сетью, инфраструктурным режимом и территориальной организацией.

Смежные направления выполняют разные аналитические функции. География транспорта задает аппарат сети, маршрута, узла, транспортно-географического положения, доступности и связанности. Территориальная логистика фиксирует размещение, обслуживание и территориальный контекст логистических процессов, но не всегда раскрывает различия доступа и инфраструктурной включенности [Конькова, 2012]. Исследования транспортно-логистического пространства и международных транспортных коридоров показывают макрорегиональные формы инфраструктурного включения, транзитного положения и межгосударственного согласования [Вардомский, Тураева, 2018; Хирофуми, 2024]. Теория территориальной организации позволяет интерпретировать потоки как элементы функционально связанных пространственных систем, в которых инфраструктура, хозяйственные связи и территориальная структура рассматриваются во взаимной зависимости [Бакланов, 2013; 2017; 2019].

Для российской теоретической географии и географии транспорта особенно значимо рассмотрение территориальной организации как сочетания ареальных и сетевых форм, внутреннее единство которых создается линиями, узлами, связями и потоками [Родоман, 1999; Бакланов, 2013]. Исследования морфологии и топологии транспортных сетей [Тархов, 2005; 2022], логистических взаимодействий [Сидоров, 2011; 2012] и транспортной доступности [Бугроменко, 2010; Нефедова, 2015] показывают, что территориальная роль транспорта не исчерпывается конфигурацией сети или объемом перевозок, а проявляется также в связанности, доступности и пространственных преимуществах различных местоположений. В совокупности эти подходы формируют теоретические предпосылки пространственно-логистического анализа, однако не задают его как самостоятельную разграничительную рамку. Именно поэтому в данной статье они сопоставляются по аналитической функции каждого направления: что оно выявляет, где проходит его объяснительный предел и какой элемент передает предлагаемой рамке (табл. 1).

Таблица 1
Table 1Понятийные направления, формирующие пространственно-логистический анализ
Conceptual directions forming spatial-logistical analysis

Понятийное направление	Аналитический вклад	Аналитическое ограничение
География транспорта	Сети, маршруты, узлы, транспортно-географическое положение, доступность, связанность	Акцент чаще делается на морфологии и конфигурации сети; режим прохождения потока и институциональная фильтрация обычно не образуют самостоятельный уровень анализа
Территориальная логистика	Размещение, обслуживание, доступность, территориальный контекст логистических процессов	Территория нередко трактуется как среда размещения и оптимизации, а не как источник различий доступа, зависимости и селективного включения
Транспортно-логистическое пространство	Коридоры, порты, терминалы, макрорегиональные связи	Понятие часто используется описательно; не всегда задан критерий, отделяющий сам поток от условий его включения в коридорные и узловые системы
Территориальная организация и территориальные социально-экономические системы	Территориальные системы, функциональные связи, пространственное сопряжение элементов	Потоки включаются в более широкую систему территориальных связей, но редко выделяются как самостоятельная единица пространственно-логистического анализа

Примечание: таблица фиксирует не иерархию научных направлений, а их различную функцию в формировании пространственно-логистической рамки. Источник: составлено автором на основе теоретического обобщения работ [Родоман, 1999; Hesse, Rodrigue, 2004; Тархов, 2005; 2022; Бугроменко, 2010; Сидоров, 2011; 2012; Конькова, 2012; Бакланов, 2013; 2017; 2019; Нефедова, 2015; Вардомский, Тураева, 2018; Сое, 2020; Hesse, 2020; Хирофуми, 2024; Rodrigue, 2024].

Табл. 1 показывает, что ни одно из рассмотренных направлений само по себе не исчерпывает пространственно-логистическую рамку. География транспорта задает сетевой и узловой аппарат; территориальная логистика – связь логистических процессов с размещением и обслуживанием; исследования транспортно-логистического пространства – коридорно-узловой масштаб; теория территориальной организации – общественно-географическую интерпретацию потоков. Поэтому пространственная логистика понимается не как сумма смежных направлений, а как уточнение исследовательского фокуса, позволяющее перейти от управления потоком к объяснению условий его прохождения через инфраструктурные и институциональные ограничения.

Такое уточнение особенно важно потому, что классическая и пространственная логистика частично используют один и тот же словарь: поток, маршрут, узел, инфраструктура, надежность, доступность. Однако совпадение терминов не означает совпадения исследовательской постановки. После выявления смежных понятийных оснований необходимо разграничить пространственную и классическую логистику. Это различие нельзя сводить к противопоставлению «пространственного» и «непространственного» подходов: современная логистика уже учитывает расстояние, размещение складов и терминалов, конфигурацию маршрутов, время доставки и уровень сервиса [Christopher, 2023]. Принципиальный вопрос связан со статусом пространства в

исследовательской постановке. В классической логистике оно чаще выступает параметром эффективности и координации, тогда как в пространственной логистике – структурой доступа, связанности, инфраструктурной селективности и территориальных последствий. Пространственные условия перемещения определяются не только физической протяженностью маршрута. Экономическая дистанция включает транспортные и транзакционные издержки, качество инфраструктуры и доступ к рынкам, тогда как разобщенность отражает действие границ и институциональных барьеров [World Development ..., 2009; Rodrigue, 2024]. Поэтому одинаковая геометрическая удаленность может соответствовать различным условиям прохождения потока и неодинаковой степени инфраструктурной включенности.

Транспортно- и экономико-географические исследования показывают, что логистические потоки реализуются через сети, узлы, терминалы и коридоры [Hesse, Rodrigue, 2004; Rodrigue, 2012; He et al., 2018]. Однако само наличие таких элементов еще не делает анализ пространственно-логистическим. Для предлагаемой постановки важно не только наличие сети, но и режим прохождения потока: коридорное закрепление, узловая концентрация, инфраструктурные ограничения, пограничные фильтры и различия территориальной связанности. Поэтому табл. 2 фиксирует не противопоставление двух изолированных областей знаний, а различие между операционно-управленческой и пространственно-географической логикой анализа.

Таблица 2
Table 2Классическая и пространственная логистика: различия исследовательской постановки
Classical and spatial logistics: differences in research framing

Аналитический параметр	Классическая логистика	Пространственная логистика
Исследовательский фокус	Управление, координация и оптимизация потоков; обеспечение надежного и эффективного перемещения ресурса	Пространственная конфигурация прохождения потоков через сети, коридоры, узлы и режимы доступа
Роль пространства	Параметр эффективности, размещения и маршрутизации	Структура доступа, связанности и инфраструктурной селективности
Тип пространственности	Операционно измеряемое пространство перемещения, размещения и координации	Структурированное пространство прохождения потоков
Ключевые категории	Издержки, время доставки, маршрут, склад, цепь поставок, уровень сервиса, надежность	Сеть, коридор, узел, режим доступа, инфраструктурная связанность
Инфраструктура	Средство обеспечения движения, надежности и управляемости потока	Механизм организации, фильтрации и селективного включения потоков
Результат анализа	Оптимизация координации, затрат, надежности и уровня сервиса	Выявление пространственных ограничений, режимов доступа и территориальных последствий

Примечание: сопоставление носит аналитический характер. Различие проводится не по факту учета пространства, а по его статусу в исследовательской постановке. Источник: составлено автором на основе сопоставления работ [Graham, Marvin, 2001; Hesse, Rodrigue, 2004; World Development ..., 2009; Бугроменко, 2010; Larkin, 2013; Coe, 2020; Hesse, 2020; Christopher, 2023; Rodrigue, 2024].

Итак, пространственная логистика сохраняет связь с прикладной логистикой через категорию потока, но ее объект смещается с управления перемещением к условиям прохождения через сеть, коридор, узел и режим доступа. Это смещение принципиально: оно переводит поток из плоскости операционной координации в плоскость пространственной организации. Далее необходимо уточнить, каким образом этот ракурс закрепляется в географии транспорта и получает общественно-географическое значение.

Непосредственная дисциплинарная основа пространственной логистики связана с географией транспорта, где сформирован аппарат анализа сетей, маршрутов, узлов, транспортно-географического положения, доступности и связанности [Тархов, 2005; Keeling, 2007; Rodrigue, 2024]. Однако такой ракурс смещает внимание со структуры сети как таковой к режиму прохождения потока внутри нее. Иначе говоря, сеть рассматривается не только как конфигурация линий и узлов, но и как система условий, через которые поток допускается, ограничивается, перераспределяется или исключается.

Общественно-географическое значение подхода возникает тогда, когда инфраструктурно закреплённые потоки анализируются через территориальные различия доступа, включенности, зависимости и периферийности [Бакланов, 2013; Шарыгин, 2017]. Для такой интерпретации важны работы Ю.Н. Гладкого [2014; 2016] и М.Д. Шарыгина [2017], позволяющие трактовать общественно-географическую реальность как систему пространственно организованных общественных связей и территориальных общественных систем.

С этой точки зрения пространственная логистика показывает, что инфраструктурная связанность не является нейтральным техническим свойством сети, поскольку инфраструктура задает не только материальные условия движения, но и режимы доступа, включения и ограничения потоков [Graham, Marvin, 2001; Larkin, 2013]. Такая связанность формирует различные положения территорий в потоковых системах: одни участки получают устойчивый доступ к коридорам и узлам, другие выполняют преимущественно транзитную функцию, третьи остаются в положении ограниченной или зависимой связанности.

Сложившиеся сети, центры, направления потоков и институциональные режимы обладают значительной устойчивостью и ограничивают скорость пространственной перестройки. В региональной географии близкое содержание раскрывается через категории пространственной инерционности, устойчивых барьеров и зависимости от предшествующего пути развития – эффекта колеи (*path dependence*) [Зубаревич, 2017], а в географии транспорта – через долговременное каркасное воздействие капиталоемкой инфраструктуры [Бугроменко, 2010]. В настоящей статье совокупное сопротивление территориальной системы изменению потоков, сетевых конфигураций и условий доступа обозначается понятием «вязкость пространства». Она формируется взаимодействием экономической дистанции, инфраструктурной инерции, институциональных ограничений и устойчивости сложившихся центрo-периферийных связей [World Development ..., 2009; Бугроменко, 2010; Зубаревич, 2017].

Поэтому анализ потоков приобретает общественно-географический смысл только тогда, когда он позволяет выявить не только направление движения, но и пространственные последствия такого включения для территориальной организации, межрегиональных различий и инфраструктурной асимметрии. Такое уточнение важно для дальнейшего перехода к минимальному аналитическому порогу, поскольку именно он фиксирует условия, при которых поток становится объектом пространственно-логистического анализа.

Экономико-географические исследования логистической отрасли также подтверждают, что логистика участвует не только в обслуживании перевозок, но и в пространственной координации производства, распределения и инфраструктурных узлов [Aoyama et al., 2006]. В сочетании с анализом сетевой дифференциации и межгосударственных коридоров это показывает, что переход от описания транспортной конфигурации к объяснению

территориальных последствий требует специальной разграничительной рамки [Graham, Marvin, 2001; Бакланов, 2017; Вардомский, Тураева, 2018].

Такой рамкой в данной статье выступает минимальный аналитический порог пространственно-логистического анализа. Его задача состоит не в том, чтобы заменить существующие направления – географию транспорта, классическую логистику или теорию территориальной организации, – а в том, чтобы указать условия, при которых анализ потока выходит за пределы каждого из них и приобретает собственно пространственно-логистический характер.

При этом предложенный порог не следует понимать как перечень формальных признаков, применимый независимо от масштаба и типа инфраструктуры. Его смысл состоит в фиксации минимальной совокупности условий, без которой анализ сохраняет транспортный, логистический или территориально-организационный характер, но еще не становится пространственно-логистическим. Поэтому каждый признак должен рассматриваться не изолированно, а во взаимной связи с остальными: потоковая привязка задает объект, инфраструктурная обусловленность – материальную среду, режим доступа – механизм включения, территориальный эффект – общественно-географическую интерпретацию.

Особого уточнения требует режим доступа, поскольку именно он отделяет пространственно-логистический анализ от морфологического описания транспортной сети. В данном случае под ним понимается совокупность институциональных, пограничных, правовых, организационных и инфраструктурно-технических условий, определяющих включение, фильтрацию, задержку или исключение потоков, участников и территорий при прохождении через сеть, коридор или узел. Именно через режим доступа сеть перестает быть только морфологической конфигурацией и становится пространственно-институциональной средой прохождения потока. Содержание указанных признаков, их критическая функция и сущностное значение представлены в табл. 3.

Таблица 3
Table 3

Минимальный аналитический порог пространственно-логистического анализа
Minimal analytical threshold for spatial-logistical analysis

Признак	Содержание и критическая функция	Сущностное значение
Потоковая привязка	Поток рассматривается внутри конкретной сети, маршрута, узла или коридора; без этого анализ остается абстрактным описанием перемещения	Задаёт объект анализа: не сеть сама по себе, а пространственно закреплённое прохождение потока
Инфраструктурная обусловленность	Учитываются пропускная способность, узкие места, узловая концентрация и устойчивость инфраструктуры; без этого поток отрывается от материальной конфигурации его прохождения	Показывает зависимость потока от конфигурации инфраструктурной системы и её ограничений
Режим доступа	Учитываются институциональные, пограничные и организационные условия включения потока в сеть, коридор или узел; без этого сеть описывается только морфологически	Выявляет механизмы селективного включения, фильтрации и ограничения доступа к транспортно-логистическим системам
Территориальный эффект	Выявляются различия связанности, периферийности, инфраструктурной включённости и зависимости; без этого анализ остаётся в пределах транспортного описания	Переводит анализ потоков в поле общественной географии и территориальной организации

Примечание: таблица фиксирует не набор произвольных характеристик, а критическую функцию каждого признака и его сущностное значение. Составлено автором.

Табл. 3 показывает, что минимальность аналитического порога определяется не числом признаков, а критической функцией каждого из них. Каждый элемент порога отделяет пространственно-логистический анализ от одного из смежных, но не тождественных уровней исследования: потоковая привязка выводит анализ за пределы абстрактного описания перемещения; инфраструктурная обусловленность – за пределы чисто операционной постановки доставки; режим доступа – за пределы морфологического описания сети; территориальный эффект – за пределы узко транспортного анализа.

Исключение любого элемента возвращает исследование к одному из смежных, но неполных уровней. Поэтому пространственно-логистический анализ начинается там, где поток трактуется как процесс прохождения через конкретную инфраструктурную конфигурацию, режим доступа и связанные с ними территориальные последствия.

Так, пограничный переход в транспортном коридоре может рассматриваться в географии транспорта как элемент сети, в классической логистике – как фактор времени и издержек, а в пространственно-логистическом анализе – как механизм институциональной фильтрации, влияющий на устойчивость прохождения потока и степень инфраструктурной включенности территории. Аналогично крупный транспортный узел выступает не только точкой концентрации и перераспределения, но и элементом селективного доступа, значение которого определяется пропускной способностью, положением в системе межрегиональных связей и режимом включения потоков.

В этом смысле предложенная рамка применима к городским, региональным, коридорным и трансграничным инфраструктурным системам, где движение потока рассматривается через условия инфраструктурного включения, режимы доступа и возникающие территориальные эффекты.

Заключение

Проведенное исследование позволило уточнить дисциплинарное положение пространственной логистики как формируемой субдисциплины в системе географии транспорта и отдельного направления исследований на стыке географии транспорта и общественной географии. Ее специфика определяется не простым добавлением пространственного измерения к логистике, а рассмотрением потока как процесса, закрепленного в конкретной инфраструктурной конфигурации и территориально значимого по своим последствиям.

Основные результаты исследования могут быть обобщены в трех положениях. Во-первых, показано, что пространственная логистика опирается на уже существующие направления исследований – географию транспорта, территориальную логистику, исследования транспортно-логистического пространства и теорию территориальной организации, – но не сводится ни к одному из них. Во-вторых, разграничение пространственной и классической логистики определяется не фактом учета пространства, а его статусом в исследовательской постановке: в классической логистике пространство выступает преимущественно параметром эффективности, размещения и маршрутизации, тогда как в пространственной логистике – структурой доступа, связанности, инфраструктурной селективности и территориальных последствий движения потоков. В-третьих, предложен минимальный аналитический порог пространственно-логистического анализа, включающий четыре взаимосвязанных признака: потоковую привязку, инфраструктурную обусловленность, режим доступа и территориальный эффект.

Научная значимость полученных результатов состоит в том, что предложенная теоретико-концептуальная рамка позволяет точнее отделять пространственно-логистическую постановку от операционного анализа доставки, морфологического описания транспортной сети и общего анализа территориальной организации. Тем самым она связывает транспортно-географическое описание инфраструктуры с общественно-

географическим объяснением территориальных различий, возникающих вокруг потоков, коридоров, узлов и режимов доступа.

Практическая значимость предложенного подхода состоит в возможности использования выделенных аналитических признаков при постановке и интерпретации исследований транспортных коридоров, инфраструктурных узлов, альтернативных маршрутов и протяженных инфраструктурных систем. Их учет позволяет наряду с конфигурацией и пропускной способностью инфраструктуры рассматривать условия доступа, пограничные и институциональные ограничения, устойчивость связей и различия территориальных последствий. Положения пространственно-логистического подхода могут служить концептуальным ориентиром при анализе инфраструктурной включенности территорий, сопоставлении вариантов развития коридоров и рассмотрении пространственных последствий изменения транспортных связей. Перспективной областью дальнейшей конкретизации подхода является исследование международных транспортно-энергетических коридоров и магистрального трубопроводного транспорта, где маршрутная закреплённость потоков, трансграничные режимы доступа и территориальная асимметрия последствий проявляются особенно отчетливо.

Исследование выполнено при поддержке Министерства национального образования Турецкой Республики в рамках стипендиальной программы YLSY (Закон № 1416). Автор выражает благодарность научному руководителю, доктору географических наук, профессору Ю.Н. Гладкому за научные консультации и ценные замечания.

Список источников

- Вардомский Л.Б., Тураева М.О. 2018. Развитие транспортных коридоров постсоветского пространства в условиях современных геополитических и экономических вызовов: научный доклад. Москва, Институт экономики Российской академии наук, 66 с.
- World Development Report 2009: Reshaping Economic Geography. 2009. Washington, DC, World Bank, 383 p. <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-7607-2>.

Список литературы

- Бакланов П.Я. 2013. Подходы и основные принципы структуризации географического пространства. Известия Российской академии наук. Серия географическая, 5: 7–18.
- Бакланов П.Я. 2017. Территориальные социально-экономические системы в региональном развитии. Известия Российской академии наук. Серия географическая, 4: 7–16. <https://doi.org/10.7868/S0373244417040016>.
- Бакланов П.Я. 2019. Территориальная организация и пространственное развитие: соотношение понятий и процессов. В кн.: Геосистемы восточных районов России: особенности их структур и пространственного развития. Владивосток, Дальнаука: 10–16. <https://doi.org/10.35735/tig.2019.32.61.001>.
- Бугроменко В.Н. 2010. Современная география транспорта и транспортная доступность. Известия Российской академии наук. Серия географическая, 4: 7–16.
- Гладкий Ю.Н. 2014. Гуманитарная география: понятийный статус и институционализация. Гуманитарный вектор, 2(38): 158–164.
- Гладкий Ю.Н. 2016. Гуманитарная география как научное знание. М.; Берлин, Директ-Медиа, 544 с.
- Дружинин А.Г. 2022. Развитие российской общественной географии: современные вызовы и опыт прошлого. Географический вестник, 2(61): 17–33. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2022-2-17-33>.
- Зубаревич Н.В. 2017. Развитие российского пространства: барьеры и возможности региональной политики. Мир новой экономики, 2: 46–57.
- Конькова Е.Д. 2012. Территориальная логистика как область логистических исследований в экономике торговли. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент, 44(303): 187–190.

- Нефедова Н.Е. 2015. Современные трансформации предметной области географии транспорта. *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*, 12–8: 17–20.
- Родоман Б.Б. 1999. Территориальные ареалы и сети: очерки теоретической географии. Смоленск, Ойкумена, 256 с.
- Сидоров В.П. 2011. Возможность применения логистики в географии транспорта. *Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле*, 6–2: 139–141.
- Сидоров В.П. 2012. Проблемы отечественной географии транспорта. *Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле*, 4: 149–151.
- Тархов С.А. 2005. Эволюционная морфология транспортных сетей. Смоленск; М., Универсум, 382 с.
- Тархов С.А. 2022. Транспортная освоенность территории и пространственная структура транспортных сетей регионов Азиатской России. В кн.: *Вопросы географии*. М., Медиа-Пресс: 325–360.
- Ханна П. 2019. Коннектография: будущее глобальной цивилизации. Пер. с англ. Э. Кондуковой. М., Манн, Иванов и Фербер, 427 с.
- Хирофуми А. 2024. Транспортно-логистическое пространство в бассейне Японского моря. *Международное сотрудничество евразийских государств: политика, экономика, право*, 1: 48–52.
- Шарыгин М.Д. 2017. Общественная география в России: тернистый путь развития. *Географический вестник*, 2(41): 17–25. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2017-2-17-25>.
- Aoyama Y., Ratick S., Schwarz G. 2006. Organizational Dynamics of the U.S. Logistics Industry: An Economic Geography Perspective. *The Professional Geographer*, 58(3): 327–340. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9272.2006.00571.x>.
- Christopher M. 2023. *Logistics and Supply Chain Management*. 6th ed. Harlow, Pearson, 360 p.
- Coe N.M. 2020. Logistical geographies. *Geography Compass*, 14(10): e12506. <https://doi.org/10.1111/gec3.12506>.
- Graham S., Marvin S. 2001. *Splintering Urbanism: Networked Infrastructures, Technological Mobilities and the Urban Condition*. London; New York, Routledge, 512 p. <https://doi.org/10.4324/9780203452202>.
- He M., Shen J., Wu X., Luo J. 2018. Logistics Space: A Literature Review from the Sustainability Perspective. *Sustainability*, 10(8): 2815. <https://doi.org/10.3390/su10082815>.
- Hesse M. 2020. Logistics: Situating Flows in a Spatial Context. *Geography Compass*, 14(7): e12492. <https://doi.org/10.1111/gec3.12492>.
- Hesse M., Rodrigue J.-P. 2004. The Transport Geography of Logistics and Freight Distribution. *Journal of Transport Geography*, 12(3): 171–184. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.12.004>.
- Keeling D.J. 2007. Transportation Geography: New Directions on Well-Worn Trails. *Progress in Human Geography*, 31(2): 217–225. <https://doi.org/10.1177/0309132507075370>.
- Larkin B. 2013. The Politics and Poetics of Infrastructure. *Annual Review of Anthropology*, 42(1): 327–343. <https://doi.org/10.1146/annurev-anthro-092412-155522>.
- Rodrigue J.-P. 2012. The Geography of Global Supply Chains: Evidence from Third-Party Logistics. *Journal of Supply Chain Management*, 48(3): 15–23. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2012.03268.x>.
- Rodrigue J.-P. 2024. *The Geography of Transport Systems*. New York, Routledge, 402 p. <https://doi.org/10.4324/9781003343196>.

References

- Baklanov P.Ya. 2013. Approaches and General Principles of Structurization of Geographical Space. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 5: 7–18 (in Russian).
- Baklanov P.Ya. 2017. Territorial Socioeconomic Systems in Regional Development. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 4: 7–16 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S0373244417040016>.
- Baklanov P.Ya. 2019. Territorial Organization and Spatial Development: Concepts and Processe. In: *Geosystems of the Eastern Regions of Russia: Features of Their Structures and Spatial Development*. Vladivostok, Publ. Dal'nauka: 10–16 (in Russian). <https://doi.org/10.35735/tig.2019.32.61.001>.

- Bugromenko V.N. 2010. Modern Geography of Transport and Transport Accessibility. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 4: 7–16 (in Russian).
- Gladkiy Yu.N. 2014. Humanitarian Geography: Conceptual Status and Institutionalization. *Humanitarian Vector*, 2(38): 158–164 (in Russian).
- Gladkiy Yu.N. 2016. *Gumanitarnaya geografiya kak nauchnoye znaniye* [Humanitarian Geography as Scientific Knowledge]. Moscow; Berlin, Publ. Direkt-Media, 544 p.
- Druzhinin A.G. 2022. The Development of Russian Human Geography: Current Challenges and Past Experience. *Geographical Bulletin*, 2(61): 17–33 (in Russian). <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2022-2-17-33>.
- Zubarevich N.V. 2017. Development of the Russian Space: Barriers and Opportunities for Regional Policy. *The world of new economy*, 2: 46–57 (in Russian).
- Konkova E.D. 2012. Territorial Logistics as an Area of Research in Trade Economy. *Bulletin of South Ural State University, Series “Economics and Management”*, 44(303): 187–190 (in Russian).
- Nefedova N.E. 2015. *Sovremennyye transformatsii predmetnoy oblasti geografii transporta* [Modern Transformations of the Subject Field of Transport Geography]. *Aktual'nyye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, 12–8: 17–20.
- Rodoman B.B. 1999. *Areas and Networks. Essays of Theoretical Geography*. Smolensk, Publ. Oykumena, 256 p. (in Russian).
- Sidorov V.P. 2011. The Possibility of Applying Logistics in the Geography Transport. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*, 6–2: 139–141 (in Russian).
- Sidorov V.P. 2012. The Problems of Domestic Geography of Transport. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*, 4: 149–151 (in Russian).
- Tarkhov S.A. 2005. *Evolyutsionnaya morfologiya transportnykh setey* [Evolutionary Morphology of Transport Networks]. Smolensk; Moscow, Publ. Universum, 382 p.
- Tarkhov S.A. 2022. *Transportnaya osvoyennost' territorii i prostranstvennaya struktura transportnykh setey regionov Aziatskoy Rossii* [Transport Development of Territory and Spatial Structure of Transport Networks in the Regions of Asian Russia]. In: *Voprosy geografii* [Questions of Geography]. Moscow, Publ. Media-Press: 325–360.
- Khanna P. 2019. *Konnektografiya: budushcheye global'noy tsivilizatsii* [Connectography: Mapping the Future of Global Civilization]. Ed. by E. Kondukova. Moscow, Publ. Mann, Ivanov i Ferber, 427 p.
- Hirofumi A. 2024. A Transport and Logistic Space in the Basin of the Sea of Japan. *International Cooperation of Eurasian States: politics, economics, law*, 1: 48–52 (in Russian).
- Sharygin M.D. 2017. Social Geography in Russia: the Thorny Path of Development. *Geographical Bulletin*, 2(41): 17–25 (in Russian). <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2017-2-17-25>.
- Aoyama Y., Ratick S., Schwarz G. 2006. Organizational Dynamics of the U.S. Logistics Industry: An Economic Geography Perspective. *The Professional Geographer*, 58(3): 327–340. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9272.2006.00571.x>.
- Christopher M. 2023. *Logistics and Supply Chain Management*. 6th ed. Harlow, Pearson, 360 p.
- Coe N.M. 2020. Logistical geographies. *Geography Compass*, 14(10): e12506. <https://doi.org/10.1111/gec3.12506>.
- Graham S., Marvin S. 2001. *Splintering Urbanism: Networked Infrastructures, Technological Mobilities and the Urban Condition*. London; New York, Routledge, 512 p. <https://doi.org/10.4324/9780203452202>.
- He M., Shen J., Wu X., Luo J. 2018. Logistics Space: A Literature Review from the Sustainability Perspective. *Sustainability*, 10(8): 2815. <https://doi.org/10.3390/su10082815>.
- Hesse M. 2020. Logistics: Situating Flows in a Spatial Context. *Geography Compass*, 14(7): e12492. <https://doi.org/10.1111/gec3.12492>.
- Hesse M., Rodrigue J.-P. 2004. The Transport Geography of Logistics and Freight Distribution. *Journal of Transport Geography*, 12(3): 171–184. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.12.004>.
- Keeling D.J. 2007. Transportation Geography: New Directions on Well-Worn Trails. *Progress in Human Geography*, 31(2): 217–225. <https://doi.org/10.1177/0309132507075370>.
- Larkin B. 2013. The Politics and Poetics of Infrastructure. *Annual Review of Anthropology*, 42(1): 327–343. <https://doi.org/10.1146/annurev-anthro-092412-155522>.



Rodrigue J.-P. 2012. The Geography of Global Supply Chains: Evidence from Third-Party Logistics. *Journal of Supply Chain Management*, 48(3): 15–23. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2012.03268.x>.

Rodrigue J.-P. 2024. *The Geography of Transport Systems*. New York, Routledge, 402 p. <https://doi.org/10.4324/9781003343196>.

*Поступила в редакцию 03.06.2026;
поступила после рецензирования 21.07.2026;
принята к публикации 28.08.2026*

*Received June 03, 2026;
Revised July 21, 2026;
Accepted August 28, 2026*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Мафратоглу Мустафа, аспирант кафедры экономической географии, Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, г. Санкт-Петербург, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Mustafa Mafratoglu, postgraduate student, Department of Economic Geography, Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg, Russia