



БелГУ
Белгородский
государственный
национальный
исследовательский
университет

ISSN 2712-7443 (online)

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОСИСТЕМЫ

REGIONAL GEOSYSTEMS

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

2024. Том 48, № 4

16+

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОСИСТЕМЫ

2024. Том 48, № 4

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)

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)

Куролан С.А., доктор географических наук, профессор Воронежского государственного университета (Воронеж, Россия)

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

Недялков М.И., чл.-корр. Академии Наук Молдовы, доктор географических наук, профессор Института экологии и географии Академии Наук Молдовы (Кишинев, Республика Молдова)

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.

Выпускающий редактор Ю.В. Мишенина. Корректура, компьютерная верстка и оригинал-макет Н.А. Вус. Редактор англоязычных текстов Е.С. Данилова. E-mail: goleusov@bsuedu.ru.

Гарнитуры Times New Roman, Arial, Impact. Уч.-изд. л. 16,8. Дата выхода 30.12.2024. Оригинал-макет подготовлен центром полиграфического производства НИУ «БелГУ». Адрес: 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.

СОДЕРЖАНИЕ

- 481 **Архипов Ю.Р., Никонорова И.В., Харитонов Ал.Ю., Харитонов Ан.Ю.**
Анализ доступности первичной медицинской помощи для сельского населения Чувашской Республики
- 494 **Кузьмин В.О., Москаленко О.П.**
Развитие лечебно-оздоровительного туризма в Брянской области
- 503 **Шаев И.А., Пинской В.Н., Ельцов М.В., Борисов А.В.**
Земледельческие террасы в среднегорной зоне Большого Кавказа
- 515 **Шмакова М.В., Турутина Т.В., Лобанов Г.В.**
Динамика кривых распределения крупности продуктов склонового смыва в результате водной эрозии
- 526 **Каличкин В.К., Гарафутдинова Л.В., Федоров Д.С.**
Применение геопространственного искусственного интеллекта для классификации изображений дистанционного зондирования
- 542 **Huang L.**
LULC Dynamics and Carbon Sequestration in Major Iron Ore Regions of Russia and China
- 565 **Артемьева О.В., Алифанов Н.А.**
Картографирование сельскохозяйственных угодий Белгородской области на основе данных дистанционного зондирования
- 578 **Сторожев А.И., Братков В.В.**
Картографирование застройки города Грозного по данным дистанционного зондирования Земли
- 591 **Подрубный Д.Г., Кулаков А.П.**
Особенности формирования экологического каркаса городского округа Балашиха Московской области
- 604 **Скрицкая М.К., Петров Ю.В.**
Формирование сети мониторинга воздействия оленеводства на окружающую среду полуострова Ямал
- 616 **Замулина И.В., Ларина Э.В., Бурачевская М.В., Лацынник Е.С., Минкина Т.М., Манджиева С.С.**
Кислотно-основная буферность почв разного гранулометрического состава в условиях загрязнения тяжелыми металлами
- 628 **Боровлев А.Э., Кайдалова А.С., Киреева-Гененко И.А.**
К вопросу обезвреживания и утилизации илового осадка очистных сооружений молочного производства

REGIONAL GEOSYSTEMS

2024. Volume 48, No. 4

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 introduced in Russian Science Citation Index (PML).

Founder: Federal state autonomous educational establishment of higher education «Belgorod National Research University».

Publisher: Belgorod National Research University «BelSU».

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

EDITORIAL BOARD OF JOURNAL

Chief Editor

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

Issuing Editor

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

Responsible Secretary

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

Members of Editorial Board:

Aleksandr N. Vitchshenko, 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)

Maria I. Nedelcov, Member corr. Academy of Sciences of Moldova, Doctor, professor, (Institute of Ecology and Geography ASM, Chişinău Municipality, Republica of Moldova)

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 (BSU, 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.

Commissioning Editor Yu.V. Mishenina. Pag Proofreading, computer imposition, page layout by N.A. Vus. English text editor E.S. Danilova. E-mail: goleusov@bsuedu.ru. Typefaces Times New Roman, Arial, Impact. Publisher's signature 16,8. Date of publishing 30.12.2024. Dummy layout has been prepared by Belgorod National Research University Centre of Polygraphic Production. Address: 85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia

CONTENTS

- 481 **Arkhipov Yu.R., Nikonorova I.V., Kharitonov A.I.Y., Kharitonov An.Y.**
Analysis of Primary Health Care Availability for the Rural Population of the Chuvash Republic
- 494 **Kuzmin V.O., Moskalenko O.P.**
Development of Health and Wellness Tourism in the Bryansk Region
- 503 **Shaev I.A., Pinsky V.N., Eltsov M.V., Borisov A.V.**
Agricultural Terraces in the Mid-Mountain Zone of the Greater Caucasus
- 515 **Shmakova M.V., Turutina T.V., Lobanov G.V.**
Dynamics of Various Size Particle Distribution in Slope Washout Products
- 526 **Kalichkin V.K., Garafutdinova L.V., Fedorov D.S.**
The Use of Geospatial AI for Remote Sensing Image Classification
- 542 **Huang L.**
LULC Dynamics and Carbon Sequestration in Major Iron Ore Regions of Russia and China
- 565 **Artemeva O.V., Alifanov N.A.**
Compiling of Agricultural Lands in the Belgorod Region Based on Remote Sensing Data
- 578 **Storozhev A.I., Bratkov V.V.**
Compilation and Registration of Grozny Urban Development Map According to Remote Sensing Data
- 591 **Podrubny D.G., Kulakov A.P.**
Features of the Ecological Framework Formation in Balashikha Urban District, Moscow Oblast
- 604 **Skritskaya M.K., Petrov Yu.V.**
Formation of a Network for Monitoring the Impact of Reindeer Herding on the Environment of the Yamal Peninsula
- 616 **Zamulina I.V., Larina E.V., Burachevskaya M.V., Lacynnik E.S., Minkina T.M., Mandzhieva S.S.**
Acid-Base Buffering of Soils with Different Granulometric Composition in the Conditions of Heavy Metal Pollution
- 628 **Borovlev A.E., Kaidalova A.S., Kireeva-Genenko I.A.**
To the Issue of Neutralization and Disposal of Sludge from Dairy Wastewater Treatment Plants



УДК 554.1:711.13(470.344)
DOI 10.52575/2712-7443-2024-48-4-481-493

Анализ доступности первичной медицинской помощи для сельского населения Чувашской Республики

Архипов Ю.Р.,¹ Никонорова И.В.,² Харитонов Ал.Ю.,¹ Харитонов Ан.Ю.

¹Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,
Россия, 428000, г. Чебоксары, Московский пр-т, 15

²Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18

E-mail: andreykh97@mail.ru, niko-inna@yandex.ru, ComradeAlexander@yandex.ru

Аннотация. В статье проанализирована ситуация с доступностью первичных медицинских услуг на территории Чувашской Республики за 2019 год в разрезе врачебных участков. Данное исследование включает в себя анализ кадровой обеспеченности медицинским персоналом и территориальную (географическую) доступность медицинских учреждений, предоставляющих услуги по первичной медицинской помощи населению республики. Показатели сформированы в матрицы, которые впоследствии были сложены, и вычислена комплексная доступность первичной медико-санитарной помощи. При вычислении кадровой доступности брались в расчет не только количество специалистов, но и заболеваемость, на основе которой была выявлена вероятная загруженность медицинских работников. Территориальная доступность учитывает качество дорожного полотна, данный показатель рассчитывается путем просмотра средней скорости автомобилей на дорогах, которые связывают центры обслуживания. Численность населения, прикрепленного к врачебным участкам, была получена непосредственно в центральных районных больницах республики.

Ключевые слова: первичная медицинская помощь, муниципальный район, обеспеченность медицинской помощью, географическая доступность медицинской помощи, оценка доступности медицинской помощи, Чувашская Республика

Для цитирования: Архипов Ю.Р., Никонорова И.В., Харитонов Ал.Ю., Харитонов Ан.Ю. 2024. Анализ доступности первичной медицинской помощи для сельского населения Чувашской Республики. Региональные геосистемы, 48(4): 481–493. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-481-493

Analysis of Primary Health Care Availability for the Rural Population of the Chuvash Republic

Yuri R. Arkhipov,¹ Inna V. Nikonorova,² Alexander Y. Kharitonov,¹

Andrey Y. Kharitonov,

I.N. Ulyanov Chuvash State University
15 Moskovsky Ave, Cheboksary 428000, Russia

Kazan (Volga region) Federal University,
18 Kremlevskaya St, Kazan 420008, Russia

E-mail: andreykh97@mail.ru, niko-inna@yandex.ru, ComradeAlexander@yandex.ru

Abstract. The article analyzes the availability of primary healthcare services in health districts of the Chuvash Republic in 2019. This study includes an analysis of the medical personnel staffing and the territorial (geographical) accessibility of medical institutions providing primary healthcare services to the population of the republic. The indicators were formed into matrices, which were subsequently added together, and the comprehensive availability of primary health care was calculated. Staffing availability was calculated based on the number of workers and the morbidity rate, the latter allowing to estimate



probable workload of healthcare specialists. Territorial accessibility takes into account the quality of the road surface. This indicator is calculated by looking at the average speed of vehicles on the roads that connect the service centers. The number of people assigned to health districts was obtained directly from central district hospitals of the republic.

Keywords: primary health care, municipal district, health care provision, geographical accessibility of health care, assessment of health care accessibility, Chuvash Republic

For citation: Arkhipov Yu.R., Nikonorova I.V., Kharitonov Al.Y., Kharitonov An.Y. 2024. Analysis of Primary Health Care Availability for the Rural Population of the Chuvash Republic. *Regional Geosystems*, 48(4): 481–493. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-481-493

Введение

Доступность первичной медицинской помощи является одним из ключевых индикаторов состояния системы здравоохранения региона, что наиболее важно для жителей отдаленных от центра обслуживания, периферийных, муниципальных районов (ныне муниципальных округов). Система медицинских учреждений республики имеет многоуровневую и иерархичную структуру: республиканская клиническая больница (РКБ), межтерриториальный медицинский центр (ММЦ), центральные районные больницы (ЦРБ), районные (участковые) больницы (РБ), врачебные амбулатории (ВА), отделения общей врачебной практики (ООВП), фельдшерско-акушерские пункты, домовые хозяйства [Медорганизации ..., 2024]. В качестве центров обслуживания в данной работе выступают: РКБ, ММЦ, ЦРБ, РБ, ВА, ООВП. Под доступностью медицинской помощи подразумевается: кадровая обеспеченность, географическая, финансово-экономическая, информационная доступности. Существует всего 4 вида медицинской помощи. В данной работе рассматривается доступность первичной медицинской помощи, которая включает в себя мероприятия по профилактике, диагностике, лечению заболеваний, медицинской реабилитации, наблюдению за течением беременности, формированию здорового образа жизни и санитарно-гигиеническому просвещению населения [Об основах охраны ..., 2024].

Методы, примененные в работе, были созданы на основе разработок Алексева А.И., Ковалева С.В., Ткаченко А.А. [1988; 1991]. Непосредственно в работе применен метод, впервые использованный Архиповым Ю.Р. в соавторстве с Харитоновым А.Ю. [2019]. В процессе выполнения работы активно использовались наработки в области медицинской науки [Акопов, 2017; Лисицына, 2010; Муравьева и др., 2017]. А также применены работы отечественных специалистов в области сферы обслуживания [Микалючик, 1972; Покшишевский, 1972; Moskvicheva, Polinov, 2021; Oshkordina et al., 2024]. Кроме того, использовались труды ряда зарубежных специалистов [Franco et al., 2021; Gizaw et al., 2022]. Данное исследование является продолжением серии работ по анализу территориальной доступности первичной медицинской помощи населению Чувашской Республики [Архипов, Харитонов, 2019; 2020; Харитонов, 2021].

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются врачебные участки на территории Чувашии. В пределах республики выделено РКБ, ММЦ, а также 7 РБ, 20 ЦРБ и 240 врачебных участков (ВА, ООВП, терапевтические участки). РКБ является главным медицинским центром на территории Чувашии. Также на территории республики имеется промежуточный между РКБ и ЦРБ медицинский центр – это Шумерлинский ММЦ. Данное учреждение обеспечивает медицинскую помощь юго-западной части Чувашской Республики, а именно Шумерлинский, Порецкий, Алатырский, Аликовский, Вурнарский и Красночетайский районы. Районные больницы имеются в Вурнарском (1), Моргауш-

ском (2), Цивильском (1), Чебоксарском (2) районах, а в Порецком – крупнейшим центром обслуживания является РБ, филиал Шумерлинского ММЦ. ЦРБ Красноармейского района выступает в качестве филиала больницы скорой медицинской помощи. Как правило, ареалом обслуживания ЦРБ являются границы муниципальных районов. Авторами к сельским населенным пунктам приравнены города, не имеющие статус городов республиканского значения.

Анализ проводится в разрезе врачебных участков, т. е. зоны обслуживания ВА, ООВП и терапевтических участков на территории республики. Данные об их численности получены непосредственно в ЦРБ, к которым они прикреплены. А также в качестве вспомогательного инструмента выступали статистические материалы, выпущенные Чувашстатом [Статистический ежегодник..., 2019; Численность населения..., 2019]. Основные классы заболеваний выделены на основе МКБ-10, анализ проведен с использованием показателей, представленных в сборнике Росстата, который выделил 16 классов заболеваний [МКБ 10..., 2024]. Данные о заболеваемости получены из статистического сборника «Чувашия в цифрах» [Чувашия в цифрах ..., 2019].

Уровень доступности первичной медицинской помощи для населения муниципальных районов оценивался поэтапно. Все действия, произведенные для вычисления показателя, пошагово расписаны ниже.

Сначала, основываясь на данных о численности населения врачебных участков и количестве врачей разного профиля в медицинских учреждениях, по врачебным участкам определяется обеспеченность населения врачами.

Следующий этап посвящен определению доли вклада врачей разного профиля при лечении тех или иных заболеваний. Нами был применен метод экспертной оценки, в опросе участвовали опытные медицинские работники с большим стажем работы.

На третьем этапе вычисляется обеспеченность населения врачебных участков каждым видом медицинской помощи. Обеспеченность населения определенного врачебного участка медицинской помощью вычисляется как средневзвешенная величина. В качестве весовых коэффициентов выступают доли участия врачей в оказании данной медицинской помощи.

Далее необходимо по каждому населенному пункту дать комплексную оценку обеспеченности населения всеми видами медицинской помощи как средневзвешенную величину. Здесь в качестве весовых коэффициентов выступают доли заболеваемости по каждому типу болезней.

На пятом этапе определяется географическая доступность для каждого врача определенного профиля в зависимости от его местонахождения, т. е. время преодоления дистанции в минутах от каждого поселения до врача. Используется следующая формула:

$$GD_{ij} = \frac{1}{(1 + t_{ij})},$$

где GD_{ij} – географическая доступность j -го врача населением i -го населенного пункта, t_{ij} – время, затрачиваемое на преодоление расстояния в минутах от i -го поселения до местонахождения j -го врача.

На шестом этапе для каждого населенного пункта вычисляется географическая доступность каждого вида медицинской помощи как средневзвешенная величина по степени участия врачей в оказании медицинской помощи.

На седьмом этапе вычисляется комплексная оценка географической доступности всех видов медицинской помощи по каждому врачебному участку, где географические доступности отдельных видов медицинской помощи взвешиваются по степени разных видов болезней.



Комплексная оценка доступности медицинской помощи определяется сочетанием двух показателей: обеспечение медицинской помощью и её географической доступностью

$$D_i = \sqrt{O_i \cdot GD_i},$$

где D_i , O_i , GD_i – оценка доступности, обеспеченности и географической доступности медицинской помощи для населения i -го населенного пункта.

Оценки O_i , GD_i предварительно должны быть нормализованы, так как они имеют разные единицы измерения. При нормализации применялась следующая формула:

$$y_i = \frac{x_i}{\bar{x}},$$

где x_i – исходное значение, \bar{x} – среднее значение исходных данных, y_i – нормализованное значение.

Нормализованное значение показателя D_i имеет определенные функции. Если $D_i \approx 1$, то население i -го населенного пункта имеет приблизительно среднюю по данному району доступность. При $D_i > 1$ население i -го населенного пункта имеет доступность выше, а при $D_i < 1$, доступность для населения i -го поселения ниже, чем в среднем по району.

Показатель D_i позволяет провести классификацию населенных пунктов и выявить территориальную дифференциацию муниципальных районов по степени доступности медицинской помощи [Архипов Ю.Р., Харитонов А.Ю., 2019].

Результаты и их обсуждение

Сначала рассматривается обеспеченность первичной медицинской помощью (кадровой доступностью) 383450 человек. 169206 жителей республики имеют очень низкий уровень обеспеченности, 187901 – низкий, 21776 – средний, 2705 – высокий, 1862 – очень высокий. Если эти показатели отобразить в соотношении количества врачебных участков и уровня из обеспеченности, то наблюдается такая картина: очень низкий уровень – 77 участков, низкий – 141, средний – 19, высокий – 3 и очень высокий – 4. На основании этих данных можно сделать вывод, что основная часть населения и врачебных участков находится в пределах низкой и очень низкой обеспеченности первичной медицинской помощью. К более высоким уровням можно отнести всего 6,88 % населения (табл.1).

Таблица 1
Table 1

Классификация врачебных участков по степени обеспеченности
 первичной медицинской помощью
 Classification of health districts according to the degree of primary health care provision

Уровень обеспеченности	Численность населения		Количество врачебных участков	
	чел.	%	шт.	%
Очень низкий	169206	44,12	77	31,56
Низкий	187901	49,00	141	57,79
Средний	21776	5,68	19	7,79
Высокий	2705	0,71	3	1,23
Очень высокий	1862	0,49	4	1,64

Очень высокий и высокий уровень обеспеченности населения медицинской помощью характерен лишь для населения, прикрепленного к Шумерлинскому ММЦ, Аликовской ЦРБ и Алатырской ЦРБ. Это связано с тем, что они расположены в ареале обслужи-

вания Шумерлинского ММЦ, а также с довольно высокой плотностью охвата врачебных участков. Кроме того, стоит отметить, что в данной категории находятся врачебные участки муниципальных центров.

Населения, проживающего в пределах территорий, где наблюдается средняя кадровая обеспеченность, значительно больше. Практически все население, прикрепленное к Аликовской ЦРБ, расположено в пределах данной зоны обслуживания. Относительно высокая доля населения со средней обеспеченностью медицинской помощи в Красночетайском и Шумерлинском (Порецком) районах. Также здесь представлена небольшая доля населения, прикрепленного к Алатырской, Вурнарской, Козловской, Моргаушской, Чебоксарской ЦРБ и Шемуршинскому ММЦ. Для представителей данной зоны характерна высокая степень охвата врачебными участками или низкая численность и плотность населения. Также, как и в случае с категориями с высокой и очень высокой обеспеченностью, здесь представлены врачебные участки с крупными медицинскими центрами.

Наиболее широко представлены зоны с низкой и очень низкой обеспеченностью. Здесь проживает 93,13 % сельского населения республики. В категорию с низкой обеспеченностью не вошли врачебные участки лишь Аликовского района. Население, прикрепленное к Шемуршинской, Ядринской и Комсомольской ЦРБ, представлено в пределах от 80 % до 91 %. Также высокая доля населения в данной категории проживает в зоне обслуживания Батыревской, Вурнарской, Мариинско-Посадской и Цивильской ЦРБ.

Очень низкая обеспеченность медицинскими услугами в области обслуживания Ибресинской и Чебоксарской ЦРБ, где данный показатель на уровне 87 % и более. Также в Алатырском и Канашском районах наблюдается картина, где более 70 % населения остаются без должной медицинской помощи. Подобная тенденция наиболее характерна для районов, где очень высокая или очень низкая плотность населения, т. е. мощности медицинских учреждений недостаточно в данных областях обслуживания. Ниже представлена табл. 2, где показана ситуация с кадровой обеспеченностью по ареалам обслуживания всех ЦРБ Чувашской Республики.

Таблица 2
Table 2Уровень обеспеченности первичной медицинской помощью
The level of primary health care provision

ЦРБ	Очень низкий		Низкий		Средний		Высокий		Очень высокий	
	чел.	%	чел.	%	чел.	%	чел.	%	чел.	%
Алатырская	19604	72,92	5941	22,10	759	2,82	580	2,16	0	0
Аликовская	0	0	0	0	10998	88,87	1377	11,13	0	0
Батыревская	7438	26,22	20927	73,78	0	0	0	0	0	0
Вурнарская	3347	19,64	12689	74,44	1009	5,92	0	0	0	0
Ибресинская	17500	92,91	1336	7,09	0	0	0	0	0	0
Канашская	24659	71,67	9745	28,33	0	0	0	0	0	0
Козловская	8850	58,71	5460	36,22	764	5,07	0	0	0	0
Комсомольская	3252	17,27	15576	82,73	0	0	0	0	0	0
Красноармейская	6072	54,91	4986	45,09	0	0	0	0	0	0
Красночетайская	2477	20,17	6386	51,99	3420	27,84	0	0	0	0
Мариинско-Посадская	4526	29,17	10991	70,83	0	0	0	0	0	0
Моргаушская	9637	39,79	13620	56,23	963	3,98	0	0	0	0
Урмарская	6057	36,28	10636	63,72	0	0	0	0	0	0



Окончание таблицы 2
End of the table 2

Цивильская	6716	27,03	18130	72,97	0	0	0	0	0	0
Чебоксарская	31456	87,30	3686	10,23	889	2,47	0	0	0	0
Шемуршинская	0	0	9055	90,55	945	9,45	0	0	0	0
Шумерлинская (Порецкая)	3531	27,97	4455	35,29	2029	16,07	748	5,92	1862	14,75
Ядринская	3330	15,81	17736	84,19	0	0	0	0	0	0
Яльчикская	4737	32,39	9888	67,61	0	0	0	0	0	0
Янтиковская	6017	47,47	6658	52,53	0	0	0	0	0	0
Всего	169206	–	187901	–	21776	–	2705	–	1862	–

На следующем этапе исследования рассматривается территориальная или географическая доступность первичной медицинской помощи. Ситуация с географической доступностью несколько более позитивная. Наиболее распространенными являются категории с очень низкой обеспеченностью, куда входит 69,23 % населения республики. Суммарно в группе врачебных участков с низкой и средней доступностью проживает 26,92 % населения. Высокие и очень высокие показатели характерны для 3,85 % населения (табл. 3).

Очень высокая и высокая доступность наблюдается в следующих районах обслуживания: Мариинско-Посадский, Урмарский, Цивильский, Янтиковский. В муниципальных центрах всех вышеперечисленных районов имеется густая сеть терапевтических участков, которые позволяют сохранять высокую доступность медицинских учреждений, а также стоит учесть, что сюда входит население, прикрепленное к врачебным участкам внутри муниципального центра.

В категории со средней доступностью первичной медицинской помощи представлено 7 зон обслуживания ЦРБ. Отдельно стоит отметить Канашский, Козловский и Ядринский районы, где данный показатель выше 40 %. Это также районы, за исключением Канашского муниципального района, где имеются города, которые учтены в ходе выполнения работы.

Низкие показатели доступности характерны для Комсомольской ЦРБ, где показатель на уровне 72,21 %. А также в данной категории широко представлены зоны обслуживания Ибресинской и Красноармейской ЦРБ

Таблица 3
Table 3

Классификация врачебных участков по степени географической доступности
первичной медицинской помощи
Classification of health districts according to the degree of geographical
accessibility of primary health care

Уровень обеспеченности	Численность населения		Количество врачебных участков	
	чел.	%	шт.	%
Очень низкий	263379	69,23	176	72,13
Низкий	63351	16,65	39	15,98
Средний	39048	10,27	17	6,97
Высокий	10021	2,63	9	3,69
Очень высокий	4629	1,22	3	1,23

Последней категорией является территория с очень низкой доступностью. Именно в данную группу входит более 50 % населения республики. При рассмотрении данной категории особое внимание стоит уделить Алатырской, Чебоксарской, Яльчикской, Аликовской и Вурнарской ЦРБ. В зонах обслуживания данных ЦРБ показатель колеблется от 89,5 % до 92,8 %. В Аликовском и Яльчикском районах, несмотря на небольшую площадь, отмечается недостаток врачей разного профиля из-за нехватки медицинских учреждений. В Алатырском районе в принципе тяжело построить оптимизированную сеть по обеспечению медицинской помощью, так как низкая плотность населения, а также сильно застроенная территория делают сельские поселения труднодоступными. В случае с Вурнарским и Чебоксарским районами наблюдается проблема высокой плотности населения и даже, несмотря на широкую сеть медицинских учреждений, их не достаточно для полного покрытия территории медицинскими услугами (табл. 4).

Таблица 4
Table 4Уровень географической доступности первичной медицинской помощи
The level of geographical accessibility of primary health care

ЦРБ	Очень низкий		Низкий		Средний		Высокий		Очень высокий	
	чел.	%	чел.	%	чел.	%	чел.	%	чел.	%
Алатырская	26884	100	0	0	0	0	0	0	0	0
Аликовская	11180	90,34	1195	9,66	0	0	0	0	0	0
Батыревская	18636	65,70	9729	34,30	0	0	0	0	0	0
Вурнарская	15262	89,54	1783	10,46	0	0	0	0	0	0
Ибресинская	8909	47,30	8513	45,20	1414	7,51	0	0	0	0
Канашская	19525	56,75	0	0	14879	43,25	0	0	0	0
Козловская	6664	44,21	0	0	8410	55,79	0	0	0	0
Комсомольская	5232	27,79	13596	72,21	0	0	0	0	0	0
Красноармейская	6590	59,59	4468	40,41	0	0	0	0	0	0
Красночетайская	7777	63,32	4506	36,68	0	0	0	0	0	0
Мариинско-Посадская	9707	62,56	2788	17,97	0	0	3022	19,48	0	0
Моргаушская	16977	70,09	5775	23,84	1468	6,06	0	0	0	0
Урмарская	12260	73,44	0	0	0	0	1308	7,84	3125	18,72
Цивильская	16133	64,93	0	0	0	0	8713	35,07	0	0
Чебоксарская	33419	92,75	1072	2,98	1540	4,27	0	0	0	0
Шемуршинская	5835	58,35	1416	14,16	2749	27,49	0	0	0	0
Шумерлинская (Порецкая)	9094	72,03	3531	27,97	0	0	0	0	0	0
Ядринская	12478	59,23	0	0	8588	40,77	0	0	0	0
Яльчикская	13313	91,03	1312	8,97	0	0	0	0	0	0
Янтиковская	7504	59,20	3667	28,93	0	0	0	0	1504	11,87
Всего	263379	–	63351	–	39048	–	13043	–	4629	–



Комплексная доступность первичной медицинской помощи. 55,55 % населения Чувашии находится в пределах очень низкой доступности. За исключением данной категории, широко представлены территории с низкой и средней доступностью. Врачебные участки с очень высокой обеспеченностью практически не представлены, в данной зоне проживает всего 0,81 % населения республики (табл. 5).

Таблица 5
 Table 5

Классификация врачебных участков Чувашской Республики по степени комплексной доступности первичной медицинской помощи
 Classification of health districts in the Chuvash Republic according to the degree of comprehensive accessibility of primary health care

Уровень доступности	Численность населения		Количество врачебных участков	
	чел.	%	шт.	%
Очень низкий	213021	55,55	134	54,92
Низкий	74420	19,41	54	22,13
Средний	65216	17,01	34	13,93
Высокий	27668	7,22	20	8,20
Очень высокий	3125	0,81	2	0,82

Очень высокий уровень комплексной обеспеченности медицинской помощи наблюдается только в Урмарском районе. Подобная картина сложилась вследствие высокой степени географической доступности городских врачебных участках. Высокий уровень доступности зафиксирован в следующих зонах обслуживания: Батыревская, Козловская, Мариинско-Посадская, Урмарская, Цивильская, Шемуршинская, Ядринская и Янтиковская ЦРБ. Основную роль сыграли врачебные участки, которые расположены в зонах с низкой доступностью. Подобная картина сложилась из-за того, что в других районах огромное количество поселений в зоне очень низкой доступности. Также существует дифференциация и по факторам, так как для Батеревской и Ядринской ЦРБ ключевую роль сыграла кадровая доступность. Если же речь заходит об остальных муниципальных районах, то тут уже основным фактором является географическая доступность. В зоне средней доступности представлены Канашский и Козловский, а также Ядринский районы.

Низкая доступность характерна для зон обслуживания Аликовской и Комсомольской ЦРБ. В Аликовском районе наблюдается высокая кадровая обеспеченность, однако крайне низкая географическая доступность. В Комсомольском районе оба показателя превалируют над остальными, вследствие этого и сложился данный результат. Отмечаются минимальные показатели комплексной доступности в зоне обслуживания Алатырской и Чебоксарской ЦРБ. Очевидно, что данная картина сложилась вследствие низкой географической, так и кадровой доступности. Кроме того стоит отметить Яльчикский район. Здесь ситуация немного иная, несмотря на средние показатели кадровой доступности, географическая портит картину. Вероятнее всего подобная ситуация сложилась из-за того, что муниципальный центр находится на окраине района, что затрудняет посещение врачей узкой специализации населению из окраин района. Далее описываются кластер районов (низкая доступность характерна для более половины жителей), где очень низкая географическая доступность, хоть и кадровая доступность относительно высокая, что подтверждает нашу теорию о высокой важности территориальной доступности. В данный

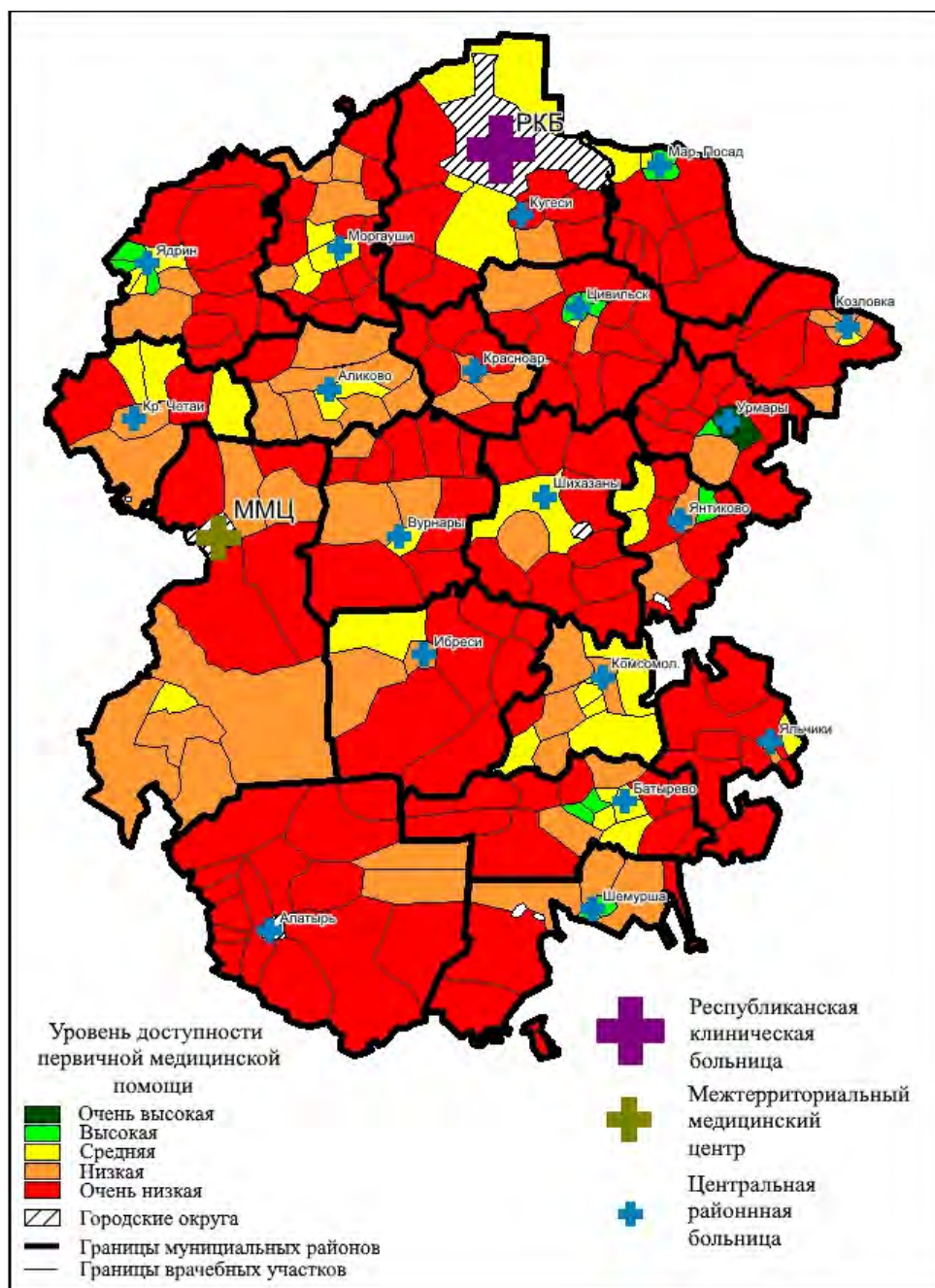
кластер входят следующие зоны обслуживания: Батыревская, Вурнарская, Канашская, Красноармейская, Мариинско-Посадская, Моргаушская, Урмарская, Цивильская, Янтиковская ЦРБ (табл. 6).

Результаты по доступности первичной медицинской помощи во врачебных участках Чувашской Республики продемонстрированы на рисунке.

Таблица 6
Table 6

Классификация врачебных участков Чувашской Республики по степени комплексной доступности первичной медицинской помощи в муниципальных районах
Classification of health districts of the Chuvash Republic according to the degree of comprehensive accessibility of primary health care in municipal areas

ЦРБ	Очень низкий		Низкий		Средний		Высокий		Очень высокий	
	чел.	%	чел.	%	чел.	%	чел.	%	чел.	%
Алатырская	25545	95,02	1339	4,98	0	0	0	0	0	0
Аликовская	1192	9,63	8611	69,58	2572	20,78	0	0	0	0
Батыревская	14530	51,23	4106	14,48	7047	24,84	2682	9,46	0	0
Вурнарская	11441	67,12	3821	22,42	1783	10,46	0	0	0	0
Ибресинская	8909	47,30	8513	45,20	1414	7,51	0	0	0	0
Канашская	17965	52,22	1560	4,53	14879	43,25	0	0	0	0
Козловская	5900	39,14	764	5,07	2652	17,59	5758	38,20	0	0
Комсомольская	1281	6,80	12028	63,88	5519	29,31	0	0	0	0
Красноармейская	6590	59,59	4468	40,41	0	0	0	0	0	0
Красночетайская	3953	32,18	3824	31,13	4506	36,68	0	0	0	0
Мариинско-Посадская	9707	62,56	0	0	2788	17,97	3022	19,48	0	0
Моргаушская	13273	54,80	5172	21,35	5775	23,84	0	0	0	0
Урмарская	10593	63,46	1667	9,99	0	0	1308	7,84	3125	18,72
Цивильская	13473	54,23	2660	10,71	1857	7,47	6856	27,59	0	0
Чебоксарская	31563	87,60	1856	5,15	2612	7,25	0	0	0	0
Шемуршинская	3287	32,87	3964	39,64	0	0	2749	27,49	0	0
Шумерлинская (Порецкая)	5345	42,34	3749	29,70	3531	27,97	0	0	0	0
Ядринская	9791	46,48	2687	12,76	4799	22,78	3789	17,99	0	0
Яльчикская	12162	83,16	1151	7,87	1312	8,97	0	0	0	0
Янтиковская	6521	51,45	2480	19,57	2170	17,12	1504	11,87	0	0
Всего	213021	–	74420	–	65216	–	27668	–	3125	–



Уровень доступности первичной медицинской помощи
во врачебных участках Чувашской Республики
The level of accessibility of primary health care in health districts of the Chuvash Republic

Заключение

При подведении итогов выяснилось, что одну из ключевых ролей играет качество дорожного покрытия на территории обслуживания врачебных участков. В районах, расположенных вблизи республиканского центра или пересекаемых крупной дорожной сетью, наблюдается более высокая территориальная доступность первичной медицинской помощи. В первую очередь это характерно для северо-восточной части республики, где средние показатели кадровой обеспеченности компенсируются высокой транспортной доступностью.

Стоит упомянуть о серьезном перекосе обеспеченности медицинскими кадрами в сторону негативных показателей, т. е. низкая и очень низкая обеспеченность, где проживает более 90 % населения республики (за исключением городских округов).

Не менее серьезный перекося наблюдается и при анализе географической доступности. Чуть более 69 % населения проживает на территории с очень низкой и около 17 % – с низкой доступностью, т. е. 85 % населения расположено на территории с низкой и очень низкой доступностью.

Если рассматривать комплексную доступность первичной медицинской помощи, т. е. заострить внимание на мультипликативном показателе, то результаты более оптимистичны. Всего около 56 % населения проживает на территории с очень низкой и чуть более 19 % – низкой доступностью. Суммарно почти 75 %. Сюда в основном входят районы со слаборазвитой инфраструктурой. В зоне высокой и очень высокой – чуть более 8 % населения изучаемой территории. Это чаще всего врачебные участки, расположенные в административных центрах с доступом к автомобильным дорогам федерального значения.

Наблюдается крайне высокий уровень дифференциации доступности медицинской помощи для жителей административных центров и поселений, не имеющих подобных функций. Такая картина образовалась вследствие упразднения большого количества участковых больниц в муниципальных районах, что привело к уменьшению количества медицинских работников в периферийных районах. Также стоит упомянуть о продолжительном и поэтапном процессе оптимизации системы здравоохранения, которая привела к образованию высокого уровня поляризации центра и периферии. Кроме того, муниципальные центры являются не самым привлекательным местом для продолжения карьеры и вследствие этого в муниципальных районах имеются трудности с привлечением молодых специалистов.

Список источников

- Акопов В.И. 2017. Медицинское право: учебник и практикум для вузов. Москва, Издательство Юрайт, 287 с.
- Алексеев А.И., Ковалев С.В., Ткаченко А.А. 1988. География сферы обслуживания. Калинин, Издательство Калинин, 84 с.
- Алексеев А.И., Ковалев С.В., Ткаченко А.А. 1991. География сферы обслуживания: основные понятия и методы. Тверь, Тверской государственный университет, 117 с.
- Лисицын Ю.П. 2010. Общественное здоровье и здравоохранение. Москва, ГЭОТАР-Медиа, 2010. 512 с.
- Медорганизации. Электронный ресурс. URL: <https://www.med.cap.ru/lpu> (дата обращения: 28.08.2024).
- МКБ 10 – Международная классификация болезней 10-го пересмотра. Электронный ресурс. URL: <https://mkb-10.com> (дата обращения: 28.08.2024).
- Муравьева В.Н., Максименко Л.Л., Хрипунова А.А. 2017. Организация медицинской помощи в Российской Федерации. Ставрополь, Изд-во СтГМУ, 85 с.
- Статистический ежегодник Чувашской Республики. 2019. Электронный ресурс. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/12994> (дата обращения: 24.08.2019).
- Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации: Федеральный закон №323-ФЗ от 21.11.2011. Электронный ресурс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_121895/ (дата обращения: 28.08.2024).
- Численность населения чувашской республики по муниципальным образованиям на 1 января 2019: Статистический сборник. Чебоксары, Чувашстат, 82 с.
- Чувашия в цифрах. 2019. Чебоксары, Чувашстат, 210 с.

Список литературы

- Архипов Ю.Р., Харитонов А.Ю. 2019. Территориальный анализ доступности первичной медицинской помощи населению муниципального района (на примере Чувашской



- Республики). В кн.: Геопространственные исследования общественных и природных систем: теория и практика. Чебоксары, Издательский дом «Среда»: 13–17.
- Архипов Ю.Р., Харитонов А.Ю. 2020. Территориальный анализ доступности медицинской помощи населению Чувашской Республики. В кн.: Науки о Земле: от теории к практике (Арчиловские чтения – 2020). Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 175-летию Русского географического общества и 95-летию со дня рождения доктора географических наук, профессора Е.И. Арчилова, Чебоксары, 05–08 ноября 2020. Чебоксары, Издательский дом «Среда»: 275–280.
- Микалючика Л.Б. 1972. Картографическое изучение географии медицинского обслуживания сельского населения. В кн.: География сферы обслуживания. Вопросы географии. Под ред. Покшишевского В.В. Москва, Мысль: 145–157.
- Покшишевский В.В. 1972. География обслуживания, ее предмет, содержание и место среди экономико-географических дисциплин. В кн.: География сферы обслуживания. Вопросы географии. Москва, Мысль: 6–26.
- Харитонов А.Ю. 2021. Территориальный анализ доступности первичной медицинской помощи населению Чувашской республики. В кн.: Географическое изучение территориальных систем. Материалы XV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Пермь, 11–12 мая 2021. Пермь, Пермский государственный национальный исследовательский университет: 87–93.
- Franco C.M., Lima J.G., Giovanella L. 2021. Primary Healthcare in Rural Areas: Access, Organization, and Health Workforce in an Integrative Literature Review. *Cad Saude Publica*, 37(7): e00310520. <https://doi.org/10.1590/0102-311X00310520>.
- Gizaw Z., Astale T., Kassie G.M. 2022. What Improves Access to Primary Healthcare Services in Rural Communities? A Systematic Review. *BMC Prim. Care*, 23: 313. <https://doi.org/10.1186/s12875-022-01919-0>
- Moskvicheva M.G., Polinov M.M. 2021. Analysis of the Primary Health Care State for the Rural Population at the Regional Level. *Ural Medical Journal*, 20(1): 50–57. <https://doi.org/10.52420/2071-5943-2021-20-1-50-57>
- Oshkordina A., Goncharova N., Makarova E., Esina E. 2024. Organization of Primary Health Care as a Factor in the Effective Development of Rural Areas. *E3S Web of Conferences*, 537: 09006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453709006537>

References

- Arhipov Ju.R., Haritonov A.Ju. 2019. Territorial'nyj analiz dostupnosti pervichnoj medicinskoj pomoshhi naseleniju municipal'nogo rajona (na primere Chuvashskoj Respubliki) [Territorial Analysis of the Availability of Primary Health Care to the Population of the Municipal District (on the Example of the Chuvash Republic)]. In: *Geoprostanstvennye issledovaniya obshhestvennyh i prirodnyh sistem: teoriya i praktika* [Geospatial Studies of Social and Natural Systems: Theory and Practice]. Cheboksary, Publ. "Sreda": 13–17.
- Arhipov J.R., Haritonov A.J. 2020. Territorial Analysis of Access to Medical Care for the Population of the Chuvash Republic. In: *Earth Sciences: From Theory to Practice (Archikov Readings – 2020)*. Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation dedicated to the 175th anniversary of the Russian Geographical Society and the 95th anniversary of the birth of Doctor of Geographical Sciences, Professor E.I. Archikov, Cheboksary, 5–8 November 2020. Cheboksary, Publ. Sreda: 275–280 (in Russian).
- Mikaljuchika L.B. 1972. Kartograficheskoe izuchenie geografii medicinskogo obsluzhivaniya sel'skogo naselenija [Cartographic Study of the Geography of Medical Services for the Rural Population]. In: *Geografija sfery obsluzhivaniya. Voprosy geografii* [Geography of the Service Sector. Questions of Geography]. Ed. by Pokshishevskij V.V. Moscow, Publ. Mysl': 145–157.
- Pokshishevskij V.V. 1972. Geografija obsluzhivaniya, ee predmet, sodержание i mesto sredi jekonomiko-geograficheskikh discipline [Geography of Service, Its Subject, Content and Place Among Economic and Geographical Disciplines]. In: *Geografija sfery obsluzhivaniya. Voprosy geografii* [Geography of the Service Sector. Questions of Geography]. Ed. by Pokshishevskij V.V. Moscow, Publ. Mysl': 6–26.



- Kharitonov A.J. 2021. Territorial Analysis of the Availability of Primary Medical Care for the Population for the Chuvash Republic. In: Geographical Study of Territorial Systems. Proceedings of the XV All-Russian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists, Perm, 11–12 May 2021. Perm', Publ. Permskij gosudarstvennyj nacional'nyj issledovatel'skij universitet: 87–93.
- Franco C.M., Lima J.G., Giovanella L. 2021. Primary Healthcare in Rural Areas: Access, Organization, and Health Workforce in an Integrative Literature Review. *Cad Saude Publica*, 37(7): e00310520. <https://doi.org/10.1590/0102-311X00310520>.
- Gizaw Z., Astale T., Kassie G.M. 2022. What Improves Access to Primary Healthcare Services in Rural Communities? A Systematic Review. *BMC Prim. Care*, 23: 313. <https://doi.org/10.1186/s12875-022-01919-0>
- Moskvicheva M.G., Polinov M.M. 2021. Analysis of the Primary Health Care State for the Rural Population at the Regional Level. *Ural Medical Journal*, 20(1): 50–57. <https://doi.org/10.52420/2071-5943-2021-20-1-50-57>
- Oshkordina A., Goncharova N., Makarova E., Esina E. 2024. Organization of Primary Health Care as a Factor in the Effective Development of Rural Areas. *E3S Web of Conferences*, 537: 09006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453709006537>

*Поступила в редакцию 06.10.2024;
поступила после рецензирования 05.11.2024;
принята к публикации 28.11.2024*

*Received October 06, 2024;
Revised November 05, 2024;
Accepted November 28, 2024*

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Архипов Юрий Романович, доктор географических наук, профессор кафедры социальной и экономической географии, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Yuri R. Arkhipov, Grand PhD in Geographical Sciences, Professor of the Department of Social and Economic Geography, I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia

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

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

Харитонов Александр Юрьевич, магистр кафедры картографии и геоинформатики, института управления, экономики и финансов, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Alexander Y. Kharitonov, Master of the Department of Cartography and Geoinformatics, Institute of Management, Economics and Finance, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

Харитонов Андрей Юрьевич, ассистент кафедры природопользования и геоэкологии, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Andrey Y. Kharitonov, Assistant of the Department of Nature Management and Geoecology, I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia



УДК 911.2+796.5+613.7(470.333)
DOI 10.52575/2712-7443-2024-48-4-494-502

Развитие лечебно-оздоровительного туризма в Брянской области

¹Кузьмин В.О., ²Москаленко О.П.

Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского,
Россия, 241036, г. Брянск, ул. Бежицкая, 14
E-mail: kuporod@yandex.ru, om3736@gmail.com

Аннотация. Показана динамика развития лечебно-оздоровительного туризма Брянской области. Результаты получены на базе статистической обработки данных сайта ЕМИСС, материалов туристического портала Брянской области и полевых наблюдений. Выполненная сравнительная характеристика ареалов лечебно-оздоровительного туризма (ЛОТ) способствует определению перспективных направлений развития отрасли на региональном уровне. Используются показатели: привлекательность курортной местности, типы учреждений и их сочетания, структура оказываемых лечебно-оздоровительных услуг. Для сравнения выделены четыре ареала ЛОТ (Брянский, Жуковский, Клиновский, Синезёрки), которые различаются по ведущим факторам формирования: наличию ресурсной базы, состоянию инфраструктуры. Отмечено, что за исследуемый период уровень ЛОТ не соответствует имеющемуся потенциалу, развитие ареалов ЛОТ является перспективным направлением для обеспечения доступности услуг и развития социальной сферы на региональном уровне.

Ключевые слова: лечебно-оздоровительный туризм, курортная местность, туристско-рекреационный потенциал, санаторно-оздоровительные организации, рекреационные услуги, ареалы лечебно-оздоровительного туризма

Для цитирования: Кузьмин В.О., Москаленко О.П. 2024. Развитие лечебно-оздоровительного туризма в Брянской области. Региональные геосистемы, 48(4): 494–502. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-494-502

Development of Health and Wellness Tourism in the Bryansk Region

¹Valentin O. Kuzmin, ²Olga P. Moskalenko

Bryansk State Academician I.G. Petrovski University,
14 Bezhitskaya St, Bryansk 241036, Russia
E-mail: kuporod@yandex.ru, om3736@gmail.com

Abstract. The article discusses the possibilities of developing health and wellness tourism (HWT) in the Bryansk region. A comparative study of HWT areas makes it possible to identify promising directions for the development of the region's industry. The results of the spatial and temporal analysis were based on the data obtained from the Unified Interdepartmental Statistical Information System (EMISS) website, materials of the tourist portal of the Bryansk region, and field observations. The following indicators were used: attractiveness of the resort area; types of institutions and their combinations; the structure of medical and wellness services provided. Four HWT areas were compared (Bryansk, Zhukovsky, Klintsovsky, and Sinezyorki), differing in the leading factors of formation: the availability of a resource base, consumer demand, and the state of infrastructure. It is noted that during the study period, the HWT level did not correspond to the available potential. The development of HWT areas is a promising direction for ensuring the availability of services and improving the social sphere at the regional level.

Keywords: health and wellness tourism, resort area, tourism and recreational potential, health resort organizations, recreational services, areas of health and wellness tourism.

For citation: Kuzmin V.O., Moskalenko O.P. 2024. Development of Health and Wellness Tourism in the Bryansk Region. Regional Geosystems, 48(4): 494–502. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-494-502

Введение

В современных условиях санкций развитие внутреннего туризма становится всё более актуальным. В числе приоритетов государственной политики по реализации Программы Российской Федерации «Развитие туризма» [2024] указано «стимулирование спроса и повышение доступности туристского продукта Российской Федерации на внутреннем и внешнем рынках». Для старопромышленных регионов, к которым относится Брянская область, развитие туристической сферы приводит к структурным изменениям в экономике и сфере занятости. Наибольшая острота проблемы диверсификации направлений социально-экономического развития отмечается в регионах, где традиционно доминировала производственная сфера [Брель и др., 2020]. Одной из задач раскрытия туристического потенциала Брянской области является системное продвижение внутренних туристских направлений [Об утверждении ... в Брянской области, 2024]. За последние шесть лет Брянская область в национальном туристическом рейтинге переместилась с 60 места (2018 год) на 54 (2023 год), т. е. вошла в «серебряную» группу рейтинга с названием «Крепкие профи» [Национальный туристический..., 2023]. Динамика балльной оценки региона отражена на рис. 1.

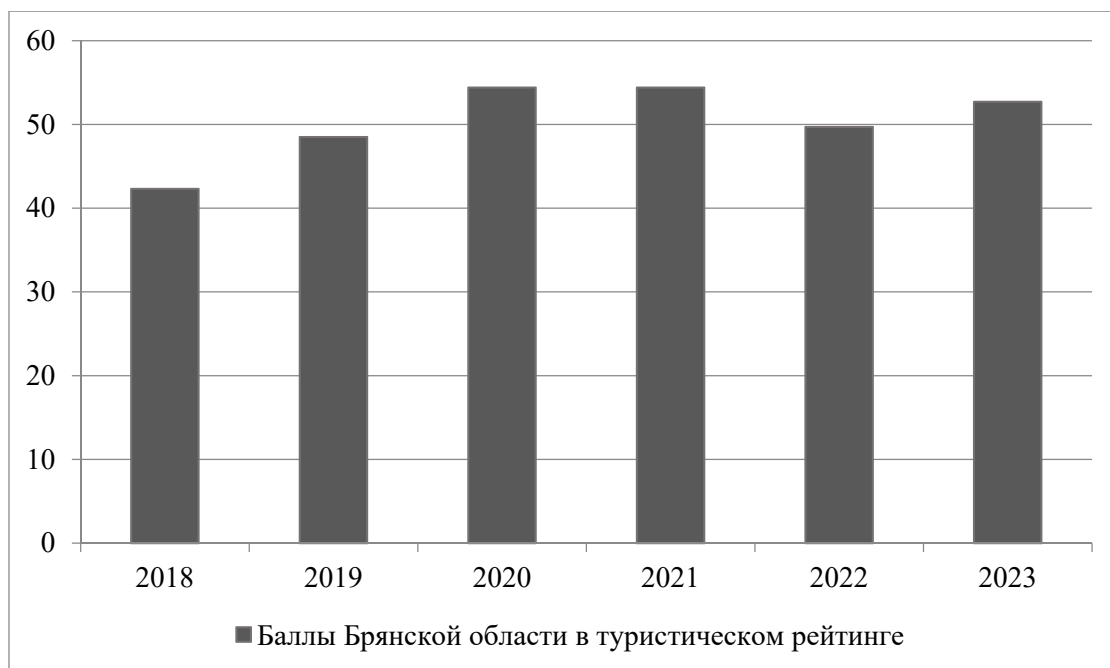


Рис. 1. Динамика оценки развития туризма в Брянской области
Fig. 1. Dynamics of the assessment of tourism development in the Bryansk region

В структуре туристской отрасли особое место занимает лечебно-оздоровительный туризм (ЛОТ). Международный опыт отражает значение интегративной медицины в развитии туризма с учётом особенностей оздоровительных ретритов (wellness-retreats) [Holistic-healing-exploring-...,2024]. В определении ЛОТ имеют место различные подходы. В зарубежной литературе для определения поездок с целью лечения, оздоровления, профилактики заболеваний или поддержания физической формы используются термины Medical Tourism, Health and Wellness Tourism [Methodology, 2024]. С. Сун определяет медицинский туризм как систему медицины, туризма, реабилитации и здравоохранения, об-



разующую интегрированную отрасль туризма [Sun, 2018]. Также в литературе используется термин «оздоровительный туризм» для определения путешествий, направленных на улучшение здоровья и самочувствия с помощью физических, психологических и умственных нагрузок [Nadim, Gandomkar, 2016]. Группа китайских учёных отмечает отличия понятий оздоровительного туризма в Китае и в западных странах, анализируя задачи развития оздоровительно-развлекательного туризма, делает акцент на исследовании региональной культуры [Feng et al., 2021].

Обзор ключевых понятий в сфере медицинского туризма и обоснование понятий «медицинский клинический туризм» и «медицинский курортный туризм» даны в работе Н.А. Савельевой, Р.В. Колесникова, Т.В. Шмелевой [2020].

Отдельную группу составляют определения ЛОТ, отражающие его иерархическую структуру, обусловленную спектром предоставляемых услуг [Ветитнев, 2012; Ефимов, Ефимова, 2017; Соколов и др., 2017; Квита и др., 2021, Оборин, 2022 и др.].

Результаты анализа литературы показывают учёт различных аспектов при формировании понятийного аппарата в области лечебно-оздоровительного туризма, что является естественным процессом развивающегося направления исследования. Отмечая иерархическую структуру ЛОТ мы рассматриваем его медико-социальную функцию в качестве ключевого признака. Данная статья содержит результаты пространственно-временного анализа ЛОТ Брянской области. Сравнение ареалов ЛОТ области позволит определить направления совершенствования территориальной структуры отрасли на региональном уровне.

Объекты и методы исследования

Пространственно-временной анализ ЛОТ охватывает период 20 лет, территориальные сочетания лечебно-оздоровительных учреждений области позволили выделить четыре ареала ЛОТ. Информационную базу работы составляют статистические данные «Санаторно-курортные организации» на сайте ЕМИСС [Единая межведомственная..., 2024], материалы официального туристического портала Брянской области [Официальный туристический..., 2024], материалы полевых наблюдений.

Объектом исследования являются санаторно-курортные организации области, структура предоставляемых услуг, особенности их территориальных сочетаний, природные ресурсы курортных территорий, показатели работы ЛОТ области на фоне ЦФО.

Основными методами являются статистический, анализа и синтеза, сравнительно-географический. Для оценки динамики развития ЛОТ Брянской области вычислены показатели вариации доходов и расходов отрасли, наличия мест в санаторно-курортных учреждениях и численности размещённых лиц в течение двадцати лет. Показатели вариации (v , %) вычислены как отношение значений стандартного отклонения к средним значениям за исследуемый период. Статистический анализ включает оценку динамики доли Брянской области в ЦФО по доходам и расходам отрасли, количеству мест и размещённых лиц в лечебно-оздоровительных учреждениях.

Сравнение ареалов ЛОТ выполнено по показателям: привлекательность курортной местности, типы учреждений и их сочетания, структура оказываемых лечебно-оздоровительных услуг.

Результаты и их обсуждение

В Брянской области первые учреждения санаторно-курортного типа появились только в середине прошлого века. Но в 1990-е годы и в начале XXI века в условиях кризисного состояния отрасли четыре санатория-профилактория были ликвидированы, также сократилось число детских оздоровительных лагерей [Кузьмин, 2022]. Реализация механизмов сохранения местных лечебно-оздоровительных учреждений, комплексного использования природных лечебных ресурсов включает определение границ и составление

кадастров природных ресурсов курортных местностей, проведение архитектурных обследований с учетом экологических условий [Десятниченко и др., 2018]. Эти задачи актуальны для Брянской области. За исследуемый период (2002–2023 гг.) среднегодовая численность лиц, размещённых в санаторно-курортных организациях, составила 31 558 чел., это 3,1 % от показателя по ЦФО. Динамика численности отдыхающих представлена на рис. 2.

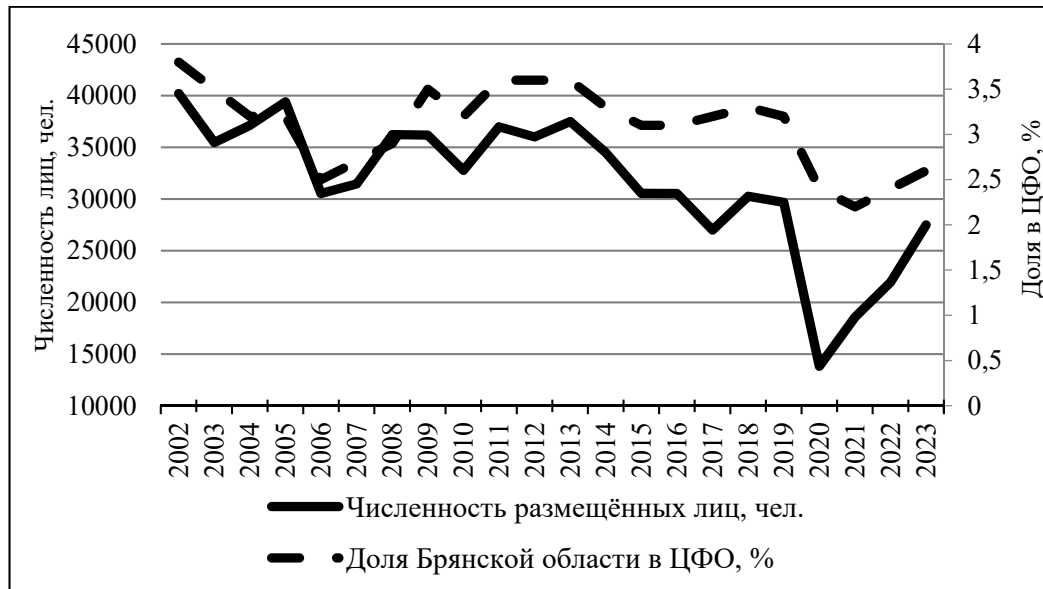


Рис. 2. Динамика численности лиц, размещённых в санаторно-курортных организациях Брянской области и изменение доли региона в ЦФО

Fig. 2. Dynamics of persons accommodated in sanatorium-resort organizations of the Bryansk region and the change in the region's share in the Central Federal District

Максимальное значение – 40 215 чел. – отмечено в 2002 году, минимальное – 13 828 чел. в 2020 году. За исследуемый период на фоне общего тренда снижения численности отдыхающих коэффициент вариации составляет 21 %. Следовательно, отсутствует устойчивость тренда. С 2003 по 2023 год среди субъектов ЦФО область переместилась с 8 на 10 место по числу лиц, размещённых в санаторно-курортных организациях.

Число мест в санаторно-курортных организациях за этот период характеризуется большей стабильностью – коэффициент вариации не превышает 13 % (рис. 3).

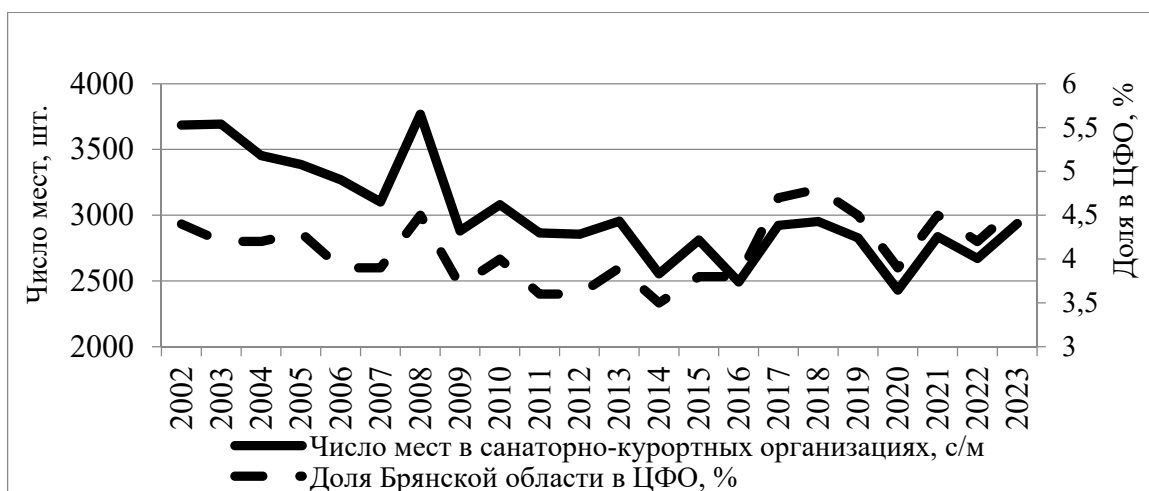


Рис. 3. Динамика числа мест в санаторно-курортных организациях Брянской области и изменение доли региона в ЦФО

Fig. 3. Dynamics of the number of beds in sanatorium-resort organizations



В 2023 году Брянская область по числу мест в санаторно-курортных организациях занимала 7 место в ЦФО, на её долю приходилось 4,1 % от показателя по округу.

В течение 20 лет в области формируется от 2,3 до 3,7 % среднегодовых доходов ЛОК ЦФО, коэффициент вариации составил 14,1 %.

С 2002 по 2023 год коэффициент вариации доходов отрасли в Брянской области составляет 19 %, затрат – 22 %.

Наличие на территории природных лечебных ресурсов, её пригодность для организации санаторно-курортного лечения и медицинской реабилитации формирует лечебно-оздоровительную местность [О внесении изменений..., 2023]. В комплексе природных минеральных ресурсов Брянской области лечебные ресурсы представлены минеральными водами и грязями. В зависимости от сочетания своеобразия лечебно-оздоровительных местностей, наличия санаторно-курортной инфраструктуры, профиля лечебно-оздоровительных учреждений на территории области выделены ареалы ЛОТ.

Минеральные воды Брянской области относятся к ресурсам регионального значения. Согласно гидрогеологическим прогнозам, на территории области запасы минеральных вод оцениваются в 16,91 тыс. м³/сут., однако разведанность составляет 7 % [Ресурсно-сырьевой..., 2024]. Наличие минеральных ресурсов в ареалах ЛОТ представлено в таблице.

Минеральные ресурсы ареалов ЛОТ в Брянской области
 Mineral resources of the areas of health and wellness tourism in the Bryansk region

Ареалы лечебно-оздоровительного туризма			
Брянский	Клинцовский	Жуковский	Синезёрки
Минеральные воды: «Сельцовский родник» сульфатная (хлоридно-сульфатная) магниевонатриево-кальциевая, с минерализацией 2,5–5,5 г/л. «Снежская» гидрокарбонатная магниево-кальциевая, слабоминерализованная; сапропелевые грязи.	Минеральная вода «Затишинская» лечебно-столовая сульфатно-хлоридно-натриевого состава, маломинерализованная.	Минеральная вода слабоминерализованная, хлоридно-сульфатная, кальциево-натриевая (с нейтральной или слабощелочной средой).	Озёрная иловая сапропелевая грязь озера Шумовец.

Ландшафтную привлекательность курортных местностей на территории Брянской области формирует пологоволнистый рельеф, расчленённый живописными речными долинами, и растительность хвойно-широколиственных лесов.

Наиболее развитой структурой выделяется Брянский ареал ЛОТ, в пределах которого сочетаются санаторно-оздоровительные организации разного профиля. Основной спрос на рекреационные услуги формирует население областного центра. Санатории «Домашово», «Ателика Снежка» предоставляют комплекс услуг по диагностике, лечению и профилактике заболеваний по семи профилям. «Белобережский» детский санаторий имеет четыре профиля: ЛОР органы, нервная система, опорно-двигательный аппарат, органы дыхания. Оздоровительные организации, которые пользуются популярностью у жителей г. Брянска и области, это детский курорт «Дубрава», пансионат «Дубок», парк-отель «МилВуд», парк-отель «Партизан», турбаза «Сосновый бор».

Пейзажное разнообразие Жуковского ареала связано с лесными массивами в долине р. Десны, на берегах которой в результате аккумулятивных процессов формируются

пляжи. Ареал включает объекты медицинского туризма: Медицинский центр «Жуковки» (диагностика, лечение, реабилитация), санаторий «Жуковский» (шесть профилей лечения) и областной детский тубсанаторий, а также оздоровительные организации: детский оздоровительный лагерь (ДОЛ) «Деснянка», парк-отель «Славянка», турбаза «Четыре Сезона», база отдыха «Сосновка».

Клинцовский ареал стал формироваться в 70-е годы прошлого века на базе использования местной минеральной воды «Затишинская». В настоящее время работают санатории «Затишье» и «Вьюнки» по семи профилям. Санаторий «Вьюнки» был открыт в здании неоготического стиля бывшей загородной виллы местного фабриканта в 1922 году для рабочих г. Клинцы. В 1975 году был открыт санаторий «Затишье» на 150 человек. В 2015–2017 гг. осуществлена полная реконструкция санатория «Затишье», здесь работают автономно корпуса для взрослого и детского контингента. С 2019 года в санатории проходят оздоровление не только жители Брянской области, но и отдыхающие из других субъектов, например, из Мурманской, Калининградской, Смоленской, Орловской и других областей. Санаторий предлагает также широкий спектр развлекательных программ, организует экскурсии.

Долина р. Ревны, сосновые леса, иловая сапропелевая грязь озера Шумовец составляют основу лечебно-оздоровительной местности ареала Синезёрки. Ареал включает санаторий-профилакторий «Синезёрки» (пять профилей), одноимённый ДОЛ и базу отдыха «Альбатрос». Эти организации в большой степени ориентированы на оздоровление детского населения. Инфраструктура санатория нуждается в преобразовании с учётом современных требований.

В санаториях Брянской области основными видами санаторного лечения являются бальнеотерапия, грязелечение, физиотерапевтические процедуры, ингаляции, лечебная физкультура, разные виды массажа.

Заключение

В последние годы наметилась положительная тенденция в развитии туризма Брянской области, о чём свидетельствует изменение места области в национальном туристическом рейтинге. Однако за исследуемый период развитие ЛОТ ещё не получило должного развития, несмотря на имеющиеся условия и ресурсы. Отрасль имеет региональное значение и очаговый характер размещения. Развитие индустрии лечебно-оздоровительного туризма отличается большими материальными затратами, высокими требованиями к обеспечению соответствующим оборудованием и профессиональной подготовке персонала.

Анализируемые ареалы ЛОТ формируются преимущественно на базе использования местных лечебных ресурсов – источников минеральных вод, ландшафтной привлекательности, условий микроклимата, отличаются компактностью территории. Наиболее развитая структура Брянского ареала обусловлена наличием потенциала спроса на лечебно-оздоровительные услуги. Медицинские услуги в структуре ЛОТ, в т. ч. специализированная помощь детскому населению, в большей степени представлены в Жуковском ареале. Проведение реконструкционных работ в Клинцовском ареале способствует его привлекательности и привлечению отдыхающих из других регионов. Удалённые от крупных промышленных центров ареалы Синезёрки и Жуковский отличаются наиболее благоприятной экологической обстановкой, что необходимо учитывать при инвестировании в развитие отрасли.

Список источников

Единая межведомственная информационно-статистическая система. Электронный ресурс. URL: <https://www.fedstat.ru> (дата обращения 25.08.2024).



- Национальный туристический рейтинг – 2023. Журнал «Отдых в России». Электронный ресурс. URL: https://rustur.ru/nacionalnyj-turisticheskij-rejting-2023?roistat_visit=1553819 (дата обращения: 21.08.2024).
- Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие туризма» (с изменениями и дополнениями): постановление Правительства Российской Федерации № 2439 от 24.12.2021 г. Электронный ресурс. URL: <https://base.garant.ru/403336467/> (дата обращения: 21.08.2024).
- Об утверждении государственной программы «Развитие культуры и туризма в Брянской области» (с изменениями на 8 апреля 2024 г.): постановление Правительства Брянской области № 759-п от 31.12.2018 г. Электронный ресурс. URL: <https://docs.cntd.ru/document/974053422> (дата обращения: 21.08.2024).
- О внесении изменений в Федеральный закон «О природных лечебных ресурсах, лечебно-оздоровительных местностях и курортах», отдельные законодательные акты Российской Федерации и признании утратившими силу отдельных положений законодательных актов Российской Федерации: Федеральный закон №469-ФЗ от 04.08.2023. Электронный ресурс. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1302361596> (дата обращения: 21.08.2024).
- Официальный туристический портал Брянской области. Электронный ресурс. URL: <https://turizm-bryansk.ru/vidy-turizma-bryanskoj-oblasti/2535> (дата обращения 25.08.2024).
- Ресурсно-сырьевой потенциал региона. Инвестиционный портал Брянска. Электронный ресурс. URL: <https://invest32.ru/o-bryanskoj-oblasti/resursy> (дата обращения 18.08.2024).
- Methodology. Medical Tourism Index. Electronic resource. URL: <https://www.medicaltourism.com/mti/methodology> (date of access 19.08.2024).
- Holistic-healing-exploring-integrative-medicine-and-wellness-retreats. Electronic resource. URL: <https://www.magazine.medicaltourism.com/article> (date of access 29.08.2024).

Список литературы

- Брель О.А., Зайцева А.И., Кайзер Ф.Ю. 2020. Кемеровская область в национальном туристическом рейтинге: сравнительный анализ. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки, 3(207): 37–43. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2020-3-37-43>
- Ветитнев А.М. 2012. Лечебно-оздоровительный туризм: вопросы терминологии и типологии. Вестник Сочинского государственного университета туризма и курортного дела, 2(20): 50–56.
- Десятниченко Д.Ю., Десятниченко О.Ю., Шматко А.Д. 2018. О проекте стратегии развития санаторно-курортного комплекса Российской Федерации (анализ задач и направлений их решения). Управленческое консультирование, 1(109): 84–91. <https://doi.org/10.22394/1726-1139-2018-1-84-91>
- Ефимов С.А., Ефимова А.С. 2017. Лечебно-оздоровительный, лечебный и оздоровительный туризм: уточняем понятийно-терминологический аппарат. Вестник физиотерапии и курортологии, 23(4): 155–160.
- Квита Г.Н., Аршинова А.Н., Зотова Е.Г. 2021. Специфика и факторы развития лечебно-оздоровительного туризма. Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования, 7(57): 36–41. <https://doi.org/10.47581/2021/PS-3/IE.7.57.06>
- Кузьмин В.О. 2022. Брянская область в системе лечебно-оздоровительного туризма России. В кн.: Муниципальные образования регионов России: проблемы исследования, развития и управления. Материалы V Всероссийской межведомственной научно-практической конференции с международным участием, Воронеж, 10–12 ноября 2022. Воронеж, Цифровая полиграфия: 478–483.
- Оборин М.С. 2022. Медицинский туризм как специальный вид услуг. Сервис в России и за рубежом, 16(1/98): 179–187. <https://doi.org/10.24412/1995-042X-2022-1-179-187>
- Савельева Н.А., Колесников Р.В., Шмелева Т.В. 2020. Медицинский туризм: вопросы терминологии. Вестник Евразийской науки, 12(2): 1–16.
- Соколов А.С., Манько Н.П., Гуляев В.Г. 2017. Теоретико-методологические аспекты медицинского туризма. Вестник РМАТ, 3: 105–111.

- Feng Ch., Li H., Feng L., Yu M., Zhang H., Ma Y., Yao Y., Zhang Sh., Zhang Z. 2021. Study on Current Status, Problems and Countermeasures of Countryside Health and Wellness Tourism in China. *Open Journal of Social Sciences*, 09(04): 212–221. <https://doi.org/10.4236/jss.2021.94016>
- Nadim Z., Gandomkar A. 2016. Planning for Wellness Tourism Center in Isfahan Province, Iran. *Open Journal of Ecology*, 6(10): 645–657. <https://doi.org/10.4236/oje.2016.610060>
- Sun X. 2018. Research on the Model of Cross-Border Medical Tourism Decision-Making under the Background of Globalization. *Open Journal of Social Sciences*, 6(9): 230–246. <https://doi.org/10.4236/jss.2018.69016>

References

- Brel O.A., Zaitseva A.I., Kaiser F.Y. 2020. Kemerovo Region in the National Tourist Rating: a Comparative Analysis. *Bulletin of Higher Education Institutes. North Caucasus Region. Natural Sciences*, 3(207): 37–43 (in Russian). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2020-3-37-43>
- Vetitnev A.M. 2012. Lechebno-ozdorovitel'nyj turizm: voprosy terminologii i tipologii [Health Tourism: Issues of Terminology and Typology]. *Vestnik Sochinskogo gosudarstvennogo universiteta turizma i kurortnogo dela*, 2(20): 50–56.
- Desyatnichenko D.Yu., Desyatnichenko O.Yu., Shmatko A.D. 2018. About Strategy of Development of a Sanatorium Complex of the Russian Federation (Analysis of the Tasks and Their Solutions). *Administrative Consulting*, 1(109): 84–91 (in Russian). <https://doi.org/10.22394/1726-1139-2018-1-84-91>
- Efimov S.A., Efimova A.S. 2017. Lechebno-ozdorovitel'nyj, lechebnyj i ozdorovitel'nyj turizm: utochnyaem ponyatiyno-terminologicheskij apparat [Therapeutic and Health-Improving, Therapeutic and Health-Improving Tourism: We Clarify the Conceptual and Terminological Apparatus]. *Vestnik fizioterapii i kurortologii*, 23(4): 155–160.
- Kvita G.N., Arshinova A.N., Zotova E.G. 2021. The specifics and factors of the development of health tourism. *Innovatsionnaya ekonomika: perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya*, 7(57): 36–41. <https://doi.org/10.47581/2021/PS-3/IE.7.57.06>
- Kuzmin V.O. 2022. Bryanskaya oblast' v sisteme lechebno-ozdorovitel'nogo turizma Rossii [Bryansk Region in the System of Medical and Health Tourism of Russia]. In: *Munitsipal'nye obrazovaniya regionov Rossii: problemy issledovaniya, razvitiya i upravleniya* [Municipalities of the Regions of Russia: Problems of Research, Development and Management]. Proceedings of the V All-Russian interdepartmental scientific and practical conference with international participation, Voronezh, 10–12 November 2022. Voronezh, Publ. Cifrovaya poligrafiya: 478–483.
- Oborin M.S. 2022. Special Types of Tourism: Medical Tourism. Services in Russia and Abroad, 16(1/98): 179–187 (in Russian). <https://doi.org/10.24412/1995-042X-2022-1-179-187>
- Savelyeva N.A., Kolesnikov R.V., Shmeleva T.V. 2020. Medical Tourism: Terminology Questions. *The Eurasian Scientific Journal*, 12(2): 1–16 (in Russian).
- Sokolov A.S., Manko N.P., Gulyaev V.G. 2017. Theoretical and Methodological Aspects of Medical Tourism. *Vestnik RMAU*, 3: 105–111 (in Russian).
- Feng Ch., Li H., Feng L., Yu M., Zhang H., Ma Y., Yao Y., Zhang Sh., Zhang Z. 2021. Study on Current Status, Problems and Countermeasures of Countryside Health and Wellness Tourism in China. *Open Journal of Social Sciences*, 09(04): 212–221. <https://doi.org/10.4236/jss.2021.94016>
- Nadim Z., Gandomkar A. 2016. Planning for Wellness Tourism Center in Isfahan Province, Iran. *Open Journal of Ecology*, 6(10): 645–657. <https://doi.org/10.4236/oje.2016.610060>
- Sun X. 2018. Research on the Model of Cross-Border Medical Tourism Decision-Making under the Background of Globalization. *Open Journal of Social Sciences*, 6(9): 230–246. <https://doi.org/10.4236/jss.2018.69016>

*Поступила в редакцию 13.11.2024;
поступила после рецензирования 01.12.2024;
принята к публикации 05.12.2024*

*Received November 13, 2024;
Revised December 01, 2024;
Accepted December 05, 2024*

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

Кузьмин Валентин Олегович, аспирант кафедры географии, экологии и землеустройства Естественно-географического факультета, Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского, г. Брянск, Россия

Москаленко Ольга Павловна, кандидат географических наук, доцент кафедры географии, экологии и землеустройства Естественно-географического факультета, Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского, г. Брянск, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valentin O. Kuzmin, Postgraduate Student of the Department of Geography, Ecology and Land Management of the Faculty of Natural Geography, Bryansk State Academician I.G. Petrovski University, Bryansk, Russia

Olga P. Moskalenko, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor of the Department of Geography, Ecology and Land Management of the Faculty of Natural Geography, Bryansk State Academician I.G. Petrovski University, Bryansk, Russia



УДК 911.2

DOI 10.52575/2712-7443-2024-48-4-503-514

Земледельческие террасы в среднегорной зоне Большого Кавказа

Шаев И.А., Пинской В.Н., Ельцов М.В., Борисов А.В.

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
обособленное подразделение ФИЦ ПНЦБИ РАН,
Россия, 142290, Московская область, Пушкино, ул. Институтская, 2
E-mail: algimantas444@mail.ru

Аннотация. Проведено исследование площади террас на территории среднегорной зоны Большого Кавказа. Южные границы исследуемого региона были проведены по рекам Кура и Риони и условно замкнуты в области Сурамского перевала. С помощью Конструктора карт службы Яндекс проведены визуальный анализ космоснимков и выделение полигонов с явно выраженными террасами. Подсчет площадей полигонов проводился в программе QGIS. Всего зафиксировано 2185 полигонов террасовых полей. Установлено, что основной ареал террасирования находится в диапазоне высот от 1000 до 1800 м над уровнем моря, экстремальные границы зоны террасирования охватывают высоты от 500 до 2600 м. Общая площадь террасовых полей в среднегорной зоне Большого Кавказа составляет 289,5 тыс. га, из них большая часть приходится на территорию Российской Федерации – 272 тыс. га. Наибольшие площади террас зарегистрированы в Дагестане – 246,2 тыс. га. Принимая во внимание широкие масштабы террасирования склонов, высокий уровень агрикультуры, глубокие исторические корни земледелия в условиях горной зоны, представляется правомерным говорить о Кавказе как об одном из мировых центров террасного земледелия.

Ключевые слова: Большой Кавказ, земледельческие террасы, площадь, среднегорная зона, Республика Дагестан, террасное земледелие

Благодарности: Работа выполнена в рамках Госзадания 122040500036-9.

Для цитирования: Шаев И.А., Пинской В.Н., Ельцов М.В., Борисов А.В. 2024. Земледельческие террасы в среднегорной зоне Большого Кавказа. Региональные геосистемы, 48(4): 503–514. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-503-514

Agricultural Terraces in the Mid-Mountain Zone of the Greater Caucasus

Igor A. Shaev, Victor N. Pinskoy, Maxim V. Eltsov, Alexander V. Borisov

Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences,
2a Institutskaya St, Pushchino, Moscow region 142290, Russia
E-mail: algimantas444@mail.ru

Abstract. A study of the area of agricultural terraces within the Caucasus mid-mountain zone was carried out. The southern borders of the region under study were drawn along the Kura and Rioni rivers and conditionally closed in the vicinity of the Suram Pass. A visual analysis of space images was carried out, and polygons with clearly defined terraces were identified using the Yandex-constructor. The areas of the polygons were calculated in the QGIS program. A total of 2,185 polygons of terrace fields were recorded. It has been established that the main area of terracing is in the altitude range from 1,000 to 1,800 m above the sea level, while the extreme boundaries of the terracing zone cover altitudes from 500 to 2,600 m. The total area of terraced fields in the mid-mountain zone of the Greater Caucasus is 289,552 hectares, most of which are in Russia – 272,070 hectares. The largest areas of terraced fields are found in Dagestan,

amounting to 246,270 hectares. Given the wide scale of slope terracing, the high level of agriculture, and the deep historical roots of farming in the mountainous zone, it appears correct to say that the Caucasus is the world center of terrace farming.

Keywords: Greater Caucasus, agricultural terraces, area, mid-mountain zone, Republic of Dagestan, terrace farming

Acknowledgements: The study was done with a support of the state assignment 122040500036-9.

For citation: Shaev I.A., Pinsky V.N., Eltsov M.V., Borisov A.V. 2024. Agricultural Terraces in the Mid-Mountain Zone of the Greater Caucasus. *Regional Geosystems*, 48(4): 503–514. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-503-514

Введение

Террасное земледелие является одной из наиболее преобладающих форм сельского хозяйства в Азиатско-Тихоокеанском регионе (Индия, Китай, Непал, Бутан, Япония и Филиппины), Южной Америке (Перу, Эквадор, Боливия), Центральной Америке (Мексика, Гондурас, Гватемала), Европе (Италия), на Ближнем Востоке (Йемен) и в Восточной Африке (Эфиопия, Танзания, Руанда) [Charagain, Raizada, 2017]. На сегодняшний день наиболее известными и исследованными центрами террасного земледелия считаются Средиземноморье, Южная Америка, Южная Европа, Юго-Западная и Юго-Восточная Азия и др. (рис. 1).



Рис. 1. Карта распространения сельскохозяйственных террас в мире по Спенсеру и Хейлу [Spencer, Hale, 1961]

Fig. 1. Map of worldwide distribution of agricultural terraces according to Spencer and Hale [Spencer, Hale, 1961]

Что касается суммарных площадей, занимаемых сельскохозяйственными террасами в различных регионах, то надежных количественных данных по этому вопросу недостаточно. Из открытых источников и публикаций удалось найти следующую информацию о масштабах террасного земледелия в следующих странах:

Китай. Исторически Китай был одной из первых стран, где начали строить террасы (времена династий Цинь и Хань, 221 г. до н.э. – 220 г. н.э.). Согласно предварительным оценкам, площадь земледельческих террас в Китае составляет примерно 13,2 млн. га [Wu et al., 2003]. По более современным данным Второго национального земельного обследования Китая (*Second National Land Survey*), площадь террас в Китае составляет 18,6 млн. га, что составляет 13,7 % от общей площади пахотных земель [Dong et al., 2023].

Перу. Точной инвентаризации общей площади террас в Перу на данный момент не проведено. В то же время имеются многочисленные работы по оценке степени террасированности отдельных регионов и районов, что подчеркивает локальный характер исследований по данной тематике с упором на изучение конкретных характеристик террас и их роли в прошлом и настоящем [Petanidou et al., 2008; Diaz-Varela et al., 2014]. По предварительным оценкам площадь террас может достигать 2 млн. га [Inbar, Llerena, 2000].

В 2010 году в Перу была запущена программа *AgroRural* (Программа развития продуктивности сельского хозяйства в сельской местности), в рамках которой была инициирована инвентаризация сельскохозяйственных террас 95 муниципалитетов в 11 регионах Перу. В результате систематизации и инвентаризации террас в каталог было занесено 340,7 тыс. га террасированных полей, из которых 259,3 тыс. га используются и 81,4 тыс. га заброшены. *AgroRural* также оценивает площадь террас, которые не были включены в программу, в 150 тыс. га. Большая часть террасовых полей находится на высоте от 2500 до 4000 м над уровнем моря. Террасные участки, соответствующие наименьшим высотам (2300–3500 м), сохранились лучше всего и используются в сельском хозяйстве. В этом отчете делается вывод, что регионами с наибольшим количеством террасированных площадей являются Куско, Лима и Аякучо [Camara, de Mesquita, 2018].

Испания. Оценка площадей террас в Испании не проводилась. Известны работы регионального уровня по отдельным районам. Так, в частности, был проведен анализ тестовой территории площадью около 120 га, расположенной в провинции Кордова (Южная Испания), занятой в основном оливковыми садами [Diaz-Varela et al., 2014]. В целом данный участок довольно типичный для Южной Испании. Абсолютные высоты от 370 до 550 м над уровнем моря с преобладанием склонов восточной и южной экспозиций. Согласно результатам, 27 % исследуемой площади занимают земледельческие террасы [Diaz-Varela et al., 2014].

Греция. В качестве примера оценки площади террасирования в рамках отдельно взятого географического объекта можно привести публикацию по террасовым полям на острове вулканического происхождения Нисирос (Греция) [Petanidou et al., 2008]. На данном острове террасы располагались на участках с широким диапазоном уклонов, с выходом к морю (т. е. на внешних склонах конуса), а также укрытых от моря (внутри кальдеры). Как показали полевые исследования и последующий анализ с помощью геоинформационных технологий, 58,4 % (2390 га) поверхности острова покрыто террасами.

Италия. Наиболее детальная оценка масштабов террасирования сделана в Италии. В 2016 году был запущен проект *MAPTER* с целью систематизации сведений по террасным ландшафтам. Достигнутые результаты, однако, носят предварительный характер, поскольку сочетают данные высокой степени точности (например, исследования, основанные на съемке *LIDAR* в Трентино¹, с менее точными региональными морфометрическими исследованиями, обзорами аэрофотоснимков и съемками на месте [Barbera et al., 2010; Varotto, Ferrarese, 2008]. Тем не менее, объединение вышеупомянутых данных на региональном, субрегиональном или местном уровнях позволило впервые осуществить географическую привязку и количественную оценку террасных территорий в национальном

¹ del Paesaggio Trentino O. 2017. Atlante dei Paesaggi Terrazzati del Trentino Meridionale. Comunità dell'Alto Garda e Ledro.



масштабе. Показано, что в общей сложности 169,1 тыс. га террасовых полей можно обнаружить непосредственно при визуальном осмотре территории или на аэрофотоснимках [Ferrarese et al., 2019].

Самыми большими террасными регионами является Сицилия, Лигурия, Тоскана, Кампания и Лацио. Исследования некоторых регионов (Ломбардия, Калабрия, Сардиния) еще не проведены. Показано, что 32 % террасных площадей занимают пахотные земли, 19 % – оливковые рощи, 3 % – фруктовые сады (лимонные рощи, каштановые леса) и лишь 3 % – виноградники, а темпы урбанизации на сельскохозяйственных террасах оцениваются примерно в 6 % [Varotto et al., 2018].

Таким образом, можно предположить, что максимальная площадь террас в Италии до начала массового забрасывания полей во второй половине двадцатого века, могла составлять от 200 до 300 тыс. га [Bonardi, 2016]. На сегодняшний день эти площади уже более чем наполовину заброшены или практически не используются, и частично покрыты лесами, выросшими в период с 1960 по 2010 год [Wei et al., 2016].

Израиль. Для территории Израиля известны площади террас на части Иудейских гор от юга Хеврона до севера Рамаллаха. Территория характеризуется средиземноморским климатом и в целом наиболее благоприятна для земледелия. Установлено, что сельскохозяйственные террасы, многие из которых имеют древнее происхождение, покрывают 56,4 % исследуемого региона [Ron, 1966].

Россия. В Российской Федерации основным районом террасирования является Кавказ и, главным образом, Республика Дагестан – один из древнейших центров террасных технологий [Агларов, 2007, 2016]. По мнению Х.А. Амирханова [1983], земледелие в горной зоне Кавказа было террасным с момента его возникновения, так как в любом случае при распашке будет происходить аккумуляция мелкозема и формирование террасоподобной формы рельефа в нижней части распаханного поля. Есть основания предполагать, что практика целенаправленного террасирования склонов в горной зоне Восточного Кавказа могла возникнуть в эпоху бронзового века [Идрисов, 2018]. Следы земледельческого освоения территории встречаются в спорово-пыльцевых спектрах торфяников в горном Дагестане в эпоху неолита (VI тыс. до н.э.), раннего и среднего бронзового века, и практически не прекращаются с раннего Средневековья до настоящего времени [Ryabogina, 2019].

До недавнего времени одним из наиболее исследованных в плане террасного земледелия в древности был регион Кисловодской котловины [Коробов, Борисов, 2012; Борисов, Коробов, 2013]. Однако в данном регионе нет террас, которые распахивались бы после эпохи Средневековья [Коробов, 2017].

Кроме Кавказского региона древние земледельческие террасы обнаружены в горной зоне Крыма² [Скрипникова, 2007]. В степной зоне Крыма широко представлены следы распашки в античное время в виде параллельных валов, известных как «длинные поля» [Лисецкий и др., 2017]. В случае, если валы идут не строго вдоль склона, они также могут принимать террасообразную форму.

Имеются данные о наличии земледельческих террас на территории Юго-Западного Алтая (верховья Катунь [Скрипникова, 2007]), в Южном Прибайкалье (п. Култук), на территории Приольхонья и около мыса Шаманский [Скрипникова, Мартынова, 2010]. Однако данные о площади террасирования в этих регионах не приводятся.

Все известные данные по масштабам террасирования относятся только к территории Республики Дагестан. В 2022 году Пинской В.Н. с соавторами [2023] для южной части сланцевого Дагестана провели картирование террас, обнаруживаемых на современных космоснимках открытого доступа. Авторы показали, что на тестовом участке, включающем Ахтынский, Докузпаринский и Сулейман-Стальский районы Дагестана, общей площадью 320 тыс.

² Олиферов А.Н. 1957. Террасирование в системе земельных мелиораций. Симферополь, Издательство Симферопольского Университета, 85 с.

га террасы занимают 26,4 тыс. га. Согласно имевшимся на тот момент предварительным данным по масштабам террасного земледелия на Кавказе, в данном районе насчитывалось 14 тыс. га террасовых полей. Разницу авторы связали с более низким разрешением снимков 2012 года, которые были использованы в работе А.В. Борисова с соавторами [Borisov et al., 2012]. Это дало основания авторам экстраполировать полученные выводы на весь Дагестан и пересмотреть результаты работ предшественников, предположив, что всего на территории Республики находится до 350 тыс. га террасовых полей [Пинской и др., 2023].

Объекты и методы исследования

В настоящей работе предпринята попытка оценить площади террас на территории Большого Кавказа как единой горной страны. Южные границы исследуемого региона были проведены по рекам Кура и Риони, включая приток Риони Квирилу, и условно замкнуты в области Сурамского перевала. Расчет проводили следующим образом. На первом этапе был проведен визуальный анализ космоснимков в системе Яндекс Карты. При помощи инструментов Конструктора карт выделялись полигоны с явно выраженными террасами (рис. 2). В тех случаях, когда характерные террасные формы были недостаточно явными, участок не выделялся. Поэтому мы предполагаем, что истинная площадь террасовых полей при нашем расчете была несколько занижена.

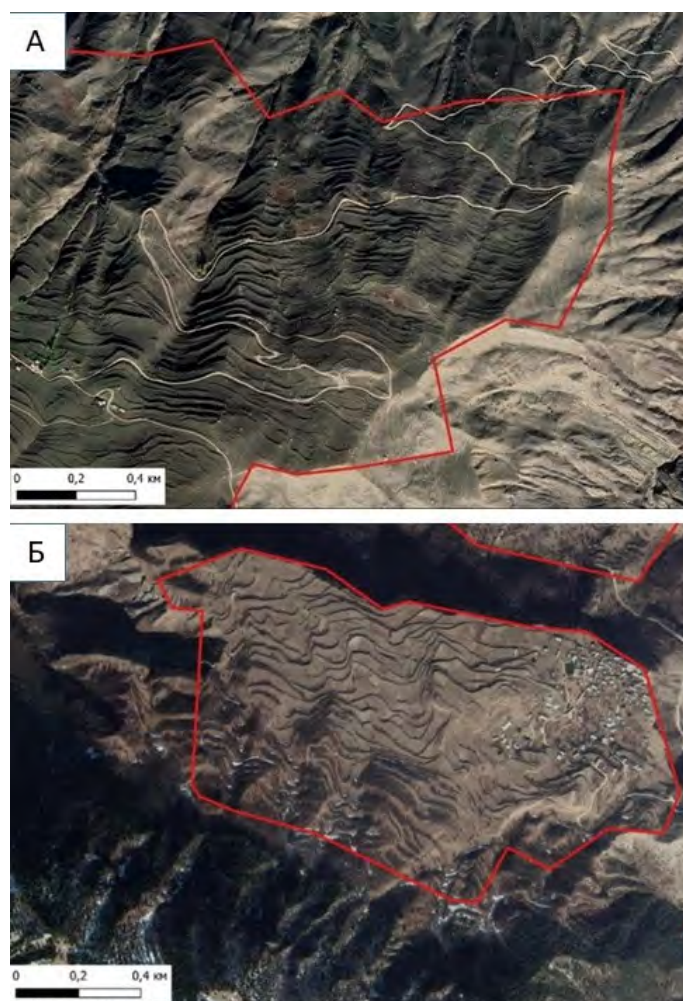


Рис. 2. Примеры выделения контуров террасовых полей на глинистых сланцах, Ахтынской район, Республика Дагестан (А) и на известняках нижнего мела, Акушинский район, Республика Дагестан (Б)
Fig. 2. Examples of identifying the contours of terrace fields on clay shales, Akhtynsky district, Republic of Dagestan (A) and on Lower Cretaceous limestones, Akushinsky district, Republic of Dagestan (B)

Также следует отметить, что значительные площади террасовых полей невозможно выявить при анализе космоснимков. Это относится в первую очередь к западной части ареала террасирования. Здесь на территориях Карачаево-Черкесской Республики и Кабардино-Балкарской Республики не удастся проследить на космоснимках некоторые участки, где ранее проводились натурные исследования почв террас. Так, в частности, один из опорных участков исследования террас эпохи бронзового века в урочище Арбакол в Карачаево-Черкесской Республике [Борисов, Коробов, 2013] (рис. 3А) на космоснимке не удастся идентифицировать (рис. 3Б). И подобного рода ситуация наблюдается повсеместно на Центральном Кавказе в тех районах, где террасы создавались в эпоху бронзового века и Средневековья. Это связано с длительным периодом пребывания террас в заброшенном состоянии, в результате чего различия в растительных покровах на полотно террасы и на откосе оказываются столь незначительными, что не позволяет выявить следы террасирования на космоснимках.



Рис. 3. Террасовые поля в урочище Арбакол, Карачаево-Черкесская Республика, на фото (А) и на космоснимке Яндекс (Б)
Fig. 3. Terraced fields in the Arbakol tract, Karachay-Cherkessia, in the photo (А) and in the Yandex satellite image (Б)

При картировании террас в Конструкторе карт создавалась сетка из вертикально ориентированных направляющих через 500 м, и в каждой полосе просматривалась вся территория Кавказа от северных предгорий до условной южной границы. В результате проделанной работы всего было отрисовано 2185 полигонов террасных полей, из которых на территории Российской Федерации отмечено 2002 полигона. В качестве примера результатов картирования на рис. 4 представлен фрагмент карты террас в центральной части известнякового Дагестана.

Полигоны террасовых комплексов, построенные в Конструкторе карт Яндекса, были обработаны в программе *QGIS* (версия 3.32), с помощью которой произведен подсчет площадей.

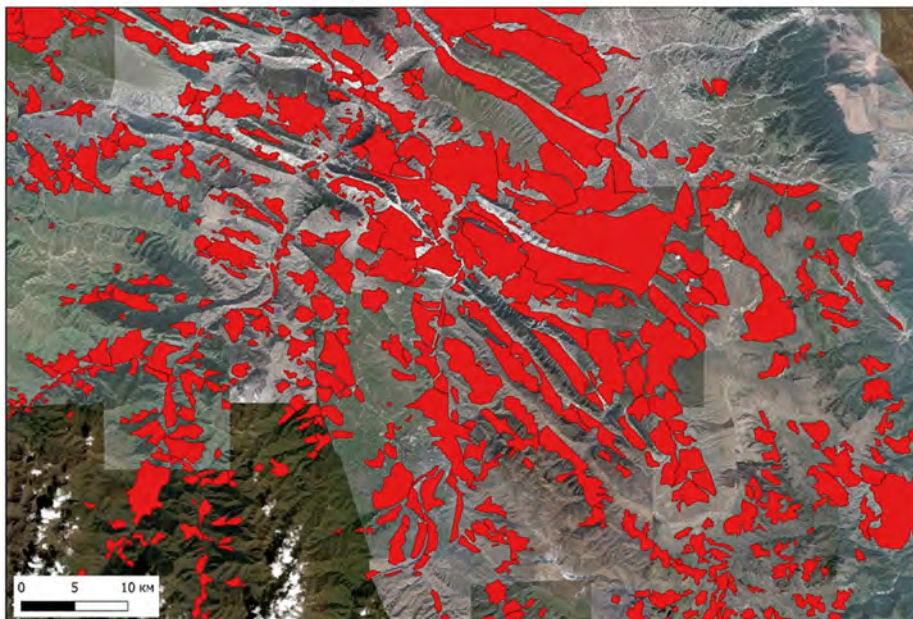


Рис. 4 Фрагмент карты сельскохозяйственных террас среднегорной части Кавказа (частично показана территория Унцукульского, Гунибского, Хунзахского, Гергебильского, Шамильского, Левашинского районов Республики Дагестан)
Fig. 4. Fragment of the map of agricultural terraces in the mid-mountain Caucasus (partially showing the territories of the Untsukul, Gunib, Khunzakh, Gergebil, Shamil, Levashinsky districts of the Republic of Dagestan)

Результаты и их обсуждение

Установлено, что общая площадь террасовых полей в среднегорной зоне Большого Кавказа составляет 289,5 тыс. га. Из них большая часть находится на территории Российской Федерации – 272 тыс. га (рис. 5).

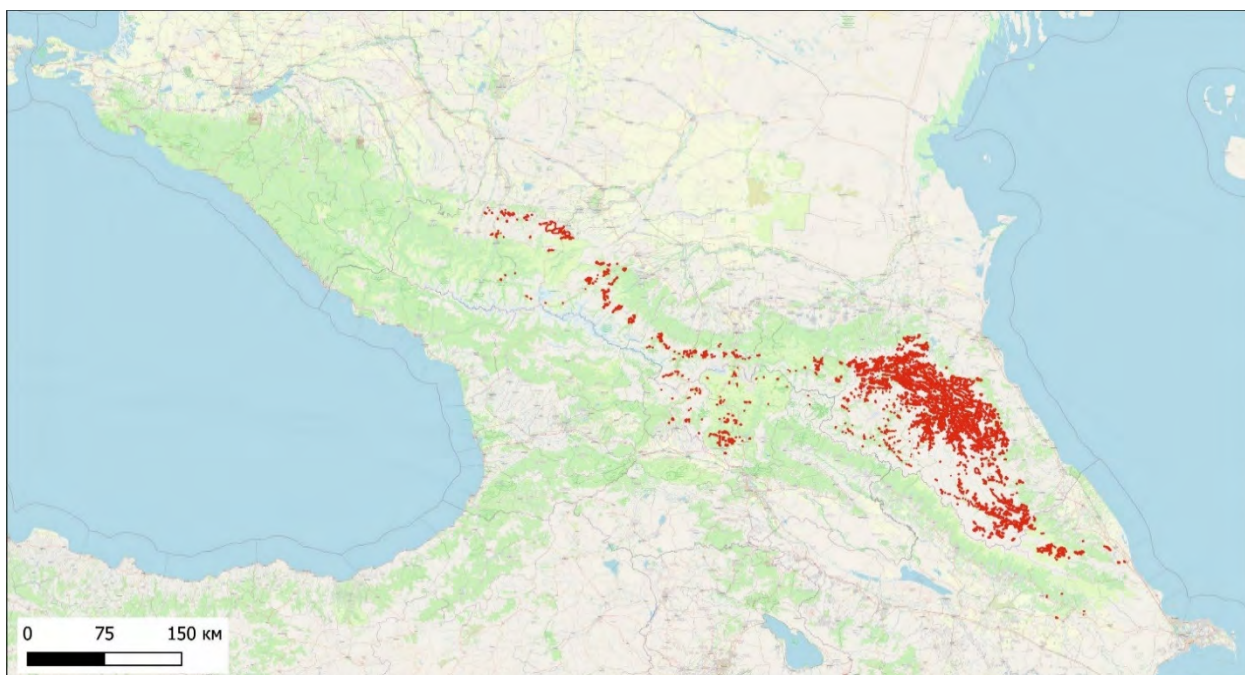


Рис. 5. Карта распространения сельскохозяйственных террас в среднегорной зоне Большого Кавказа
Fig. 5. Map of agricultural terrace distribution in the mid-mountain zone of the Greater Caucasus



Распределение террасных площадей (в га) по субъектам Российской Федерации и зарубежным государствам представлено в таблице.

Площади террасных полей в среднегорной зоне Большого Кавказа
 Areas of terraced fields in the mid-mountain zone of the Greater Caucasus

Регион	Площадь террас, га
Всего в среднегорной зоне Большого Кавказа	289552
Российская федерация, всего	272070
Республика Дагестан	246271
Чеченская Республика	6904
Республика Ингушетия	392
Республика Северная Осетия – Алания	4837
Кабардино-Балкарская Республика	6325
Карачаево-Черкесская Республика	3005

Установлено, что большая часть террас сосредоточена в диапазоне высот от 1000 до 1800 м над уровнем моря, экстремальные границы зоны террасирования охватывают высоты от 500 до 2600 м. Высотная зональность определяет наличие нескольких климатических зон: террасы встречаются в зоне с умеренно-теплым типом климата с достаточным увлажнением, умеренным и умеренно-континентальными типами климата. Количество осадков в зоне террасирования изменяется с северо-запада на юго-восток, на одинаковых высотах различия в данном показателе достигают 2–2,5 раза [Абдулаев и др., 2011].

Наибольшие площади террасных полей отмечены в Дагестане (Ботлихский, Гумбетовский, Унцукульский, Ахвахский, Хунзахский, Гергебильский, Гунибский, Левашинский, Лакский, Акушинский, Дахадаевский, Буйнакский и Докузпаринский районы). Здесь полоса террасирования достигает ширины примерно в 50 км и ориентирована в направлении северо-запад – юго-восток, что согласуется с ранее полученными данными [Идрисов, 2022].

При движении к западу площади террасовых полей резко сокращаются, ширина полосы террасирования снижается до нескольких километров. Западной границей зоны террасирования является река Кубань: лишь единичные ареалы террас встречаются на западном берегу Кубани в районе Карачаевска. В западной части Кабардино-Балкарской Республики, на территориях Республики Адыгеи и Краснодарского края земледельческие террасы не встречаются. Причины сокращения площадей террас мы связываем с увеличением доли относительно горизонтальных участков, пригодных для распашки без террасирования, а также с большой удаленностью от одного из центров террасовой земледельческой традиции, которым, безусловно, является Восточный Кавказ.

За пределами нашей страны крупные ареалы террас имеются на территории Азербайджана в верховьях рек Кудиал-Чай, Кара-Чай и Вельвиль-Чай. В Южной Осетии крупные обширные террасные поля сосредоточены в долине реки Ксани и на западном склоне Алевского хребта. К этой группе с востока приурочен массив террас, расположенных на южных отрогах Ломисского хребта.

Заключение

Таким образом, в настоящий момент лишь для двух крупных географических объектов известны площади террасных полей: это Апеннинский полуостров и Большой Кавказ. При сравнении масштабов террасирования становится очевидным, что площади террасовых полей Кавказа превосходят площади террас Апеннинского полуострова (289,5 тыс. га и 169,1 тыс. га, соответственно). И если Апеннинский полуостров относится

к числу всемирно известных центров террасирования, то Кавказ в некоторых обзорных публикациях по террасному земледелию даже не упоминается.

Принимая во внимание широкие масштабы террасирования склонов, высокий уровень и глубокие исторические корни сельскохозяйственной деятельности в условиях горной зоны, представляется правомерным говорить о Кавказе как о крупном мировом центре террасного земледелия.

Список литературы

- Абдулаев К.А., Атаев З.В., Братков В.В. 2011. Современные ландшафты горного Дагестана. Махачкала, ДГПУ, 115 с.
- Агларов М.А. 2016. Еще раз о сельскохозяйственных террасах Дагестана. Вестник Дагестанского научного центра РАН, 62: 30–53.
- Агларов М.А. 2007. Дагестан – один из исходных центров мирового террасного земледелия. Вестник Дагестанского научного центра, 28: 61–67.
- Амирханов Х.А. 1983. Начало земледелия в Дагестане. Природа, 2: 58–59.
- Борисов А.В., Коробов Д.С. 2013. Древнее и средневековое земледелие в Кисловодской котловине: итоги почвенно-археологических исследований. М., Таус, 272 с.
- Идрисов И.А., Гусейнова А.Ш. 2022. Геологическая роль сельскохозяйственных террас Восточного Кавказа. Труды института геологии Дагестанского научного центра РАН, 3(90): 39–46. <https://doi.org/10.33580/2541-9684-2022-90-3-39-46>
- Идрисов И.А., Газалиев И.М. 2018. Палеоархивы Восточного Кавказа. В кн.: Устойчивое развитие горных территорий Кавказа. М., ИИЕТ РАН: 40–45.
- Лисецкий Ф.Н., Маринина О.А., Буряк Ж.А. 2017. Геоархеологические исследования исторических ландшафтов Крыма. Воронеж, Воронежский государственный университет, 432 с.
- Коробов Д.С., Борисов А.В. 2012. О земледелии алан Кисловодской котловины в I тыс. н.э. Российская археология, 3: 50–62.
- Коробов Д.С. 2017. Система расселения алан Центрального Предкавказья в I тыс. н.э. (ландшафтная археология Кисловодской котловины). Т. 1. М., СПб., Нестор-История, 383 с.
- Пинской В.Н., Идрисов И.А., Каширская Н.Н., Ельцов М.В., Борисов А.В. 2023. Почвы сельскохозяйственных террас на глинистых сланцах в среднегорье Восточного Кавказа. Почвоведение, 6: 691–702. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22601335>
- Скрипникова М.И. 2007. Рукотворные террасовые агроэкосистемы горных ландшафтов Евразии. Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 10(36): 35–45.
- Скрипникова М.И., Мартынова Н.А. 2010. Специфика почвообразования на древних террасах горных экосистем Евразии. Вестник ИРГСХА, 41: 80–93.
- Barbera G., Cullotta S., Rossi-Doria I., Rühl J., Rossi-Doria B. 2010. I Paesaggi a Terrazze in Sicilia: Metodologie per L'analisi, la Tutela e la Valorizzazione. Collana studi e ricerche dell'Arpa Sicilia, 7: 531p.
- Bonardi L. 2016. Paesaggi Terrazzati d'Italia. Universo, 88(1): 56–70.
- Borisov A.V., Korobov D.S., Simakova A.N., Zanina O.G., Bukhonov A.V., Demidov V.V. 2012. Ancient Agricultural Terraces in the Kislovodsk Depression: History and Modern State of the Soils. Eurasian Soil Science, 45: 561–577. <https://doi.org/10.1134/S1064229312060038>
- Camara L., de Mesquita M.B. 2018. Terraced Landscapes in Perú: Terraces and Social Water Management. World Terraced Landscapes: History, Environment, Quality of Life, 9: 119–137.
- Chapagain T., Raizada M.N. 2017. Agronomic Challenges and Opportunities for Smallholder Terrace Agriculture in Developing Countries. Frontiers in plant science, 8: 331. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00331>.
- Diaz-Varela R.A., Zarco-Tejada P.J., Angileri V., Loudjani P. 2014. Automatic Identification of Agricultural Terraces Through Object-Oriented Analysis of Very High Resolution DSMs and Multispectral Imagery Obtained from an Unmanned Aerial Vehicle. Journal of environmental management, 134: 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.01.006>
- Dong S., Xin L., Li S., Xie H., Zhao Y., Wang X., Lu Y. 2023. Extent and Spatial Distribution of Terrace Abandonment in China. Journal of Geographical Sciences, 33(7): 1361–1376. <https://doi.org/10.1007/s11442-023-2133-7>



- Ferrarese F., Pappalardo S.E., Cosner A., Brugnaro S., Alum K., Dal Pozzo A., De Marchi M. 2019. Mapping Agricultural Terraces in Italy. Methodologies applied in the MAPTER project. In: *World Terraced Landscapes: History, Environment, Quality of Life*. Springer, Cham: 179–194.
- Inbar M., Llerena C.A. 2000. Erosion Processes in High Mountain Agricultural Terraces in Peru. *Mountain Research and Development*, 20(1): 72–79. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2000\)020\[0072:EPIHMA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2000)020[0072:EPIHMA]2.0.CO;2)
- Petanidou T., Kizos T., Soulakellis N. 2008. Socioeconomic Dimensions of Changes in the Agricultural Landscape of the Mediterranean Basin: a Case Study of the Abandonment of Cultivation Terraces on Nisyros Island, Greece. *Environmental Management*, 41: 250–266. <https://doi.org/10.1007/s00267-007-9054-6>
- Ron Z. 1966. Agricultural Terraces in the Judean Mountains. *Israel Exploration Journal*, 16(1): 33–49.
- Ryabogina N., Borisov A., Idrisov I., Bakushev M. 2019. Holocene Environmental History and Populating of Mountainous Dagestan (Eastern Caucasus, Russia). *Quaternary International*, 516: 111–126. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.06.020>
- Spencer J.E., Hale G.A. 1961. The Origin, Nature and Distribution of Agricultural Terracing. *Pacific Viewpoint*, 2(1): 1–40.
- Varotto M., Ferrarese F. 2008. Mapping and Geographical Classification of Terraced Landscapes: Problems and Proposals. *Terraced landscapes of the Alps*, Venice: 38–45.
- Varotto M., Bonardi L., Tarolli P. 2018. *World Terraced Landscapes: History, Environment, Quality of Life*. Springer, 356 p.
- Wei W., Chen D., Wang L., Daryanto S., Chen L., Yu Y., Feng T. 2016. Global Synthesis of the Classifications, Distributions, Benefits and Issues of Terracing. *Earth-Science Reviews*, 159: 388–403. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.06.010>
- Wu F., Zhang Y., She D., Song J. 2003. Preliminary Study on the Environmental Effects of Level Terracing in the Southern Loess Plateau. *Soil Water Conserv Res*, 10: 128–130.

References

- Abdulayev K.A., Atayev Z.V., Bratkov V.V. 2011. *Sovremennyye landshafty gornogo Dagestana [Modern Landscapes of Mountainous Dagestan]*. Makhachkala, Publ. DGPU, 115 p.
- Aglarov M.A. 2016. Eshche raz o zemledelcheskikh terrasakh Dagestana [Once Again about the Agricultural Terraces of Dagestan]. *Vestnik Dagestanskogo nauchnogo tsentra RAN*, 62: 30–53.
- Aglarov M.A. 2007. Dagestan – One of Initial Centers of World Agricultural Terracing. *Herald of the Dagestan Scientific Center*, 28: 61–67 (in Russian).
- Amirkhanov Kh.A. 1983. *Nachalo zemledeliya v Dagestane [The Beginning of Agriculture in Dagestan]*. Priroda, 2: 58–59.
- Borisov A.V., Korobov D.S. 2013. Prehistoric and Medieval Agriculture in the Kislovodsk Basin: Some Results of Pedological and Archaeological Studies. Moscow, Publ. Taus, 272 p. (in Russian).
- Idrisov I.A., Huseynova A.Sh. 2022. Geological Role of Agricultural Terraces of the Eastern Caucasus. *Trudy Instituta Geologii Dagestanskogo Nauchnogo Tsentra RAN*, 3(90): 39–46 (in Russian). <https://doi.org/10.33580/2541-9684-2022-90-3-39-46>
- Idrisov I.A., Gazaliyev I.M. 2018. *Paleoarkhivy Vostochnogo Kavkaza [Paleoarchives of the Eastern Caucasus]*. V kn.: *Ustoychivoye razvitiye gornyykh territoriy Kavkaza [Sustainable Development of the Caucasus Mountain Areas]*. Moscow, Publ. IIET RAN: 40–45.
- Lisetsky F.N., Marinina O.A., Buryak Zh.A. 2017. *Geoarchaeological Researches of Historical Landscapes of Crimea*. Voronezh, Publ. Voronezh State University, 432 p. (in Russian).
- Korobov D.S., Borisov A.V. 2012. O zemledelii alan Kislovodskoy kotloviny v I tys. n.e. [On the Agriculture of the Alans of the Kislovodsk Basin in the 1st Millennium AD]. *Rossiyskaya arkhologiya*, 3: 50–62.
- Korobov D.S. 2017. *Sistema rasseleniya alan Tsentralnogo Predkavkazia v I tys. n.e. (landshaftnaya arkhologiya Kislovodskoy kotloviny)*. T. 1. [The Settlement System of the Alans of the Central Ciscaucasia in the 1st Millennium AD (Landscape Archeology of the Kislovodsk Basin). V. 1]. Moscow, Saint-Petersburg, Publ. Nestor-Istoriya, 383 p.
- Pinskoy V.N., Idrisov I.A., Kashirskaya N.N., Yeltsov M.V., Borisov A.V. 2023. Soils of Agricultural Terraces on Clay Shales in the Mid-Mountain Zone of the Eastern Caucasus. *Eurasian Soil Science*, 6: 691–702 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0032180X22601335>



- Skripnikova M.I. 2007. Anthropogenic Terraced Agroecosystems of the Mountain Landscapes of Eurasia. *Bulletin of Altai State Agricultural University*, 10 (36): 35–45 (in Russian).
- Skripnikova M.I., Martynova N.A. 2010. Spetsifika pochvoobrazovaniya na drevnikh terrasakh gornykh ekosistem Evrazii [Specificity of Soil Formation on Ancient Terraces of Mountain Ecosystems of Eurasia]. *Vestnik IrGSKhA*, 41: 80–93.
- Barbera G., Cullotta S., Rossi-Doria I., Rühl J., Rossi-Doria B. 2010. I Paesaggi a Terrazze in Sicilia: Metodologie per L'analisi, la Tutela e la Valorizzazione. *Collana studi e ricerche dell'Arpa Sicilia*, 7: 531p.
- Bonardi L. 2016. Paesaggi Terrazzati d'Italia. *Universo*, 88(1): 56–70.
- Borisov A.V., Korobov D.S., Simakova A.N., Zanina O.G., Bukhonov A.V., Demidov V.V. 2012. Ancient Agricultural Terraces in the Kislovodsk Depression: History and Modern State of the Soils. *Eurasian Soil Science*, 45: 561–577. <https://doi.org/10.1134/S1064229312060038>
- Camara L., de Mesquita M.B. 2018. Terraced Landscapes in Perù: Terraces and Social Water Management. *World Terraced Landscapes: History, Environment, Quality of Life*, 9: 119–137.
- Chapagain T., Raizada M.N. 2017. Agronomic Challenges and Opportunities for Smallholder Terrace Agriculture in Developing Countries. *Frontiers in plant science*, 8: 331. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00331>.
- Diaz-Varela R.A., Zarco-Tejada P.J., Angileri V., Loudjani P. 2014. Automatic Identification of Agricultural Terraces Through Object-Oriented Analysis of Very High Resolution DSMs and Multispectral Imagery Obtained from an Unmanned Aerial Vehicle. *Journal of environmental management*, 134: 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.01.006>
- Dong S., Xin L., Li S., Xie H., Zhao Y., Wang X., Lu Y. 2023. Extent and Spatial Distribution of Terrace Abandonment in China. *Journal of Geographical Sciences*, 33(7): 1361–1376. <https://doi.org/10.1007/s11442-023-2133-7>
- Ferrarese F., Pappalardo S.E., Cosner A., Brugnaro S., Alum K., Dal Pozzo A., De Marchi M. 2019. Mapping Agricultural Terraces in Italy. Methodologies applied in the MAPTER project. In: *World Terraced Landscapes: History, Environment, Quality of Life*. Springer, Cham: 179–194.
- Inbar M., Llerena C.A. 2000. Erosion Processes in High Mountain Agricultural Terraces in Peru. *Mountain Research and Development*, 20(1): 72–79. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2000\)020\[0072:EPIHMA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2000)020[0072:EPIHMA]2.0.CO;2)
- Petanidou T., Kizos T., Soulakellis N. 2008. Socioeconomic Dimensions of Changes in the Agricultural Landscape of the Mediterranean Basin: a Case Study of the Abandonment of Cultivation Terraces on Nisyros Island, Greece. *Environmental Management*, 41: 250–266. <https://doi.org/10.1007/s00267-007-9054-6>
- Ron Z. 1966. Agricultural Terraces in the Judean Mountains. *Israel Exploration Journal*, 16(1): 33–49.
- Ryabogina N., Borisov A., Idrisov I., Bakushev M. 2019. Holocene Environmental History and Populating of Mountainous Dagestan (Eastern Caucasus, Russia). *Quaternary International*, 516: 111–126. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.06.020>
- Spencer J.E., Hale G.A. 1961. The Origin, Nature and Distribution of Agricultural Terracing. *Pacific Viewpoint*, 2(1): 1–40.
- Varotto M., Ferrarese F. 2008. Mapping and Geographical Classification of Terraced Landscapes: Problems and Proposals. *Terraced landscapes of the Alps*, Venice: 38–45.
- Varotto M., Bonardi L., Tarolli P. 2018. *World Terraced Landscapes: History, Environment, Quality of Life*. Springer, 356 p.
- Wei W., Chen D., Wang L., Daryanto S., Chen L., Yu Y., Feng T. 2016. Global Synthesis of the Classifications, Distributions, Benefits and Issues of Terracing. *Earth-Science Reviews*, 159: 388–403. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.06.010>
- Wu F., Zhang Y., She D., Song J. 2003. Preliminary Study on the Environmental Effects of Level Terracing in the Southern Loess Plateau. *Soil Water Conserv Res*, 10: 128–130.

*Поступила в редакцию 05.11.2024;
поступила после рецензирования 24.11.2024;
принята к публикации 28.11.2024*

*Received November 05, 2024;
Revised November 24, 2024;
Accepted November 28, 2024*



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

Шаев Игорь Александрович, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник лаборатории археологического почвоведения, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пушкино, Московская область, Россия

Пинской Виктор Николаевич, кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории археологического почвоведения, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пушкино, Московская область, Россия

Ельцов Максим Витальевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории археологического почвоведения, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пушкино, Московская область, Россия

Борисов Александр Владимирович, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории археологического почвоведения, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пушкино, Московская область, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor A. Shaev, Candidate of Biological Sciences, Junior Researcher, Laboratory of Archaeological Soil Science, Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, Russia

Victor N. Pinsky, Candidate of Geographical Sciences, Researcher, Laboratory of Archaeological Soil Science, Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, Russia

Maxim V. Eltsov, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Archaeological Soil Science, Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, Russia

Alexander V. Borisov, Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Archaeological Soil Science, Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, Russia



УДК 551.3.053

DOI 10.52575/2712-7443-2024-48-4-515-525

Динамика кривых распределения крупности продуктов склонового смыва в результате водной эрозии

¹Шмакова М.В., ²Турутина Т.В., ³Лобанов Г.В.

¹Институт озерадения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»,

Россия, 196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, 9

²Государственный гидрологический институт

Россия, 199004, Санкт-Петербург, 2-я линия В. О., 23

³Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского

Россия, 241036, г. Брянск, ул. Бежицкая, 14

E-mail: m-shmakova@yandex.ru, turutina.tatyana@yandex.ru, lobanov_grigorii@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена проблеме интерпретации результатов анализа гранулометрического состава намывного материала. Проблема рассматривается в рамках построения теоретической модели перемещения наносов поверхностным стоком. Исследование построено на сравнении гранулометрического состава наносов, сформированных методом натурального эксперимента на пробной площадке, и материала на склоне в естественном состоянии, на котором проявляется только поверхностный сток. Показано, что в условиях натурального эксперимента на площадке, сложенной песчаным материалом, доля более крупных фракций возрастает к подножию. На склоне сложного строения в естественном состоянии выраженных закономерностей в изменении гранулометрического состава отложений не наблюдается. Предполагается, что закономерности распределения фракций делювия, характерные для склонов однородного состава, сглаживаются поступлением элювиального материала неодинакового по составу и устойчивости к размыву.

Ключевые слова: почвенная эрозия, гранулометрия, эксперимент, склон, дождевание, почвогрунты

Для цитирования: Шмакова М.В., Турутина Т.В., Лобанов Г.В. 2024. Динамика кривых распределения крупности продуктов склонового смыва в результате водной эрозии. Региональные геосистемы, 48(4): 515–525. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-515-525

Dynamics of Various Size Particle Distribution in Slope Washout Products

¹Marina V. Shmakova, ²Tatyana V. Turutina, ³Grigory V. Lobanov

¹ Institute of Limnology RAS Separate Structural Subdivision of the Federal State Budgetary Institution of Science "St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences"

9 Sevastyanov St, St. Petersburg 196105, Russia

²State Hydrological Institute of Russia

23 2nd line V.O., St. Petersburg 199004, Russia

³Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky of Russia

14 Bezhitskaya St, Bryansk 241036, Russia

E-mail: m-shmakova@yandex.ru, turutina.tatyana@yandex.ru, lobanov_grigorii@mail.ru

Abstract. The article interprets the results of the analysis of soil washout product granulometric composition. The problem is considered within the framework of constructing a theoretical model of sediment movement by surface runoff. During the study, the granulometric composition of sediments formed by the method of full-scale experiment at the test site was compared to that of the material on the



slope in its natural state, which shows surface runoff only. It is shown that in the conditions of a full-scale experiment, on a site composed of sandy material, the proportion of larger fractions increases towards the bottom. On the slope of a complex structure in its natural state, there are no pronounced patterns in the change in the granulometric composition of sediments. It is assumed that deluvium fraction distribution patterns that are characteristic of slopes with a homogeneous composition are smoothed by the arrival of eluvial material which is heterogeneous in terms of composition and erosion resistance.

Keywords: soil erosion, granulometry, experiment, slope, sprinkling, soils, ground

For citation: Shmakova M.V., Turutina T.V., Lobanov G.V. 2024. Dynamics of Various Size Particle Distribution in Slope Washout Products. *Regional Geosystems*, 48(4): 515–525. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-515-525

Введение

Изучение механизмов почвенной эрозии остается актуальной научной проблемой и в настоящее время, несмотря на значительные исследовательские усилия. Количество актуальных публикаций, посвященных разным аспектам почвенной эрозии, достигает нескольких тысяч [Batista et al., 2019; Borelli et al., 2021]. Интерес к теме поддерживается неоднозначными, иногда противоречивыми результатами экспериментального изучения почвенной эрозии в разных географических условиях [Zhang et al., 2020]. В частности, для объяснения существенных различий в соотношении фракций смытого материала, обнаруженных натурными экспериментами, предлагаются корректировки теоретических моделей перемещения частиц водным потоком на склоне [Asadi, 1999; 2011]. Суть корректировок сводится к сочетанию в моделях разных механизмов перемещения частиц, удовлетворительно объясняющих гранулометрический состав наносов [Hairsine et al., 1999; Issa et al., 2006; Rienzi et al., 2013]. Соотношение фракций смытого материала, который формируется в большинстве натурных экспериментов, принимается зависимым от многих факторов, среди которых выделяются четыре – интенсивность осадков, уклон, гранулометрический состав не эродированного грунта (последний полагается постоянным по линии стока) и время воздействия [Lin et al., 2017; Kinnell, 2020]. Изменение гранулометрического состава размываемого грунта по длине склона редко встречается на сельхозугодьях, но весьма часто на склонах долин рек, что немаловажно учитывать при использовании состава наносов для оценки интенсивности эрозии.

Ввиду большой изменчивости характеристик подстилающей поверхности и ландшафтных неоднородностей при моделировании почвенной эрозии целесообразно остановиться на общих закономерностях этого процесса. К основным показателям почвенной эрозии относятся интенсивность и объемы смыва почвогрунтов, изменения уровня эродируемых земель, развития новых ландшафтных форм, формирование конусов выноса и пр. При этом механизмы водной почвенной эрозии, помимо прочего, предполагают и изменение состава вымываемых частиц грунта от верхних элементов ландшафта к подножиям склонов, а именно изменение крупности продуктов смыва. Как правило, отмечается постепенное увеличение процента содержания мелких частиц по направлению уменьшения уклона [Маккавеев, 1955]. При этом при равномерном уклоне вклад крупных частиц будет увеличиваться к подножию склона, а доля мелких фракций, наоборот, уменьшаться. Последнее объясняется увеличением мощности склонового потока по направлению уклона, и, как следствие, увеличением транспортирующего потенциала потока. В результате этого в смыв вовлекаются более крупные фракции, вклад которых уменьшает процентное содержание мелких частиц.

Целью настоящей работы является оценка динамики крупности продуктов смыва на малонарушенных склонах. В процессе выполнения работы были решены следующие задачи: 1) постановка эксперимента по инициации процессов водной эрозии на лесном

склоне в результате дождевания последнего (Ленинградская область) и анализ полученных результатов; 2) анализ гранулометрического состава отложений по направлению поверхностного стока на склоне безымянной балки, пересекающей правый склон долины р. Десны в центральной части г. Брянска.

Практика стоковых экспериментальных площадок

Эксперименты, проводимые на специально оборудованных стоковых площадках, позволяют оценить характеристики водного и твердого стока в заданных условиях формирования такового. Стоковые площадки представляют собой изолированные участки склона, оборудованные измерительными устройствами для количественной оценки воды и твердого вещества с этих площадок [Караушев, 1977]. Одни из первых стоковых площадок для наблюдения за стоком и эрозией почвы были оборудованы С.И. Небольсиным в 1922 году на базе Московской агрометеорологической станции [Небольсин, 1937] и А.С. Козменко в 1923 году на Новосильской опытно-овражной станции [Козменко, 1937]. Первыми основными качественными выводами по результатам наблюдения за водной эрозией на экспериментальных склонах явились следующие положения:

- 1) развитие современной эрозии обусловлено преимущественно сельскохозяйственной деятельностью человека;
- 2) растительность на водосборе в значительной степени уменьшает интенсивность эрозионного процесса.

На основании многочисленных опытов Т.Н. Neal в 1938 году получена эмпирическая зависимость смыва почвы W , т/га от средней интенсивности осадков m , мм/мин и средней крутизны склона i_0 , б/р [Neal, 1938]:

$$W=A \cdot M \cdot i_0^{0.8} \cdot m^{1.2},$$

где A – коэффициент, учитывающий водно-эрозионные факторы; M – слой осадков, мм.

Позже были получены зависимости коэффициента стока от объемов выноса твердого материала в зависимости от характеристик склона, слагающих его почвогрунтов и интенсивности дождевания и снеготаяния [Лопатин, 1952].

В 1975 году Государственным гидрологическим институтом и Всесоюзным научно-исследовательским институтом земледелия и защиты почв от эрозии были разработаны «Методические рекомендации по учету поверхностного стока и смыва при изучении водной эрозии»¹ для натуральных измерений смыва в условиях стационарных наблюдений на специализированных станциях [Заславский, 1977]. Эти рекомендации предусматривают требования к размерам стоковых площадок и их ландшафтной и почвенно-растительной однородности. Наиболее репрезентативной при этом полагается длина стоковой площадки свыше 100 м, поскольку незначительная протяженность экспериментального склона не отражает все закономерности протекания процессов водной эрозии в реальных условиях². Вопросы критериев подобия физических моделей эрозии почв и обзор основных моделей ее оценки приведены, например, в работах [Ларионов, 1993; Бастраков, 2010; Лисецкий и др., 2012].

Одной из основных характеристик процесса водной эрозии, изучаемых на экспериментальных стоковых площадках, является оценка противозэрозионной устойчивости разных типов почв, определяемая через объем твердого склонового стока. Противозэрозионная устойчивость ставится в зависимость от крутизны и экспозиции склона, состава и состояния почвогрунтов. При этом изучение динамики крупности смываемых частиц от вершины к подножию склона не нашло своего распространения в практике изучения процессов почвенного смыва на стоковых площадках.

¹ Методические рекомендации по учету поверхностного стока и смыва почвы при изучении водной эрозии. 1975. Всесоюзный научно-исследовательский институт защиты почв от эрозии, Государственный гидрологический институт. Л., Гидрометеиздат, 88 с.

² Заславский М.Н. 1983. Эрозиоведение. М., Высшая школа, 320 с.

Объекты и методы исследования

Исследование гранулометрического состава продуктов смыва с лесного склона и отложений на склоне по направлению поверхностного смыва осуществлялось на двух полигонах, расположенных в Ленинградской области и в г. Брянске, соответственно.

Распределение гранулометрического состава продуктов смыва на лесном склоне. В мае 2023 года сотрудниками Института озероведения РАН и Государственного гидрологического института был проведен полевой эксперимент по воспроизведению процессов почвенной эрозии на лесном склоне в поселке Ильичёво Ленинградской области. Целью данного эксперимента явился анализ динамики распределения крупности продуктов смыва в зависимости от удаленности от вершины склона.

Почвы исследуемого региона расположены на песчанике и имеют незначительную мощность 10–20 см. Экспериментальная площадка находится в южной части Карельского перешейка, на северном склоне котловины Большого Симагинского озера. Озеро остаточного происхождения, проточное; площадь зеркала – 2,71 км². Входит в озерно-речную систему, дренирующую южную часть Карельского перешейка. Котловина сформирована водной эрозией осадков первого Балтийского ледникового озера (пески, алевролиты, илы). Северный склон котловины сложен разнородными, преимущественно крупнозернистыми озерно-ледниковыми песками. Склон, на котором заложена экспериментальная площадка, – вогнутый, невысокий (7,5 м), средней крутизны, юго-западной экспозиции. Почвы экспериментальной площади – подзолистые иллювиально-железистые. Преобладающий тип растительности – сосняки-зеленомошники. Растительный покров представлен характерными для Северо-Запада РФ разными видами мхов, брусничником, сосняком. Для проведения эксперимента был выбран десятиметровый участок склона с уклоном 25° и шириной 1 м. На расстоянии десяти метров от подножия склона была установлена дождевальная станция с расходом воды 3·10⁻⁴ м³/с. Дождевальная станция равномерно орошала весь экспериментальный участок в течение двух часов (рис. 1а). Вдоль склона по линиям стекания через 1 м были диагонально поставлены приемники продуктов смыва так, чтобы верхние приемники не перекрывали дождевой поток для нижерасположенных. В общей сложности было установлено 9 приемников продуктов смыва (рис. 1б). До начала эксперимента на верхнем участке склона были взяты пробы почвогрунтов. Предварительно участок дождевания был без повреждения почвенного покрова расчищен от листового опада, шишек и хвой. В процессе дождевания в силу особенностей микрорельефа были сформированы два микроручейковых потока – от вершины склона до четвертого пункта отбора проб включительно и с шестого пункта отбора проб до девятого. Продукты смыва, поступившие в приемники, были проанализированы на гранулометрический состав в Лаборатории наносов ГГИ комбинированным методом сита–пипетка–фракциометр на наборе лабораторных сит с размером ячеек от 1,0 до 10,0 мм, пипеточной установке ПИ-22 и фракциометре ГР-82, соответственно.

Распределение гранулометрического состава отложений по направлению поверхностного стока исследовано на склоне безымянной балки, пересекающей правый склон долины р. Десны в центральной части г. Брянска (урочище «Соловьи»).

Особенности геологического строения и рельефа в местах отбора проб типичны для протяженной полосы правобережья р. Десны выше и ниже г. Брянска (около 20 км). Правый склон на этом отрезке долины – прямой, средней крутизны (15–20°), высотой 45–50 м; плавно (без выраженной бровки) переходящий в наклонную водораздельную поверхность и неширокую правобережную пойму. Склон пересечен многочисленными широкими и короткими балками с вогнутым днищем. В геологическом строении правого склона долины р. Десны участвуют 3 толщи.

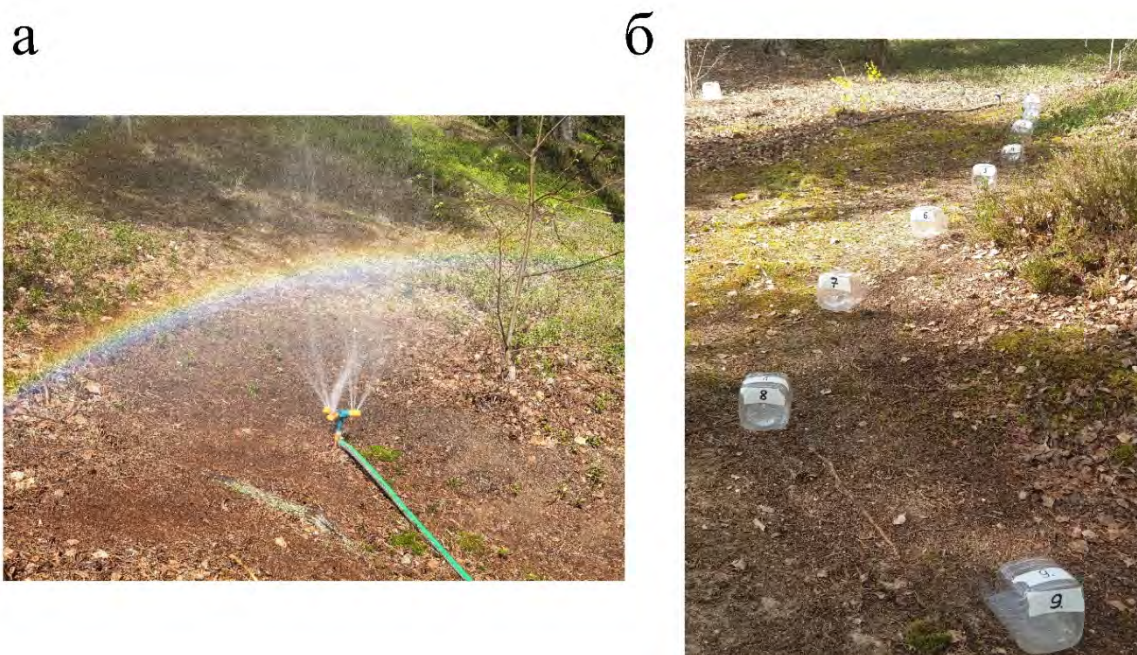


Рис. 1. Фотографии экспериментального склона
Fig. 1. Photos of the experimental slope

Сверху склон сложен легкими пылеватыми и песчанистыми элювиальными суглинками; в средней части – полускальными карбонатными грунтами (мергели и мел) верхнего мела с примесью опоки и трепела; в нижней части – мелкими песками и супесями. Коренные породы покрыты слоем элювиально-делювиальных отложений, мощность которых увеличивается к основанию склона.

Отбор проб выполнен в средней части безымянной балки, на левом склоне. Форма склона в профиле – вогнутая, в плане – прямая; высота – 24 м, уклон – 30°. Верхняя часть склона сложена легкими суглинками с примесью песчаного материала; средняя и нижняя – мергелем и мелом. В меловой толще, кроме того, встречаются примеси опоки, трепела и песка («песчаный мел»). Элювиально-делювиальные отложения суглинистого состава с примесью дресвы и щебня полускальных пород. Склон покрыт маломощным слоем дерново-подзолистых смытых почв. Растительный покров места отбора проб и окружающей территории – лиственный лес с сомкнутостью крон 60 %, в составе древостоя преобладают осина и клен американский, реже встречается липа. Уход за лесом происходит редко, склоны и днище балки покрыты упавшими стволами и опадом. Урочище используется как зона отдыха (городской лесопарк); склоны пересечены пешеходными и велосипедными тропами. В частности, на высоте 12,5 м от подножья поперек склона проложена тропа шириной до 2 м. Движение потока наносов по склону частично прерывается тропой, которая выступает в данном случае локальным механическим барьером. Граница между толщей легких суглинков и карбонатных пород проходит в 4–5 м выше тропы. На большей глубине в нижней части склона начинается плотный элювий карбонатных пород, сложенный преимущественно выветрелым, а не принесенным материалом.

Пробы склоновых отложений отобраны с глубины до 0,2 м и проанализированы на гранулометрический состав в Испытательной лаборатории ФГБОУ ВО Брянского ГАУ комбинированным методом сита–пипетка–ареометр на наборе лабораторных сит с размером ячеек от 1,0 до 10,0 мм, пипеточной установке ПИ–22 и ареометре АГ, соответственно.

Результаты и их обсуждение

Распределение гранулометрического состава продуктов смыва на лесном склоне.
 Результаты гранулометрического анализа продуктов смыва на вершине склона (точка 0) и продуктов смыва приведены в табл. 1 и на рис. 2. Как следует из рис. 2, вклад фракций крупности до 0,001 мм уменьшается вниз по склону. Тогда как вклад частиц крупностью выше 0,1 мм, наоборот, увеличивается к подножию склона. На рис. 3 (а) приведена зависимость вклада частиц крупностью 0,0005 мм, 0,001 мм и 0,5 мм для двух микроручейковых потоков от расстояния от вершины склона.

Поле точек на рис. 3 (а) хорошо аппроксимируется степенными и линейными функциями. Зависимость обеспеченности крупности частиц больших диапазонов (рис. 3 (б)) также имеет выраженный тренд. Для девятого пункта пробоотбора точка на рис. 3 (б) не нанесена на график, поскольку основной вклад в кривую гранулометрического состава привнесли частицы крупностью более 0,5 мм.

Таблица 1
 Table 1

Обеспеченность крупности частиц смытого в результате дождевания грунта, %
 Share of particles of various sizes in the soil washed away as a result of sprinkling, %

d , мм	Номера пунктов пробоотбора									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0001	–	9,7	6,0	0,5	0,1	–	–	–	–	–
0,0005	1,1	16,0	14,2	5,7	1,2	5,9	22,8	7,9	8,0	0,5
0,001	3,4	86,5	25,2	5,9	2,3	10,4	53,1	35,5	23,8	2,2
0,005	15,2	88,5	89,0	49,8	98,1	14,7	72,4	81,7	97,9	10,1
0,1	16,0	89,8	89,6	79,3	98,5	16,0	76,1	82,7	98,6	10,6
0,2	18,2	94,7	93,4	96,1	99,1	21,6	79,3	84,6	98,7	12,6
0,5	19,8	95,8	96,2	99,7	99,5	29,0	84,5	87,2	99,0	20,7
1	70,0	100	100	100	100	79,3	100	100	100	54,0
2	89,5	–	–	–	–	79,3	–	–	–	84,9
5	95,0	–	–	–	–	100	–	–	–	100
10	96,9	–	–	–	–	–	–	–	–	–
20	100	–	–	–	–	–	–	–	–	–

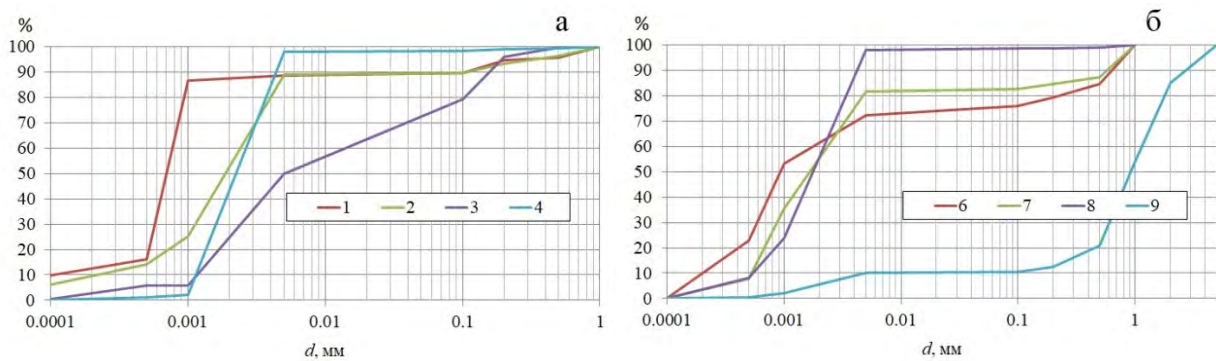


Рис. 2. Кривые распределения гранулометрического состава на пунктах отбора проб 1–4 (а) и на пунктах отбора проб 6–9 (б)
 Fig. 2. Distribution curves of the granulometric composition at sampling points 1–4 (a) and at sampling points 6–9 (b)

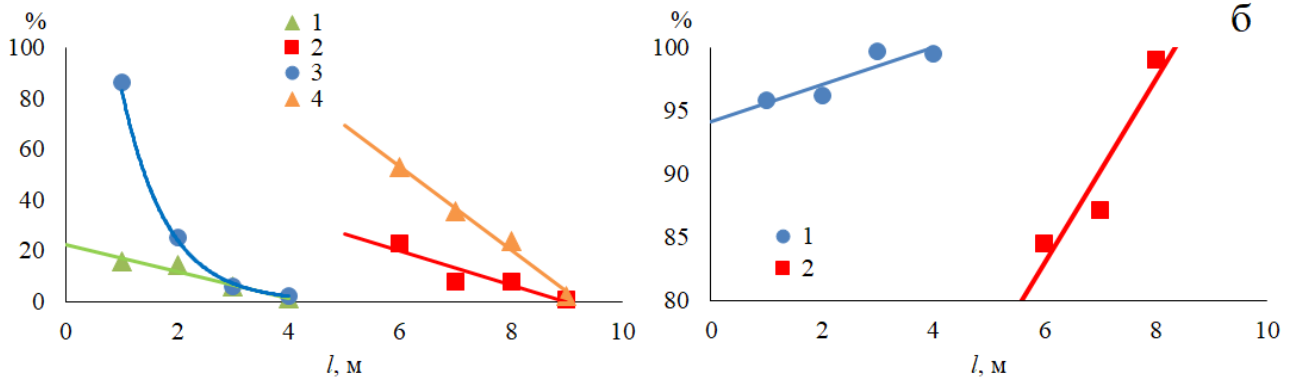


Рис. 3. Зависимость обеспеченности продуктов смыва крупностью 0,0005 мм (1 и 3) и 0,001 мм (2 и 4) (а) и крупностью 0,5 мм (б) от расстояния от вершины склона l , м
Fig. 3. Dependence of the presence of washout products with a size of 0.0005 mm (1 and 3) and 0.001 mm (2 and 4) (a), and a size of 0.5 mm (b), on the distance from the top of the slope l , m

Результаты эксперимента подтверждают теоретически обоснованные закономерности распределения крупности частиц – доля частиц крупностью до 0,001 мм в продуктах выноса уменьшается от вершины к подножию склона, тогда как доля частиц крупностью от 0,1 мм увеличивается. При этом в средней части гранулометрической кривой выраженных закономерностей динамики вклада крупности отдельных частиц по длине склона не наблюдается.

Распределение гранулометрического состава отложений (урочище «Соловьи»). Всего получено 6 проб (по 3 выше и ниже тропы); соответственно 2 с части склона, сложенной суглинками, 4 – с части, сложенной карбонатами. Процентное соотношение фракций приведено в табл. 2, нумерация точек пробоотбора начинается от вершины склона.

Таблица 2
Table 2

Обеспеченность крупности частиц на склоне безымянной балки, %
Share of particles of various sizes on the slope of an unnamed gulch, %

d , мм	Номера пунктов пробоотбора					
	1	2	3	4	5	6
< 0,002	40,5	42,5	40,8	45,5	45,1	42,1
0,002–0,01	41,6	48,4	47,2	47,7	48	50
0,01–0,05	48,1	63,5	59,1	54	50,9	57,9
0,05–0,1	95,1	93,3	85,5	86	62,9	84,2
0,1–0,25	99,3	97,9	94,4	94,5	66,7	92
0,25–0,5	99,7	98,6	98,2	97,5	90,2	93,6
0,5–1	99,8	98,8	98,6	100	99,7	94,4
1–2	99,9	99,6	99,5	–	99,8	94,5
2–5	100	99,8	99,7	–	99,9	94,7
5–10	–	100	100	–	100	95,5
> 10	–	–	–	–	–	100



Различия гранулометрического состава склоновых отложений проявляются как между отдельными пробами, так и между разными частями склона – верхней и нижней, сложенной суглинками и сложенной карбонатами. Причиной различий выступают в разных случаях как особенности состава пород, подстилающих склоновые отложения, так и закономерности перемещения наносов и выветрелого материала.

Доля грубых обломков в пробах составляет обычно менее 0,5 %, только в одной пробе – у основания склона существенно возрастает – до 5,5 %. По-видимому, источник грубых обломков – поступление трудноразмокаемых продуктов выветривания из части карбонатной толщи, отличающейся большей долей кремнеземистого материала.

Доля песчаного элемента в пробах грунта колеблется от 36,6 до 51,8 %, преобладают мелкие и тонкие фракции. В распределении элемента есть два слабо выраженных максимума, обусловленных составом пород в естественном сложении. Первый максимум в верхней части склона (доля элемента – 51,8 %) обусловлен значительной долей тонкопесчаной фракции в легких суглинках, подстилающих склоновые отложения. Второй максимум (доля песчаного элемента – 49 %) в нижней части склона обусловлен поступлением в толщу склоновых отложений продуктов выветривания песчаного мела. На источник материала указывает также разнообразный состав фракций песчаного элемента – от крупной до тонкой, свойственный песчаному мелу.

Доля пылеватых частиц в делювии – наименее постоянная (от 5,8 % до 21 %). Выражено два максимума – в средней (18–20 %) и нижней (15,8 %) частях склона. Формирование максимумов объясняется, вероятно, перераспределением легко размываемых пылеватых частиц в результате размыва пород, слагающих склон и продуктов их выветривания. Увеличение доли пылеватых частиц объясняется их приносом сверху, а заметное сокращение в средней части склона – перехватом тропой потока наносов. Примечательно, в склоновых отложениях над карбонатными породами в верхней части склона (выше тропы) доля пылевой фракции больше, чем над аналогичными отложениями в нижней части склона. Этот факт указывает на поступление части пылеватых частиц с перемещением материала вниз по склону.

Доля глинистых частиц мало изменяется вниз по склону от 40,5 до 45,1 %. Несколько увеличивается их доля в нижней части склона, сложенной карбонатными породами.

Для объяснения различий гранулометрического состава склоновых отложений могут быть предложены следующие гипотезы:

1. Состав толщи элювиально-делювиальных отложений сильно зависит от подстилающих пород. Поступление разных продуктов выветривания формирует локальные максимумы в распределении отдельных фракций.

2. Закономерность увеличения доли крупных фракций книзу склона выражена слабее. Напротив, заметно выражено увеличение доли пылеватых частиц в пробах вниз по склону, вследствие их большей подвижности. Меньшая устойчивость пылеватых частиц к смыву определяется (при прочих равных условиях) большей массой песчаных частиц и высоким сцеплением глинистых.

Заключение

Результаты анализа гранулометрического состава продуктов смыва при дождевании лесного склона (Ленинградская область) и отложений на склоне безымянной балки (г. Брянск) показали, что при сравнительно однородном литологическом составе грунтов размываемой склоновой поверхности, распределение крупности склоновых отложений отражает теоретические обоснованные закономерности – увеличение доли крупных фракций к подножию. При этом при значительных различиях литологического состава грунтов (нередко характерных для склонов в естественном сложении), изменения гранулометрического состава склоновых отложений от вершины к подножию

не объясняются исключительно увеличением силы потока. Наиболее вероятными причинами, объясняющими распределение гранулометрического состава отложений на склонах сложного литологического строения, являются разный состав и неодинаковая подвижность продуктов выветривания.

Список литературы

- Бастраков Г.В. 2010. Теоретическое обоснование физических моделей эрозии почв и горных пород. В кн.: Эрозионные и русловые процессы. Под ред. Р.С. Чалова. М., Географический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова: 80–101.
- Заславский М.Н. 1977. Эрозионно опасные земли на территории СССР. Почвоведение, 8: 100–105.
- Караушев А.В. 1977. Теория и методы расчета речных наносов. Л., Гидрометеиздат, 272 с.
- Козменко А.С. 1937. Борьба с эрозией почв. М., Л., Издательство Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук им. В.И. Ленина, 92 с.
- Ларионов Г.А. 1993. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. Москва, Изд-во МГУ, 198 с.
- Лисецкий Ф. Н., Черный С.Г., Светличный А.А. 2012. Современные проблемы эрозиоведения. Белгород, Константа, 456 с. <https://doi.org/10.13140/2.1.1029.9682>.
- Лопатин Г.В. 1952. Наносы рек СССР. М., Географгиз, 363 с.
- Маккавеев Н.И. 1955. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М., АН СССР, 346 с.
- Небольсин С.И. 1937. Элементарный поверхностный сток. Л., М., Гидрометеорологическое издательство, 41 с.
- Asadi H., Ghadiri H., Rose C.W., Yu B., Hussein J. 1999. An Investigation of Flow-Driven Soil Erosion Processes at Low Streampowers. *Journal of Hydrology*, 342(1–2): 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.05.019>
- Asadi H., Moussavi A., Ghadiri H., Rose C.W. 2011. Flow-Driven Soil Erosion Processes and the Size Selectivity of Sediment. *Journal of Hydrology*, 406(1–2): 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.010>
- Batista P.V.G., Davies J., Silva M.L.N., Quinton J.N. 2019. On the Evaluation of Soil Erosion Models: Are We Doing Enough? *Earth-Science Reviews*, 197: 102898. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102898>
- Borrelli P., Alewell Ch., Alvarez P., Anache J.A.A., Baartman J., Ballabio C., Bezak N., Biddoccu M., Cerdà A., Chalise D., Chen S., Chen W., De Girolamo A.M., Gessesse G.D., Deumlich D., Diodato N., Efthimiou N., Erpul G., Fiener P., Freppaz M., Gentile F., Gericke A., Haregeweyn N., Hu B., Jeanneau A., Kaffas K., Kiani-Harchegani M., Villuendas I.L., Li Ch., Lombardo L., López-Vicente M., Lucas-Borja M.E., Märker M., Matthews F., Miao Ch., Mikoš M., Modugno S., Möller M., Naipal V., Nearing M., Owusu S., Panday D., Patault E., Patriche C.V., Poggio L., Portes R., Quijano L., Rahdari M.R., Renima M., Ricci G.F., Rodrigo-Comino J., Saia S., Samani A.N., Schillaci C., Syrris V., Kim H.S., Spinola D.N., Oliveira P.T., Teng H., Thapa R., Vantas K., Vieira D., Yang J.E., Yin Sh., Zema D.A., Zhao G., Panagos P. 2021. Soil Erosion Modelling: A Global Review and Statistical Analysis. *Science of the Total Environment*, 780: 146494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>
- Hairsine P.B., Sander G.C., Rose C.W., Parlange J.-Y., Hogarth W.L., Lisle I., Rouhipour H. 1999. Unsteady Soil Erosion Due to Rainfall Impact: a Model of Sediment Sorting on the Hillslope. *Journal of Hydrology*, 220(3–4): 115–128. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00068-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00068-2)
- Issa O.M., Bissonnais Y.L., Planchon O., Favis-Mortlock D., Silvera N., Wainwright J. 2006. Soil Detachment and Transport on Field- and Laboratory-Scale Interrill Areas: Erosion Processes and the Size-Selectivity of Eroded Sediment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31 (8): 929–939.
- Kinnell P.I.A. 2020. The Influence of Time and Other Factors on Soil Loss Produced by Rain-Impacted Flow Under Artificial Rainfall. *Journal of Hydrology*, 587: 125004. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125004>
- Lin J., Huang Y., Zhao G., Jiang F., Wang M.-K., Ge H. 2017. Flow-Driven Soil Erosion Processes and the Size Selectivity of Eroded Sediment on Steep Slopes Using Colluvial Deposits in a Permanent Gully. *Catena*, 157: 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.015>



- Neal T.H. 1938. Effect of Degree of Slope and Rainfall Characteristics on Runoff and Soil Erosion. *Agricultural Engineering Research Bulletin*, 280: 45 p.
- Rienzi E.A., Fox J.F., Grove J.H., Matocha C.J. 2013. Interrill Erosion in Soils with Different Land Uses: The Kinetic Energy Wetting Effect on Temporal Particle Size Distribution. *Catena*, 107: 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.02.007>
- Zhang P., Yao W., Liu G., Xiao P., Sun W. 2020. Experimental Study of Sediment Transport Processes and Size Selectivity of Eroded Sediment on Steep Pisha Sandstone Slopes. *Geomorphology*, 363: 107211. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107211>

References

- Bastrakov G.V. 2010. Teoreticheskoe obosnovanie fizicheskikh modelei erozii pochv i gornikh porod [Theoretical Substantiation of Physical Models of Soil and Rock Erosion]. In: *Eroziionnie i ruslovie protsessi [Erosion and Riverbed Processes]*. Ed. by R.S. Chalov. Moscow, Publ. Geograficheskii fakultet Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta im. M.V. Lomonosova: 80–101.
- Zaslavsky M.N. 1977. Eroziionno opasnie zemli na territorii SSSR [Erosive Lands on the Territory of the USSR]. *Pochvovedenie*, 8: 100–105.
- Karashev A.V. 1977. Teoriya i metodi rascheta rechnikh nanosov [Theory and Methods of Calculating River Sediments]. Leningrad, Publ. Hydrometeoizdat, 272 p.
- Kozmenko A.S. 1937. Borba s eroziiey pochv [The Fight Against Soil Erosion]. Moscow, Leningrad, Publ. Vsesoyuznoi akademii selskokhozyaistvennikh nauk im. V.I. Lenina, 92 p.
- Larionov G.A. 1993. Eroziya i deflyatsiya pochv: osnovnyye zakonomernosti i kolichestvennyye otsenki [Soil Erosion and Deflation: Basic Patterns and Quantitative Estimates]. Moscow, Publ. Moscow State University, 198 p.
- Lisetsky F.N., Chernyi S.G., Svetlichnyi A.A. 2012. Recent Developments in Erosion Science. Belgorod, Publ. Constanta, 456 p. (in Russian). <https://doi.org/10.13140/2.1.1029.9682>.
- Lopatin G.V. 1952. Nanosi rek SSSR [Sediments of the Rivers of the USSR]. Moscow, Publ. Geografiz, 363 p.
- Makkaveev N.I. 1955. Ruslo reki i eroziya v yee basseine [Riverbed and Erosion in Its Basin]. Moscow, Publ. Academy of Sciences of the USSR, 346 p.
- Nebolsin S.I. 1928. Elementarnii poverkhnostnii stok [Elementary Surface Runoff]. Leningrad, Moscow, Publ. Gidrometeorologicheskoe, 41 p.
- Asadi H., Ghadiri H., Rose C.W., Yu B., Hussein J. 1999. An Investigation of Flow-Driven Soil Erosion Processes at Low Streampowers. *Journal of Hydrology*, 342(1–2): 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.05.019>
- Asadi H., Moussavi A., Ghadiri H., Rose C.W. 2011. Flow-Driven Soil Erosion Processes and the Size Selectivity of Sediment. *Journal of Hydrology*, 406(1–2): 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.010>
- Batista P.V.G., Davies J., Silva M.L.N., Quinton J.N. 2019. On the Evaluation of Soil Erosion Models: Are We Doing Enough? *Earth-Science Reviews*, 197: 102898. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102898>
- Borrelli P., Alewell Ch., Alvarez P., Anache J.A.A., Baartman J., Ballabio C., Bezak N., Biddoccu M., Cerdà A., Chalise D., Chen S., Chen W., De Girolamo A.M., Gessesse G.D., Deumlich D., Diodato N., Efthimiou N., Erpul G., Fiener P., Freppaz M., Gentile F., Gericke A., Haregeweyn N., Hu B., Jeanneau A., Kaffas K., Kiani-Harchegani M., Villuendas I.L., Li Ch., Lombardo L., López-Vicente M., Lucas-Borja M.E., Märker M., Matthews F., Miao Ch., Mikoš M., Modugno S., Möller M., Naipal V., Nearing M., Owusu S., Panday D., Patault E., Patriche C.V., Poggio L., Portes R., Quijano L., Rahdari M.R., Renima M., Ricci G.F., Rodrigo-Comino J., Saia S., Samani A.N., Schillaci C., Syrris V., Kim H.S., Spinola D.N., Oliveira P.T., Teng H., Thapa R., Vantas K., Vieira D., Yang J.E., Yin Sh., Zema D.A., Zhao G., Panagos P. 2021. Soil Erosion Modelling: A Global Review and Statistical Analysis. *Science of the Total Environment*, 780: 146494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>
- Hairsine P.B., Sander G.C., Rose C.W., Parlange J.-Y., Hogarth W.L., Lisle I., Rouhipour H. 1999. Unsteady Soil Erosion Due to Rainfall Impact: a Model of Sediment Sorting on the Hillslope. *Journal of Hydrology*, 220(3–4): 115–128. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00068-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00068-2)

- Issa O.M., Bissonnais Y.L., Planchon O., Favis-Mortlock D., Silvera N., Wainwright J. 2006. Soil Detachment and Transport on Field- and Laboratory-Scale Interrill Areas: Erosion Processes and the Size-Selectivity of Eroded Sediment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(8): 929–939.
- Kinnell P.I.A. 2020. The Influence of Time and Other Factors on Soil Loss Produced by Rain-Impacted Flow Under Artificial Rainfall. *Journal of Hydrology*, 587: 125004. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125004>
- Lin J., Huang Y., Zhao G., Jiang F., Wang M.-K., Ge H. 2017. Flow-Driven Soil Erosion Processes and the Size Selectivity of Eroded Sediment on Steep Slopes Using Colluvial Deposits in a Permanent Gully. *Catena*, 157: 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.015>
- Neal T.H. 1938. Effect of Degree of Slope and Rainfall Characteristics on Runoff and Soil Erosion. *Agricultural Engineering. Research Bulletin*, 280: 45 p.
- Rienzi E.A., Fox J.F., Grove J.H., Matocha C.J. 2013. Interrill Erosion in Soils with Different Land Uses: The Kinetic Energy Wetting Effect on Temporal Particle Size Distribution. *Catena*, 107: 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.02.007>
- Zhang P., Yao W., Liu G., Xiao P., Sun W. 2020. Experimental Study of Sediment Transport Processes and Size Selectivity of Eroded Sediment on Steep Pisha Sandstone Slopes. *Geomorphology*, 363: 107211. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107211>

*Поступила в редакцию 27.06.2024;
поступила после рецензирования 28.08.2024;
принята к публикации 18.09.2024*

*Received June 27, 2024;
Revised August 28, 2024;
Accepted September 18, 2024*

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

Шмакова Марина Валентиновна, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории математических методов моделирования, Институт озераведения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», г. Санкт-Петербург, Россия

Турутина Татьяна Валерьевна, научный сотрудник лаборатории гидрометрических приборов, Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

Лобанов Григорий Владимирович, кандидат географических наук, доцент кафедры географии, экологии и землеустройства, Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского, г. Брянск, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Marina V. Shmakova, Doctor of Sciences in Geography, Leading Researcher at the Laboratory of Mathematical Modeling Methods, Institute of Limnology RAS Separate Structural Subdivision of the Federal State Budgetary Institution of Science "St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences", St. Petersburg, Russia

Tatyana V. Turutina, Researcher at the Laboratory of Hydrometric Devices, State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

Grigory V. Lobanov, PhD in Geography, Associate Professor of the Department of Geography, Ecology and Land Management, State Educational Institution Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky, Bryansk, Russia



УДК 004.8

DOI 10.52575/2712-7443-2024-48-4-526-541

Применение геопространственного искусственного интеллекта для классификации изображений дистанционного зондирования

Каличкин В.К., Гарафутдинова Л.В., Федоров Д.С.

Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук
Россия, 630501, Новосибирская область, р.п. Краснообск, ул. Центральная, 26
E-mail: lv.garafutdinova@mail.ru

Аннотация. В последние годы геопространственный искусственный интеллект стал неотъемлемым инструментом в анализе и интерпретации изображений дистанционного зондирования. Данная работа исследует применение методов геопространственного искусственного интеллекта для эффективной классификации изображений дистанционного зондирования. Традиционные подходы к обработке изображений часто сталкиваются с ограничениями, связанными с вариабельностью состояния объектов, качеством данных и объемами информации. Использование алгоритмов машинного обучения и глубокого обучения позволяет преодолеть эти препятствия, обеспечивая более точные и надежные результаты. Для классификации пространственных объектов использовали космические снимки *Sentinel-2* с мая по апрель территории землепользования фермерского хозяйства (ФХ) Новосибирской области с пространственным разрешением 10 м в пикселе. Сегментацию изображений проводили в программном обеспечении *SAGA GIS*. Для машинного обучения использовали методы – *Random Forest (RF)*, *Extreme Gradient Boosting (XGBoost)* и многослойный перцептрон (*MLP*). Среди всех моделей *MLP* показала наилучшие результаты с точностью 95,20 % и высоким значением коэффициента Каппа Козна, тогда как модели *RF* и *XGBoost* показали 85,0 %. Это делает модель *MLP* оптимальным выбором, особенно когда важна высокая точность классификации.

Ключевые слова: геопространственный искусственный интеллект, дистанционное зондирование, машинное обучение, сегментация, классификация

Для цитирования: Каличкин В.К., Гарафутдинова Л.В., Федоров Д.С. 2024. Применение геопространственного искусственного интеллекта для классификации изображений дистанционного зондирования. Региональные геосистемы, 48(4): 526–541. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-526-541

The Use of Geospatial AI for Remote Sensing Image Classification

Vladimir K. Kalichkin, Lyudmila V. Garafutdinova, Dmitry S. Fedorov

Siberian Federal Scientific Centre of AgroBioTechnologies of the Russian Academy of Sciences,
2b Tsentralnaya St, Novosibirsk Region, Krasnoobsk 630501, Russia
E-mail: lv.garafutdinova@mail.ru

Abstract. In recent years, geospatial artificial intelligence has become an integral tool in the analysis and interpretation of remote sensing images. This work explores the application of geospatial artificial intelligence methods for effective classification of remote sensing images. Traditional image processing approaches often face limitations related to object state variability, data quality, and information volume. The use of machine learning and deep learning algorithms allows overcoming these obstacles, providing more accurate and reliable results. For the classification of spatial objects, Sentinel-2 satellite images of the areas used by the Novosibirsk region farms taken from May to April were used, with a spatial resolution of 10 m per pixel. Image segmentation was performed using SAGA GIS software. For machine

learning, Random Forest (RF), Extreme Gradient Boosting (XGBoost), and Multilayer Perceptron (MLP) methods were used. Among all models, MLP showed the best results with the accuracy of 95.20 % and a high Cohen's Kappa coefficient, while RF and XGBoost models showed 85.0 %. This makes the MLP model an optimal choice, especially when a high classification accuracy is important.

Keywords: geospatial artificial intelligence, remote sensing, machine learning, segmentation, classification

For citation: Kalichkin V.K., Garafutdinova L.V., Fedorov D.S. 2024. The Use of Geospatial AI for Remote Sensing Image Classification. *Regional Geosystems*, 48(4): 526–541. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-526-541

Введение

Классификация изображений земных объектов с помощью дистанционного зондирования – сложный процесс, требующий учета многих признаков. Основные этапы классификации изображений включают предварительную обработку изображений (сегментация), определение подходящей системы классификации, извлечение признаков, выбор обучающих данных и оценку точности [Mehmood et al., 2022]. Интеграция дистанционного зондирования, географических информационных систем (ГИС) и искусственного интеллекта (ИИ) стала перспективным направлением исследований в этой предметной области [Колесников, 2022; Janga et al., 2023]. Эффективное использование множества характеристик данных дистанционного зондирования и выбор подходящего метода классификации особенно важны для повышения ее точности.

ГИС становятся все более популярными в различных областях, таких как управление окружающей средой, транспорт, сельское хозяйство и др. Данные ГИС фиксируют местоположения наблюдений или объектов Земли, их связанные атрибуты и пространственные отношения, которые существуют между такими наблюдениями и объектами. ГИС позволяют собирать, анализировать и визуализировать географические данные, тем самым способствуют принятию решений на основе пространственных закономерностей и взаимосвязей. Однако объем этих данных увеличивается высокими темпами и традиционные методы ГИС сталкиваются с проблемами их обработки и анализа. Например, по данным *NASA Earth Science Data Systems (ESDS)*, облако *Earthdata* содержало более 59 петабайт данных о Земле по состоянию на сентябрь 2021 года. По оценкам *ESDS*, ожидается, что это количество увеличится до более чем 148 ПБ в 2023 году, 205 ПБ в 2024 и 250 ПБ в 2025 году (<https://www.earthdata.nasa.gov/eosdis/cloud-evolution>). С целью решения этой проблемы, в том числе в сельском хозяйстве, получило развитие направление под термином «геопропространственный искусственный интеллект» (англ. *Geospatial Artificial Intelligence – GeoAI*) [Li, Hsu, 2022; Sagan et al., 2024].

Геопропространственный искусственный интеллект – это использование ИИ, включая машинное обучение (МО) и глубокое обучение (ГО), интегрированное с ГИС, для получения знаний посредством классификации изображений и анализа пространственных данных [Ekeanyanwu et al., 2022; Choi, 2023]. ИИ предполагает разработку интеллектуальных машин, которые могут выполнять задачи, обычно требующие человеческого интеллекта. МО фокусируется на разработке алгоритмов, которые позволяют машинам учиться на данных, и используется для выполнения классификации изображений, обогащения данных кластеризацией и моделирования пространственных отношений в ГИС [Якушев и др., 2022; Radočaj, Jurišić, 2022]. Обучение обычно происходит с участием человека, при этом необходимо предварительно помечать данные, чтобы алгоритм понимал характерные признаки каждого типа земной поверхности и мог их использовать для автоматической идентификации этих типов на других изображениях. Хорошо известными алгоритмами МО для классификации изображений дистанционного зондирования являются метод случайного леса (*Random*



Forest – RF), экстремальный градиентный бустинг (*eXtreme Gradient Boosting – XGBoost*) и метод опорных векторов (*Support Vector Machines – SVM*) [Zhang et al., 2022; Choi, 2023]. Случайный лес включает в себя пакетирование, создание ансамбля деревьев решений путем случайного выбора объектов из обучающих данных. Комбинируя несколько деревьев принятия решений, *RF*-классификаторы могут обеспечивать надежные прогнозы, предлагая измерения переменной важности [Basheer et al., 2022]. Подобно *RF*, метод *XGBoost* также использует деревья решений в качестве базовых средств обучения, но продвигает процесс дальше, объединяя сильные стороны отдельных деревьев в технике бустинга [Nalluri et al., 2020]. Другим традиционным методом являются *SVM*, который классифицирует данные путем обнаружения многомерных гиперплоскостей и эффективно разделяет отдельные классы, что, однако, не всегда сопровождается лучшей классификацией, чем при использовании *RF* [Adugna et al., 2022].

ГО является подразделом МО, которое использует нейронные сети для обработки больших и сложных наборов данных. В отличие от МО в моделях ГО участие человека ограничивается подготовкой данных, выбором признаков и модели, ее архитектуры и др. Входные данные анализируются через различные слои сети, причем каждый слой определяет конкретные характеристики и закономерности в этих данных [Vali et al., 2020]. Например, если необходимо идентифицировать такие объекты, как растительность и дороги, модель ГО может обучаться с помощью изображений различных типов растительности и дорог, обрабатывая эти изображения через слои внутри нейронной сети, а затем находит идентификаторы, необходимые для классификации вышеупомянутых объектов. Однако модели на основе нейронных сетей считаются моделями «черного ящика» и поэтому сложны для понимания причин, лежащих в основе их классификации и прогноза [Carabantes, 2020]. В рамках развития парадигмы *GEOBIA* разработано большое количество моделей интеграции машинного обучения с ГИС, в том числе искусственных нейронных сетей различной архитектуры и размера, обладающих разной эффективностью классификации [Chen et al., 2018; Johnson, Ma, 2020; Фомина, 2023; Ezzahouani et al., 2023].

В целом существует множество различных моделей классификации, однако утверждать, что есть лучшая для всех изображений не представляется возможным, поскольку эффективность моделей зависит от исходных данных и конечного применения. Вопросы тематической обработки (интерпретации) данных дистанционного зондирования непосредственно связаны с проблемой выбора адекватных алгоритмов классификации [Асмус и др., 2018]. В предыдущей работе авторов [Гарафутдинова и др., 2024] были протестированы два алгоритма машинного обучения (*SVM* и *RF*) с общей точностью классификации объектов землепользования 78,4 % и 82,3 %, соответственно. В данной работе предпринята попытка увеличить эффективность моделей классификации изображений с помощью применения методологии геопространственного искусственного интеллекта.

Цель исследований – разработать интегрированные с ГИС модели МО и ГО, способствующие повышению точности классификации изображений дистанционного зондирования.

Объекты и методы исследований

Исследования выполнены на территории землепользования фермерского хозяйства (ФХ) в Искитимском районе Новосибирской области, расположенного в центральной лесостепной подзоне (54°22'37.64" с.ш., 82°47'18.73" в.д.) с общей площадью 28759 га. Территория ФХ в основном представляет сильно изрезанную многочисленными логами и балками равнину с абсолютными отметками над уровнем моря от 206 до 278 м. В почвенном покрове преобладают серые лесные, чернозем выщелоченный и луговые почвы.

Для сегментации и классификации объектов внутрихозяйственного землепользования использованы многозональные космические снимки *Sentinel-2* с пространственным разрешением 10 м в пикселе за апрель – начало мая 2023 года, скаченные с *Sentinelhub*

(<https://www.sentinel-hub.com>). Из 13 спектральных каналов *Sentinel-2* в работе использовали три полосы видимого диапазона (*RGB*) – красный (*B02*), зеленый (*B03*), синий (*B04*) и инфракрасный (*B08*).

Предварительная обработка изображений проведена с помощью программного продукта *SAGA GIS* версии 8.5.1 с открытым исходным кодом и состояла из радиометрической коррекции для устранения варьирования значений яркости пикселей; атмосферной коррекции – для определения расположения диапазонов съемки за счет окон прозрачности; геометрической коррекции, которая включала исправление искажений снимка (полосчатость, выпадение строк), а также геокодирование – привязывание каждой точки изображения к координате соответствующей точки на местности.

Сегментацию изображения проводили с использованием объектно-ориентированного алгоритма «*Object Based Image Segmentation*» (*OBIS*). Алгоритм *OBIS* в *SAGA GIS* позволяет объединить несколько модулей в один процесс автоматизированной сегментации изображений. Теоретическая основа алгоритма описана в работе [Hossain, Chen, 2019].

Формирование вектора признаков для каждого пикселя осуществляли на основе информации, извлеченной из многозонального изображения дистанционного зондирования. К вектору признаков относили яркость и текстуру по каждому спектральному каналу. Извлечение текстурных характеристик из растровых данных осуществляли с помощью функции *r.texture* в *GRASS GIS*, применяемой через интерфейс *QGIS*.

Выбор обучающих данных и формирование выборки для классификации выполняли посредством экспертного анализа сегментов, где признаки выбирали таким образом, чтобы их изменения в пределах каждого сегмента были малы, а между сегментами – велики. К признакам предъявляли требования устойчивости, нечувствительности к искажениям, вращению и поддержанию различия классов. Исходная выборка состояла из 3938 сегментов. Из них 196 были присвоены классы (1 – пашня; 2 – растительность; 3 – лес, лесополоса; 4 – застройка; 5 – водоемы), которые были разделены на обучающую и тестовую выборки в соотношении 80 и 20 % соответственно.

Классификацию полученных объектов осуществляли с использованием алгоритмов машинного обучения – случайный лес (*Random Forest – RF*), экстремальный градиентный бустинг (*Extreme Gradient Boosting – XGBoost*) и нейронная сеть с архитектурой многослойного персептрона (*Multilayer Perceptron – MLP*) в *SAGA GIS*, а также с использованием языка программирования *Python* в интерактивном блокноте *Jupyter*.

RF представляет собой ансамблевый метод, объединяющий множество деревьев решений. Каждое дерево обучается на случайной подвыборке исходных данных и признаков [Breiman, 2001]. Эффективность *RF* достигается за счет агрегации «слабых» классификаторов, что снижает риск переобучения и повышает обобщающую способность модели. *XGBoost* – усовершенствованная реализация градиентного бустинга, оптимизированная для высокой производительности и точности. Алгоритм использует параллельную обработку для построения деревьев решений, применяет регуляризацию для предотвращения переобучения и использует оптимизированную структуру данных для эффективного поиска разбиений [Chen, Guestrin, 2016; Nalluri et al., 2020]. *MLP* – тип искусственной нейронной сети прямого распространения, состоящий из входного слоя, одного или нескольких скрытых слоев и выходного слоя [Alom et al., 2019]. *MLP* позволяет моделировать сложные нелинейные зависимости в данных. Каждый нейрон в скрытых слоях использует нелинейную функцию активации.

Оценку точности полученных результатов проводили с помощью матрицы путаницы (*confusion matrix*) и коэффициента Каппа Коэна.

Матрица путаницы представляет собой таблицу, которая показывает соотношение между предсказанными и истинными классами. Она позволяет визуализировать производительность модели классификации, отображая количество правильных и неправильных предсказаний для каждого класса.

Коэффициент Каппа Коэна (κ) – это статистическая мера согласованности между наблюдаемой и ожидаемой точностью классификации. Он учитывает возможность случайного согласия и поэтому считается более надежным показателем, чем простая точность. Значения κ варьируются от -1 до 1 , где 1 означает полное согласие, 0 – случайное согласие, а отрицательные значения указывают на согласие хуже, чем случайное. Коэффициент Каппа рассчитывается по формуле:

$$\kappa = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e}, \quad (1)$$

где p_o – наблюдаемая согласованность (точность), а p_e – ожидаемая согласованность [Zarf et al., 2016].

Отображение полученных результатов в виде карты выполнено с использованием программного продукта с открытым исходным кодом *QuantumGIS (QGIS)* (<https://qgis.org/ru/site/>) в привязанной к международной геодезической системе координат *WGS 84*.

Результаты и их обсуждение

Для анализа пространственных объектов идеально подходит ГИС, потому что она предназначена для хранения, обработки, поиска, распространения и представления пространственной информации. Кроме того, ГИС является также программным средством. Поэтому ГИС дает возможность для оперативного внедрения возможностей ИИ в рамках исследовательской деятельности. Например, в программных продуктах *ArcGIS*, *SAGA GIS* и *QGIS* разработаны модули, основанные на современных алгоритмах для принятия решений и анализа данных. Модули включают в себя инструментарий, позволяющий реализовать модели МО путем включения пространственных данных и выполнять классификацию объектов дистанционного зондирования. С другой стороны, данные дистанционного зондирования имеют пространственную привязку, то есть они расположены в географическом пространстве. Координаты каждого пикселя однозначно определены, что облегчает поступление информации о пикселях из векторных слоев ГИС.

Сегментация изображений является первым шагом в распознавании многозональных космических снимков и включает в себя разделение изображения на относительно однородные области, т. е. «сегменты изображения» или «объекты изображения». Семантическая сегментация происходит, когда каждый пиксель в изображении классифицируется как принадлежащий какому-то сегменту. В ГИС это часто называют классификацией пикселей или сегментацией изображений и используют для создания карт, например, землепользования. Сегментация экземпляра – это более точный метод обнаружения объектов, в котором рисуется граница каждого экземпляра объекта. Общая сегментация сочетает в себе как семантическую сегментацию, так и сегментацию экземпляров. Эти сегменты изображения служат базовой единицей для дальнейшего анализа, например, классификации изображений или обнаружения изменений, с использованием спектральных/пространственных/контекстных атрибутов сегментов [Johnson, Ma, 2020].

При использовании алгоритма *OBIS* группировка пикселей в сегменты происходила посредством итеративного процесса. Значение ширины полосы пропускания для генерации сегментов выбиралась экспертным способом в соответствии с размером исследуемой области и пространственным разрешением космического снимка. В нашем случае ширина полосы пропускания, или размер, необходимый для генерации исходной точки в процессе сегментации объектов, определяет масштаб области, в которой осуществляется анализ и выделение сегмента. Это происходит на основе спектральных или иных характеристик, и этот размер установлен равным 10 . В результате сегментации на основе анализа отражательной способности объектов многозонального космического изображения территории ФХ размером 1632×1188 пикселей было сформировано 3938 сегментов (рис. 1).

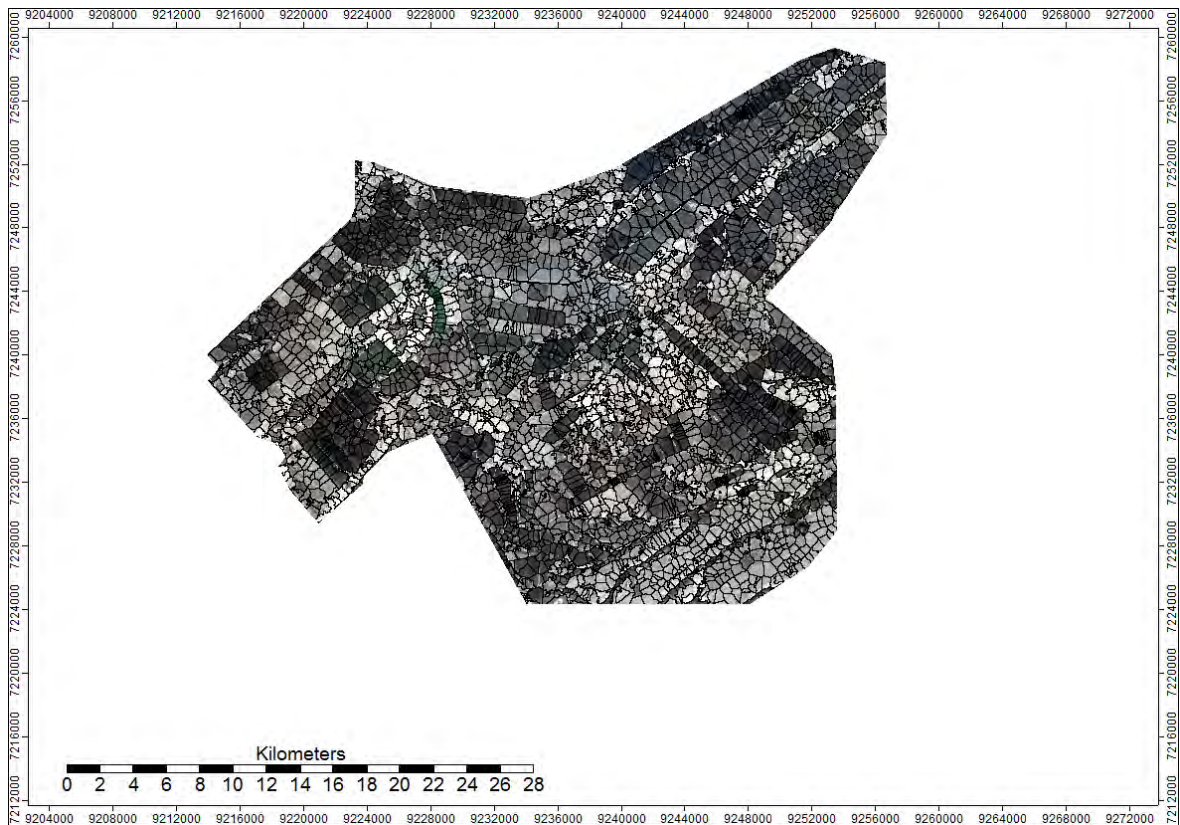


Рис. 1. Сегментация территории ФХ
Fig. 1. Segmentation of the farm territory

Объектно-ориентированный подход извлечения классов объектов является рабочим процессом, поддерживаемым инструментами, охватывающими три основные функциональные области: сегментацию изображения, получение аналитической информации о сегментах и классификацию. Выходные данные одного инструмента являются входными данными для последующих инструментов, где цель заключается в создании значимой объектно-ориентированной карты классов объектов. Объектно-ориентированный процесс похож на традиционный процесс классификации пиксельного изображения, использующий методы контролируемой и неконтролируемой классификации. Вместо того, чтобы классифицировать пиксели, процесс классифицирует сегменты.

Для классификации изображений дистанционного зондирования в ходе исследования применили три метода машинного обучения. Для каждого метода проведен подбор оптимальных параметров с использованием методов кросс-валидации и поиска по сетке параметров, что позволило максимизировать производительность моделей.

При построении модели *RF* было проанализировано использование различного количества деревьев с оценкой ошибки *out-of-bag* (*OOB*) для каждой конфигурации (рис. 2а) и максимальной глубины дерева с оценкой точности (рис. 2б). *OOB* ошибка рассчитывается на основе наблюдений, не вошедших в обучающую выборку конкретного дерева, что позволяет получить несмещенную оценку ошибки обобщения модели. Оптимальное количество деревьев было установлено равным 32, что обеспечило баланс между точностью модели и вычислительной эффективностью. Анализ влияния максимальной глубины дерева показал, что наибольшая точность модели (0,85) достигается при глубине 6, после чего наблюдается постепенное снижение точности.

Для оптимизации алгоритма *XGBoost* осуществляли подбор гиперпараметров, используя метод перекрестной проверки и сетку параметров (рис. 3). Были протестированы различные

комбинации скорости обучения (0,01, 0,1, 0,3), максимальной глубины дерева (3, 6, 9), минимального веса листа (1, 3, 5) и количества итераций (5, 15, 50, 100, 200, 300).

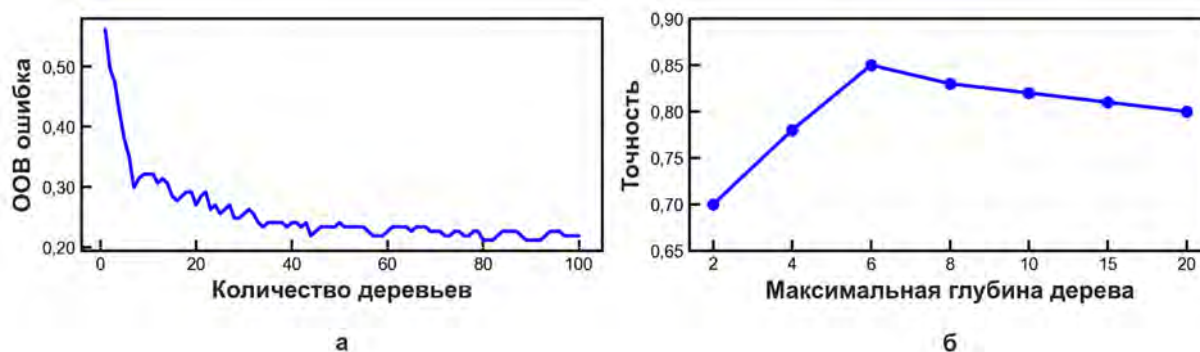


Рис. 2. Результаты подбора параметров модели RF: а) график зависимости *OOB* ошибки от количества деревьев; б) график зависимости точности модели от максимальной глубины дерева
 Fig. 2. Results of RF model parameter tuning: а) plot of the *OOB* error versus number of trees; б) plot of the model accuracy versus maximum tree depth

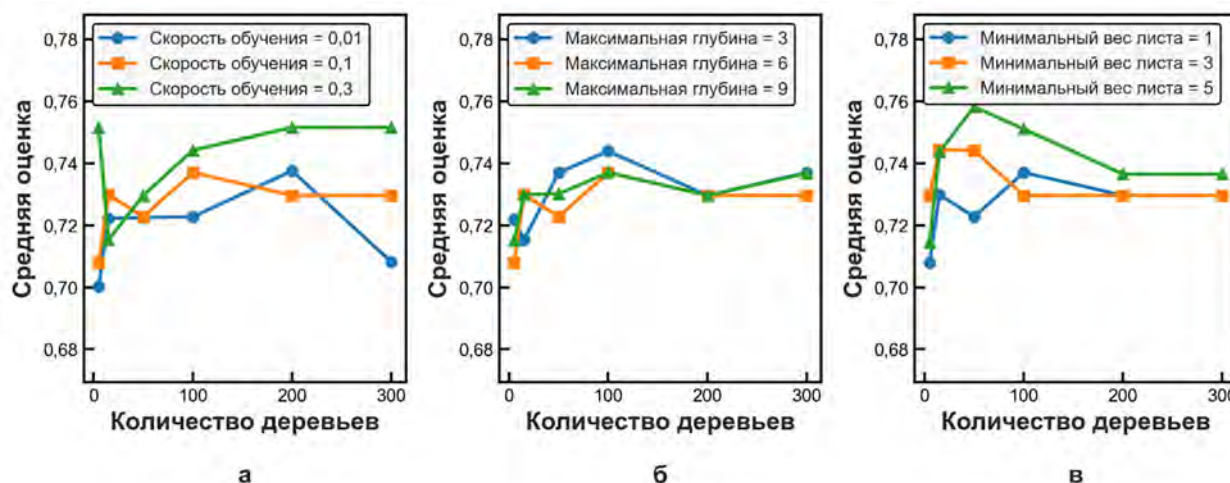


Рис. 3. Результаты подбора гиперпараметров для *XGBoost*: а) влияние скорости обучения; б) влияние максимальной глубины дерева; в) влияние минимального веса листа
 Fig. 3. Results of hyperparameter tuning for *XGBoost*: а) learning rate effect; б) maximum depth effect; в) minimum child weight effect

При анализе влияния скорости обучения (рис. 3а) наблюдалось, что при скорости 0,01 модель демонстрировала постепенное улучшение производительности с увеличением количества деревьев. Средняя оценка возрастала с 0,70 при 5 деревьях до 0,74 при 300 деревьях. При скорости обучения 0,1 наблюдалось более быстрое улучшение производительности на начальных этапах, с достижением оценки 0,73 уже при 50 деревьях и последующей стабилизацией результатов. Скорость обучения 0,3 показала наиболее высокую начальную производительность (0,75) при малом количестве деревьев, с последующими колебаниями в диапазоне 0,73–0,76.

Исследование влияния максимальной глубины дерева (рис. 3б) показало, что при глубине 3 модель демонстрировала стабильную производительность с постепенным улучшением до 0,75. Увеличение глубины до 6 и 9 не приводило к значительному улучшению результатов, но могло вызывать большую вариативность оценок.

Анализ влияния минимального веса листа (рис. 3в) выявил, что значение 1 обеспечивало наиболее стабильные результаты, тогда как увеличение до 3 и

5 приводило к более выраженным колебаниям производительности модели, хотя и позволяло достигать несколько более высоких максимальных значений (до 0,76).

Отметим, что даже при небольшом количестве деревьев (5–15) модель достигала достаточно высокой производительности, особенно при более высоких скоростях обучения. Оптимальные результаты (точность модели составила 0,85) были получены при использовании 50–100 деревьев, скорости обучения 0,3, максимальной глубине 6 и минимальном весе листа 1, что обеспечивало баланс между точностью модели и вычислительной эффективностью.

С целью оптимизации работы *MLP* были проведены эксперименты с различными архитектурами с помощью варьирования количеством скрытых слоев и числом нейронов в них. В качестве функции активации использовали *ReLU* (*Rectified Linear Unit*), которая помогает преодолеть проблему затухающих градиентов и ускоряет сходимость. Для оптимизации параметров модели применяли алгоритм *Adam*, сочетающий преимущества адаптивного градиентного спуска и метода моментов. Для предотвращения переобучения были использованы методы регуляризации, включая *L2*-регуляризацию, ограничивающую веса нейронов, и *dropout*, случайно отключающий часть нейронов во время обучения. Эти техники повышают обобщающую способность модели и помогают избежать чрезмерной подгонки под обучающие данные.

Результаты сравнения производительности различных конфигураций *MLP* представлены на рис. 4, где показаны значения среднеквадратичной ошибки (*MSE*) и точности для каждой архитектуры.

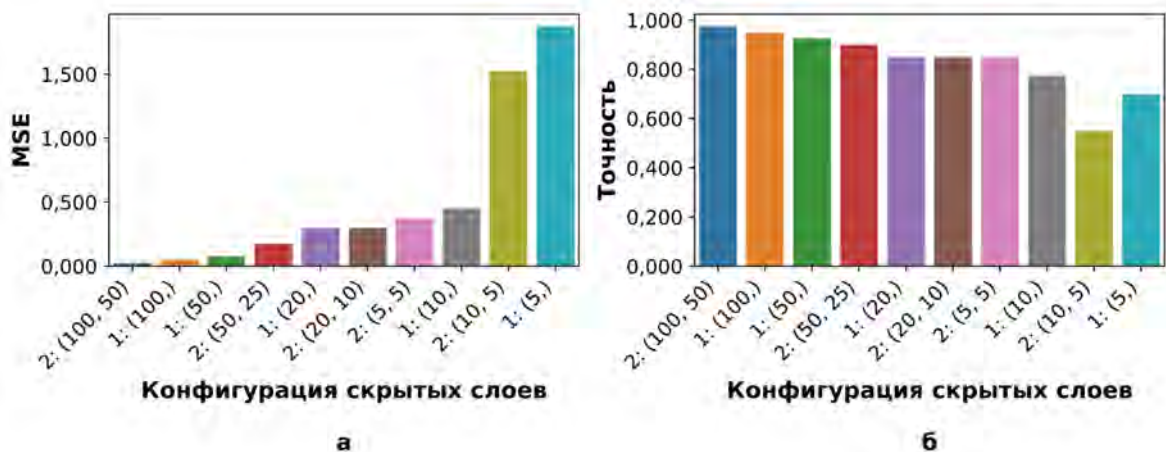


Рис. 4. Сравнение производительности различных конфигураций многослойного персептрона MLP: а) оценка по средней абсолютной ошибке; б) оценка по точности
Fig. 4. Performance comparison of various configurations of the multilayer perceptron (MLP): а) evaluation by mean absolute error; б) evaluation by accuracy

Наилучшую производительность показала модель с двумя скрытыми слоями, содержащими 100 и 50 нейронов соответственно. Эта архитектура достигла наименьшего значения *MSE* (0,025) и наивысшей точности (0,952). Это говорит о том, что для данной задачи относительно сложная архитектура с достаточным количеством нейронов оказалась наиболее эффективной. Отметим, что модели с одним скрытым слоем также показали высокую производительность. Конфигурации со 100 и 50 нейронами в одном слое достигли точности 0,95 и 0,925 соответственно, что лишь немного уступало лучшей двухслойной модели. Увеличение или уменьшение числа нейронов не всегда приводило к улучшению результатов. Например, модели с меньшим количеством нейронов (5 и 10) в одном слое показали значительно худшую производительность (*MSE*: 1,875 и 0,45, точность: 0,7 и 0,775 соответственно) по сравнению с оптимальными моделями. Это подчеркивает важ-

ность выбора достаточного количества нейронов для решения данной задачи. Архитектуры с двумя скрытыми слоями показали смешанные результаты. Некоторые из них (например, «2 слоя: (50 и 25 нейронов)») достигли хороших показателей, сравнимые с лучшими однослойными моделями. Однако конфигурации с меньшим количеством нейронов, такие как «(5, 5)» и «(10, 5)», показали относительно низкую производительность, что еще раз подчеркивает важность правильного выбора архитектуры и количества нейронов.

В целом результаты моделирования показали, что для данной задачи эффективны как однослойные, так и двухслойные архитектуры с достаточным количеством нейронов (50–100). При этом наилучший результат достигался при использовании двухслойной архитектуры с большим количеством нейронов.

После обучения всех трех моделей был проведен сравнительный анализ их эффективности. Для этого были использованы матрица путаницы и коэффициент Каппа Коэна. Результаты представлены в таблице и на рис. 5.

Сравнение моделей по коэффициенту Каппа Коэна
 Comparison of models by Cohen's Kappa coefficient

Метод	Нижнее значение к	Среднее значение к	Верхнее значение к
RF	0,66	0,79	0,86
XGBoost	0,72	0,78	0,85
MLP	0,76	0,89	0,94



Рис. 5. Матрицы путаницы: а) модель *XGBoost*; б) модель *RF*; в) модель *MLP*
 Fig. 5. Confusion matrices: а) *XGBoost* model; б) *RF* model; в) *MLP* model

Модель *MLP* показала наилучшие результаты среди всех рассмотренных моделей, достигнув точности 0,952 % и самого высокого среднего значения коэффициента Каппа Коэна. Этот результат указывает на способность нейронных сетей эффективно улавливать сложные нелинейные взаимосвязи в данных. Модель *MLP* также продемонстрировала наиболее стабильную производительность, о чем свидетельствует широкий диапазон верхнего значения коэффициента Каппа (0,94).

Модели *XGBoost* и *RF* показали одинаковую точность, равную 85,0 %, что ниже, чем у *MLP*. Средние значения коэффициента Каппа у этих алгоритмов также близки. Это говорит о том, что оба метода демонстрируют схожую способность учитывать случайное согласие между предсказаниями и фактическими значениями.

Несмотря на более низкие показатели по сравнению с *MLP*, модели *XGBoost* и *RF* также могут быть классифицированы как надежные и эффективные методы. Учитывая более высокую интерпретируемость этих алгоритмов по сравнению с «черным ящиком» нейронных сетей, они могут быть предпочтительным выбором в ситуациях, где важно понимание процесса принятия решений моделью. Модель *RF*, имея несколько более широкий диапазон значений коэффициента Каппа (от 0,66 до 0,86), может быть особенно полезна в сценариях, требующих высокой интерпретируемости результата или при работе с ограниченными объемами данных.

Стоит отметить, что все три модели продемонстрировали достаточно высокие показатели эффективности, что свидетельствует об их применимости к данной задаче классификации. Однако модель *MLP* явно выделялась более высокой точностью и стабильностью, что делает ее наиболее предпочтительным выбором для данной задачи, особенно когда приоритетом является максимальная точность классификации.

Анализ матрицы путаницы показал, что все три модели (*RF*, *XGBoost* и *MLP*) имеют схожую структуру ошибок, но с некоторыми существенными различиями в производительности для разных классов. Модель *MLP* продемонстрировала наилучшую производительность, безошибочно классифицировав все 18 образцов первого класса, а также все образцы третьего (9), четвертого (2) и пятого (4) классов. Единственные ошибки модель *MLP* допустила во втором классе, правильно классифицировав 4 из 7 образцов. Модели *RF* и *XGBoost* показали идентичные результаты, что может указывать на схожесть их подходов к решению данной задачи. Обе эти модели правильно классифицировали 16 из 18 образцов первого класса, 4 из 7 образцов второго класса, 8 из 9 образцов третьего класса, и безошибочно определили все образцы четвертого (2) и пятого (4) классов.

Анализ *ROC*-кривых и соответствующих метрик (рис. 6) предоставляет дополнительное подтверждение превосходства модели *MLP*. Нейронная сеть продемонстрировала наивысшие показатели как по метрике *AUC* (площадь под *ROC*-кривой), так и по *F1*-метрике. Микроусредненный *AUC* для *MLP* составил 0,97, что превышает показатели *Random Forest* (0,95) и *XGBoost* (0,90). Аналогичное улучшение наблюдается и в значениях *F1*-метрики, где *MLP* достигла микроусредненного показателя 0,85, в то время как *Random Forest* и *XGBoost* показали 0,76 и 0,75 соответственно.

Анализ метрик по отдельным классам показывает, что все модели достигли максимальной эффективности ($AUC = 1,00$) для пятого класса. Однако для других классов наблюдаются существенные различия. *MLP* демонстрирует более стабильные и высокие показатели по всем классам, с особенно заметным преимуществом в классификации первого класса ($AUC = 0,99$) и второго класса ($AUC = 0,87$). Модели *Random Forest* и *XGBoost* показали более низкие результаты для второго класса ($AUC = 0,81$ и $0,73$ соответственно), что согласуется с результатами анализа матриц путаницы.

Эти результаты свидетельствуют о том, что модель *MLP* значительно превосходит другие модели в классификации большинства классов, особенно первого и третьего. Такая разница в производительности может быть обусловлена способностью *MLP* лучше улавливать сложные нелинейные взаимосвязи в данных, что особенно важно для точной классификации. Однако следует отметить, что модели *RF* и *XGBoost*, хотя и уступали *MLP* в общей точности, показывали стабильные результаты среди различных классов.

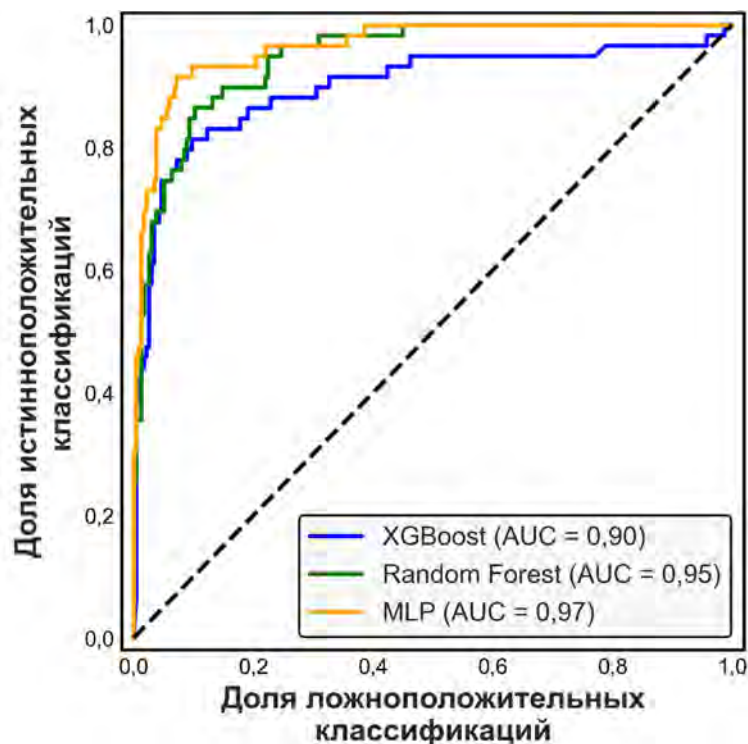


Рис. 6. ROC-кривые для моделей *Random Forest*, *XGBoost* и *MLP*
Fig. 6. ROC curves for *Random Forest*, *XGBoost* and *MLP* models

На основании результатов классификации изображения дистанционного зондирования с помощью модели *MLP* создана карта землепользования ФХ, содержащая пять идентифицированных классов пространственных объектов (рис. 7).

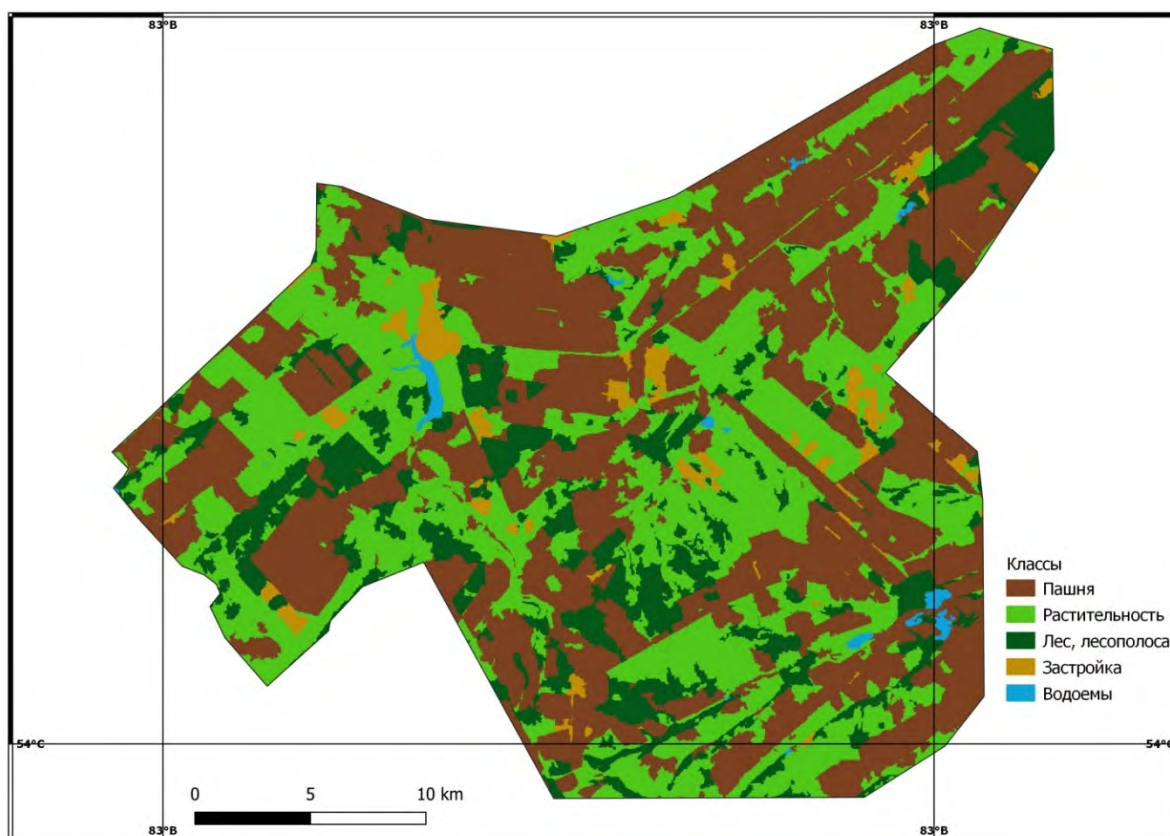


Рис. 7. Карта классов объектов территории землепользования ФХ, полученная с помощью *MLP*
Fig. 7. Land-use class map of the farm territory, obtained using *MLP*

В рамках нашего исследования выбранные классификаторы выступали как эффективные инструменты для отличия пяти ключевых классов, используя данные дистанционного зондирования, полученные за апрель – май. Небольшое количество изображений также играет важную роль в исключении необходимости в больших объемах данных, что позволяет избежать трудностей, связанных с предварительной обработкой и анализом изображений в те моменты, когда требуется принимать решения, поддерживающие программы и внедрение актуальных инструментов управления земельными ресурсами.

Заключение

В ходе проведенного исследования с целью классификации пространственных объектов на изображении дистанционного зондирования конкретного землепользования с помощью объектно-ориентированного алгоритма *OBIS* в *SAGA GIS* проведена сегментация, выявлена аналитическая информация о сегментах и проведена их классификация. Для классификации изображений дистанционного зондирования применяли методы *МО – RF*, *XGBoost*, и *ГО – MLP*.

Для каждой модели проведен подбор оптимальных параметров с использованием методов кросс-валидации и поиска по сетке параметров, что позволило максимизировать их производительность. При построении модели *RF* с помощью оценки ошибки *out-of-bag* (*OOB*) было установлено оптимальное количество деревьев, равное 32, что обеспечило баланс между точностью модели и вычислительной эффективностью. Для модели *XGBoost* наилучшие результаты достигались при большем количестве деревьев (50–300) и средней или высокой скорости обучения (0,1–0,3). Модель *MLP* показала наилучшую производительность с двумя скрытыми слоями, содержащими 100 и 50 нейронов соответственно. Эта архитектура достигла наименьшего значения *MSE* и наивысшей точности.

Модель *MLP* показала наилучшие результаты среди всех рассмотренных моделей, достигнув точности 95,20 % и самого высокого среднего значения коэффициента Каппа Коэна. Модели *RF* и *XGBoost* уступали *MLP* в точности (85,0 %), однако, учитывая более высокую интерпретируемость этих алгоритмов по сравнению с «черным ящиком» нейронных сетей, они могут быть предпочтительным выбором в ситуациях, где важно понимание процесса принятия решений моделью.

Анализ матрицы путаницы показал, что *MLP* значительно превосходила другие модели в классификации большинства классов, особенно первого и третьего. Такая разница в производительности может быть обусловлена способностью *MLP* лучше улавливать сложные нелинейные взаимосвязи в данных.

Все протестированные модели продемонстрировали достаточно высокие показатели эффективности, что свидетельствует об их применимости к данной задаче классификации. Однако модель *MLP* явно выделялась точностью и стабильностью, что делает ее наиболее предпочтительным выбором, особенно когда приоритетом является максимальная точность классификации.

Список литературы

- Асмус В.В., Бучнев А.А., Кровотынцев В.А., Пяткин В.П., Салов Г.И. 2018. Комплекс программного обеспечения *PlanetaMonitoring* в прикладных задачах дистанционного зондирования. *Автометрия*, 54(3): 14–23. <https://doi.org/10.15372/AUT20180302>.
- Гарафутдинова Л.В., Каличкин В.К., Федоров Д.С. 2024. Объектно ориентированная классификация изображений дистанционного зондирования Земли с использованием машинного обучения. *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*, 2: 37–47. <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2024-71-2-37-47>.
- Колесников А.А. 2022. Анализ методов и средств искусственного интеллекта для анализа и интерпретации данных активного дистанционного зондирования. *Вестник СГУГиТ*



- (Сибирского государственного университета геосистем и технологий), 27(3): 74–94. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-3-74-94>.
- Фомина Е.С. 2023. Оценка эффективности применения специализированных нейронных сетей для повышения разрешения изображений, получаемых при дистанционном зондировании Земли. Системы управления, связи и безопасности, 3: 71–90. <https://doi.org/10.24412/2410-9916-2023-3-71-90>.
- Якушев В.П., Захарян Ю.Г., Блохина С.Ю. 2022. Состояние и перспективы использования дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 19(1): 287–294. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-287-294>.
- Alom M.Z., Taha T.M., Yakopcic Ch., Westberg S., Sidike P., Nasrin M.S., Hasan M., Van Essen B.C., Awwal A.A.S., Asari V.K. 2019. A State-of-the-Art Survey on Deep Learning Theory and Architectures. Electronics, 8(3): 292. <https://doi.org/10.3390/electronics8030292>.
- Adugna T., Xu W., Fan J. 2022. Comparison of Random Forest and Support Vector Machine Classifiers for Regional Land Cover Mapping Using Coarse Resolution FY-3C Images. Remote Sensing, 14(3): 574. <https://doi.org/10.3390/rs14030574>.
- Basheer S., Wang X., Farooque A.A., Nawaz R.A., Liu K., Adekanmbi T., Liu S. 2022. Comparison of Land Use Land Cover Classifiers Using Different Satellite Imagery and Machine Learning Techniques. Remote Sensing, 14(19): 4978. <https://doi.org/10.3390/rs14194978>.
- Breiman L. 2001. Random Forests. Machine Learning, 45: 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- Carabantes M. 2020. Black-Box Artificial Intelligence: an Epistemological and Critical Analysis. AI & Society, 35: 309–317. <https://doi.org/10.1007/s00146-019-00888-w>.
- Chen T., Guestrin C. 2016. Xgboost: A Scalable Tree Boosting System. Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining, 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>.
- Chen G., Weng Q., Hay G.J., He Y. 2018. Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA): Emerging Trends and Future Opportunities. GIScience & Remote Sensing, 55(2): 159–182. <https://doi.org/10.1080/15481603.2018.1426092>.
- Choi Y. 2023. GeoAI: Integration of Artificial Intelligence, Machine Learning, and Deep Learning with GIS. Applied Sciences, 13(6): 3895. <https://doi.org/10.3390/app13063895>.
- Ekeanyanwu C.V., Obisakin I.F., Aduwenye P., Dede-Bamfo N. 2022. Merging GIS and Machine Learning Techniques: A Paper Review. Journal of Geoscience and Environment Protection, 10(9): 61–83. <https://doi.org/10.4236/gep.2022.109004>.
- Ezzahouani B., Teodoro A., Kharki O.El., Jianhua L., Kotaridis I., Yuan X., Ma L. 2023. Remote Sensing Imagery Segmentation in Object-Based Analysis: A Review of Methods, Optimization, and Quality Evaluation Over the Past 20 years. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 32: 101031. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101031>.
- Hossain M.D., Chen D. 2019. Segmentation for Object-Based Image Analysis (OBIA): A Review of Algorithms and Challenges from Remote Sensing Perspective. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 150: 115–134 p. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.02.009>.
- Janga B., Asamani G.P., Sun Z., Cristea N. 2023. A Review of Practical AI for Remote Sensing in Earth Sciences. Remote Sensing, 15(16): 4112. <https://doi.org/10.3390/rs15164112>.
- Johnson B.A., Ma L. 2020. Image Segmentation and Object-Based Image Analysis for Environmental Monitoring: Recent Areas of Interest, Researchers' Views on the Future Priorities. Remote Sensing, 12(11): 1772. <https://doi.org/10.3390/rs12111772>.
- Li W., Hsu C.-Y. 2022. GeoAI for Large-Scale Image Analysis and Machine Vision: Recent Progress of Artificial Intelligence in Geography. ISPRS International Journal of Geo-Information, 11(7): 385. <https://doi.org/10.3390/ijgi11070385>.
- Mehmood M., Shahzad A., Zafar B., Shabbir A., Ali N. 2022. Remote Sensing Image Classification: A Comprehensive Review and Applications. Mathematical Problems in Engineering, 1: 5880959. <https://doi.org/10.1155/2022/5880959>.
- Nalluri M., Pentela M., Eluri N.R. 2020. A Scalable Tree Boosting System: XG Boost. International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology, 7(12): 36–51. <https://doi.org/10.22259/2349-476X.0712005>.

- Radočaj D., Jurišić M. 2022. GIS-Based Cropland Suitability Prediction Using Machine Learning: A Novel Approach to Sustainable Agricultural Production. *Agronomy*, 12(9): 2210. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092210>.
- Sagan V., Coral R., Bhadra S., Alifu H., Al Akkad O., Giri A., Esposito F. 2024. Hyperfidelis: A Software Toolkit to Empower Precision Agriculture with GeoAI. *Remote Sensing*, 16(9): 1584. <https://doi.org/10.3390/rs16091584>.
- Vali A., Comai S., Matteucci M. 2020. Deep Learning for Land Use and Land Cover Classification Based on Hyperspectral and Multispectral Earth Observation Data: A Review. *Remote Sensing*, 12(15): 2495. <https://doi.org/10.3390/rs12152495>
- Zhang Y., Liu J., Shen W. 2022. A Review of Ensemble Learning Algorithms Used in Remote Sensing Applications. *Applied Sciences*, 12(17): 8654. <https://doi.org/10.3390/app12178654>.
- Zapf A., Castell S., Morawietz L., Karch A. 2016. Measuring Inter-Rater Reliability for Nominal Data – which Coefficients and Confidence Intervals are Appropriate? *BMC Medical Research Methodology*, 16: 1–10. <https://doi.org/10.1186/s12874-016-0200-9>.

References

- Asmus V.V., Buchnev A.A., Krovotyntsev V.A., Pyatkin V.P., Salov G.I. 2018. Planetamonitoring Software Complex in Applied Remote Sensing Problems. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 54(3): 222–229 (in Russian). <https://doi.org/10.3103/S8756699018030020>
- Garafutdinova L.V., Kalichkin V.K., Fedorov D.S. 2024. Object-Oriented Classification of Remote Sensing Earth Images Using Machine. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*, 2: 37–47 (in Russian). <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2024-71-2-37-47>.
- Kolesnikov A.A. 2022. Analysis of Methods and Tools of Artificial Intelligence for Analysis and Interpretation of Active Remote Sensing Data. *Bulletin of SSUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 27(3): 74–94 (in Russian). <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-3-74-94>.
- Fomina E.S. 2023. Evaluation of the Efficiency of Using Specialized Neural Networks to Increase the Resolution of Images Obtained by Remote Sensing of the Earth. *Control, Communications and Security Systems*, 3: 71–90 (in Russian). <https://doi.org/10.24412/2410-9916-2023-3-71-90>.
- Yakushev V.P., Zakharyan Yu.G., Blokhina S.Yu. 2022. Current Problems and Prospects for the Use of Remote Sensing of the Earth in Agriculture. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 19(1): 287–294 (in Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-287-294>.
- Alom M.Z., Taha T.M., Yakopcic Ch., Westberg S., Sidike P., Nasrin M.S., Hasan M., Van Essen B.C., Awwal A.A.S., Asari V.K. 2019. A State-of-the-Art Survey on Deep Learning Theory and Architectures. *Electronics*, 8(3): 292. <https://doi.org/10.3390/electronics8030292>.
- Adugna T., Xu W., Fan J. 2022. Comparison of Random Forest and Support Vector Machine Classifiers for Regional Land Cover Mapping Using Coarse Resolution FY-3C Images. *Remote Sensing*, 14(3): 574. <https://doi.org/10.3390/rs14030574>.
- Basheer S., Wang X., Farooque A.A., Nawaz R.A., Liu K., Adekanmbi T., Liu S. 2022. Comparison of Land Use Land Cover Classifiers Using Different Satellite Imagery and Machine Learning Techniques. *Remote Sensing*, 14(19): 4978. <https://doi.org/10.3390/rs14194978>.
- Breiman L. 2001. Random Forests. *Machine Learning*, 45: 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- Carabantes M. 2020. Black-Box Artificial Intelligence: an Epistemological and Critical Analysis. *AI & Society*, 35: 309–317. <https://doi.org/10.1007/s00146-019-00888-w>.
- Chen T., Guestrin C. 2016. Xgboost: A Scalable Tree Boosting System. *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining*, 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>.
- Chen G., Weng Q., Hay G.J., He Y. 2018. Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA): Emerging Trends and Future Opportunities. *GIScience & Remote Sensing*, 55(2): 159–182. <https://doi.org/10.1080/15481603.2018.1426092>.
- Choi Y. 2023. GeoAI: Integration of Artificial Intelligence, Machine Learning, and Deep Learning with GIS. *Applied Sciences*, 13(6): 3895. <https://doi.org/10.3390/app13063895>.



- Ekeanyanwu C.V., Obisakin I.F., Aduwenye P., Dede-Bamfo N. 2022. Merging GIS and Machine Learning Techniques: A Paper Review. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 10(9): 61–83. <https://doi.org/10.4236/gep.2022.109004>.
- Ezzahouani B., Teodoro A., Kharki O.El., Jianhua L., Kotaridis I., Yuan X., Ma L. 2023. Remote Sensing Imagery Segmentation in Object-Based Analysis: A Review of Methods, Optimization, and Quality Evaluation Over the Past 20 years. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 32: 101031. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101031>.
- Hossain M.D., Chen D. 2019. Segmentation for Object-Based Image Analysis (OBIA): A Review of Algorithms and Challenges from Remote Sensing Perspective. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 150: 115–134 p. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.02.009>.
- Janga B., Asamani G.P., Sun Z., Cristea N. 2023. A Review of Practical AI for Remote Sensing in Earth Sciences. *Remote Sensing*, 15(16): 4112. <https://doi.org/10.3390/rs15164112>.
- Johnson B.A., Ma L. 2020. Image Segmentation and Object-Based Image Analysis for Environmental Monitoring: Recent Areas of Interest, Researchers' Views on the Future Priorities. *Remote Sensing*, 12(11): 1772. <https://doi.org/10.3390/rs12111772>.
- Li W., Hsu C.-Y. 2022. GeoAI for Large-Scale Image Analysis and Machine Vision: Recent Progress of Artificial Intelligence in Geography. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(7): 385. <https://doi.org/10.3390/ijgi11070385>.
- Mehmood M., Shahzad A., Zafar B., Shabbir A., Ali N. 2022. Remote Sensing Image Classification: A Comprehensive Review and Applications. *Mathematical Problems in Engineering*, 1: 5880959. <https://doi.org/10.1155/2022/5880959>.
- Nalluri M., Pentela M., Eluri N.R. 2020. A Scalable Tree Boosting System: XG Boost. *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*, 7(12): 36–51. <https://doi.org/10.22259/2349-476X.0712005>.
- Radočaj D., Jurišić M. 2022. GIS-Based Cropland Suitability Prediction Using Machine Learning: A Novel Approach to Sustainable Agricultural Production. *Agronomy*, 12(9): 2210. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092210>.
- Sagan V., Coral R., Bhadra S., Alifu H., Al Akkad O., Giri A., Esposito F. 2024. Hyperfidelis: A Software Toolkit to Empower Precision Agriculture with GeoAI. *Remote Sensing*, 16(9): 1584. <https://doi.org/10.3390/rs16091584>.
- Vali A., Comai S., Matteucci M. 2020. Deep Learning for Land Use and Land Cover Classification Based on Hyperspectral and Multispectral Earth Observation Data: A Review. *Remote Sensing*, 12(15): 2495. <https://doi.org/10.3390/rs12152495>.
- Zhang Y., Liu J., Shen W. 2022. A Review of Ensemble Learning Algorithms Used in Remote Sensing Applications. *Applied Sciences*, 12(17): 8654. <https://doi.org/10.3390/app12178654>.
- Zapf A., Castell S., Morawietz L., Karch A. 2016. Measuring Inter-Rater Reliability for Nominal Data – which Coefficients and Confidence Intervals are Appropriate? *BMC Medical Research Methodology*, 16: 1–10. <https://doi.org/10.1186/s12874-016-0200-9>.

Поступила в редакцию 18.09.2024;

поступила после рецензирования 29.10.2024;

принята к публикации 20.11.2024

Received September 18, 2024;

Revised October 29, 2024;

Accepted November 20, 2024

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

Каличкин Владимир Климентьевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, руководитель направления Земледелие, Новосибирская область, р.п. Краснообск, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir K. Kalichkin, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Scientific Officer, Siberian Federal Scientific Centre of AgroBioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Head of the Agriculture department, Novosibirsk region, Krasnoobsk working settlement, Russia



Гарафутдинова Людмила Вячеславовна, аспирант, младший научный сотрудник, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, лаборатория агроклиматических исследований, Новосибирская область, р.п. Краснообск, Россия

Федоров Дмитрий Сергеевич, младший научный сотрудник, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, лаборатория агроклиматических исследований, Новосибирская область, р.п. Краснообск, Россия

Lyudmila V. Garafutdinova, Graduate Student, Junior Researcher, Siberian Federal Scientific Centre of AgroBioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Agroclimatic Research, Novosibirsk region, Krasnoobsk working settlement, Russia

Dmitry S. Fedorov, Junior Researcher, Siberian Federal Scientific Centre of AgroBioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Agroclimatic Research, Novosibirsk region, Krasnoobsk working settlement, Russia



УДК 622:528.7

DOI 10.52575/2712-7443-2024-48-4-542-564

LULC Dynamics and Carbon Sequestration in Major Iron Ore Regions of Russia and China

Lihua Huang

Belgorod State National Research University,
85 Pobedy St, Belgorod 308015, Russia
E-mail: lhhuang0@163.com

Abstract. This study examines the dynamics of land use/land cover (LULC) and carbon sequestration in Lebedinsky and Stoylensky mining and processing plants (LGOK and SGOK) located in iron ore regions of Russia and the Anshan-Benxi iron ore region of China from 1985 to 2020. Through spatial analysis and estimation of carbon sequestration by vegetation and its deposition by soils, the impact of mining activities, urban expansion, and ecological restoration efforts on regional land use patterns and carbon sequestration capacities were assessed. The results reveal significant LULC transformations in both regions, primarily driven by mining development and urbanization. In Russia, cropland area decreased by approximately 8 % (640.78 km²), largely replaced by construction land and forest, with forest cover rising from 12.69 % to 16.69 %, indicating effective ecological management. Conversely, in China, stronger development pressures led to a decrease in forest cover from 40.44 % to 36.73 % and an increase in construction land from 5.62 % to 12.51 %. Carbon sequestration analysis revealed contrasting trends: while the total carbon sequestration in the Russian mining regions remained stable, with a slight increase of 3.69 megatons (Mt), the total carbon sequestration in the Chinese mining regions declined significantly by 31.41 Mt, primarily due to reductions in forest and grassland carbon sequestration. These findings underscore the need for sustainable development that balances economic growth and ecological stability in mining regions. Implementing effective strategies such as afforestation, wetland restoration, and adaptive land-use policies is essential to mitigate the environmental impacts of mining and to sustain carbon sequestration. Future policies should prioritize harmonizing industrial growth with environmental conservation to promote sustainable land use in heavily industrialized areas.

Keywords: Land use/land cover (LULC) dynamics; Carbon sequestration; Iron ore mining regions; Sustainable land management

For citation: Huang L. 2024. LULC Dynamics and Carbon Sequestration in Major Iron Ore Regions of Russia and China. *Regional geosystems*, 48(4): 542–564. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-542-564

Динамика LULC и поглощения углерода в основных регионах железорудных месторождений России и Китая

Хуан Л.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет
Россия, 308015, Белгород, ул. Победы 85
E-mail: lhhuang0@163.com

Аннотация. В исследовании анализируется динамика землепользования / наземного покрова (LULC) и поглощения углерода в районах добычи железной руды Лебединского и Стойленского горно-обогатительных комбинатов в России и областях железорудного производства Аньшань и Бэньси в Китае с 1985 по 2020 год. С помощью пространственного анализа и оценки секвестрации углерода растительностью и депонирование его почвами определено влияние горной промышленности, урбанизации и усилий по экологическому восстановлению на характер землепользования и способность к поглощению углерода. Результаты показывают значительные изменения в использовании земли в обеих областях, в основном обусловленные увеличением добычи полезных

ископаемых и ростом городов. В России площадь сельскохозяйственных угодий уменьшилась примерно на 8 % (640,78 км²), что связано с застройкой территории и расширением лесных площадей. При этом увеличение лесного покрова с 12,69 % до 16,69 % указывает на эффективное экологическое управление. Промышленное развитие в горнорудном районе Китая, напротив, привело к уменьшению лесного покрова с 40,44 % до 36,73 % и увеличению площади застроенных территорий с 5,62 % до 12,51 %. Анализ углеродных депозитов показал противоположные тенденции: в то время как общая способность к поглощению углерода в российских районах добычи железной руды осталась стабильной, с небольшим увеличением на 3,69 Мт, в китайских железорудных районах эта величина значительно уменьшилась (на 31,41 Мт), в основном из-за снижения углеродопоглощения лесами и травянистыми угодьями. Эти результаты подчеркивают необходимость устойчивого развития, которое создает баланс между экономическим ростом и экологической стабильностью в горнорудных районах. Реализация эффективных стратегий, таких как озеленение, восстановление болот и адаптивные политики землепользования, является критически важной для снижения экологических последствий добычи полезных ископаемых и сокращения выбросов диоксида углерода.

Ключевые слова: динамика землепользования / наземного покрова (LULC), поглощение углерода, регионы добычи железной руды, устойчивое землепользование

Для цитирования: Huang L. 2024. LULC Dynamics and Carbon Sequestration in Major Iron Ore Regions of Russia and China. *Regional geosystems*, 48(4): 542–564. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-542-564

Introduction

Iron ore mining regions are pivotal to the economies of both Russia and China, particularly due to their contributions to global iron ore supply and the associated environmental impacts. Russia, holding over 58.3 billion tons of iron ore reserves in categories A+B+C1, ranks among the world's top reserve holders, alongside Brazil and Australia [Shvidenko, Nilsson, 2003; Кирсанов, 2023]. China, though fourth in iron ore reserves, is the world's leading steel producer, accounting for over 54 % of global steel output in 2023³. This high production volume, however, relies on lower-grade domestic ores, resulting in increased carbon dioxide emissions – a challenge that underscores the environmental costs of China's steel industry and highlights the need for sustainable practices [Pan et al., 2011; Pang et al., 2023].

Assessing land use and land cover (LULC) changes in iron ore-affected regions of Russia and China is essential for understanding the ecological impacts of mining and promoting sustainable resource management [Wohlfart et al., 2017]. Russia's Kursk Magnetic Anomaly (KMA) iron ore province, with extensive reserves concentrated in Belgorod and Kursk regions, exemplifies long-term landscape transformations due to industrial activity, particularly in mines like the Lebedinsky and Stoylensky complexes [Гзогян С., Гзогян Т., 2018]. Similarly, China's Xianshan iron mine, expected to become the country's largest by 2027, highlights China's strategic efforts to reduce reliance on imported iron ore through domestic exploration and extraction⁴ [Wu et al., 2016]. Despite differences in resource quality and industry structure, these two countries' iron ore industries exhibit significant potential for mutual economic collaboration, such as the proposed resource alliances to stabilize global mineral markets [Seto et al., 2012]. Coordinated management efforts could also help mitigate environmental degradation, which is a growing concern for both countries as mining activities increasingly transform landscapes and disrupt local ecosystems [Grimm et al., 2008].

³ China to boost coal output, reserves to ensure power supply – NDRC. Reuters. March 7, 2022. URL: <https://www.reuters.com/business/energy/china-boost-coal-output-reserves-ensure-power-supply-ndrc-2022-03-05/> (Accessed: 12.09.2024).

⁴ Xi'an Shan Iron Mine: To build a world-class underground iron ore mine and help the "cornerstone plan" of China's iron and steel industry. 2024. Electronic resources. (in Chinese). URL: <https://ln.chinadaily.com.cn/a/202409/30/WS66fa40a5a310b59111d9c368.html> (accessed: 12.09.2024)



Monitoring changes in land composition using Landsat images, visual and automated interpretation methods is widely used at different scales [Shelestov et al., 2017, Alshari, Gawali, 2021, Basheer et al., 2022, Ahialey et al., 2024], but there are still prospects for increasing the detection accuracy using an automated method for processing space images [Pirnazar et al., 2021, Беленко, Ассех, 2022]. Recently, land use / land cover (LULC) classification has been actively supplemented using the accuracy attained from different models [Abbas et al., 2021, Digra et al., 2022, Yifter et al., 2022, Rengma, Yadav, 2024]. The contribution of the computer hierarchical system developed by FAO specialists [Di Gregorio, Jansen, 2006] is highly appreciated for land cover classification, as it is based on the biophysical characteristics of land cover. However, this classification does not assume the allocation of mixed classes of land cover, and when moving to the map legend, such mixed classes can be reflected on the maps [Савин, Березуцкая, 2024].

This study investigates LULC changes and their effects on carbon sequestration within 20 km of major mining areas in Russia and China from 1985 to 2020, leveraging remote sensing (RS) and geographic information system (GIS) technologies [Xu et al., 2024]. Using data from the Chinese Academy of Sciences' Aerospace Information Research Institute's 30-meter-resolution dataset (GLC_FCS30 1985_2020), this analysis classifies land cover into seven types – Cropland, Forest, Grassland, Wetland, Water body, Bareland, and Construction land – using ArcGIS 10.8.1 [Zhang et al., 2021]. Key analytical methods include land use transition matrices, land use dynamic models, and carbon sequestration estimation techniques, which provide a robust framework for evaluating long-term ecological impacts [Zheng et al., 2024].

In summary, this paper aims to advance the understanding of LULC dynamics and their effects on carbon sequestration in major mining regions of Russia and China. By applying detailed RS and GIS methodologies, it not only assesses ecological transformations within the 20 km zones around the mining sites but also provides critical insights that support policy development for ecological restoration and sustainable resource management in these regions.

Materials and methods

Study Area

This study focuses on the LGOK and SGOK mining areas located within the Kursk Magnetic Anomaly (KMA) region in Russia, as well as the Anshan-Benxi iron ore mining areas situated in Liaoning Province, China. The study areas are defined as zones extending 20 km outward from the boundaries of the mining sites.

The LGOK and SGOK mining areas are located in the Kursk Magnetic Anomaly. This region experiences a temperate continental climate, characterized by cold, snowy winters and warm, humid summers. The annual average temperature ranges from 5°C to 7°C, with winter (January) averages of –7°C to –8°C and summer (July) averages around 19°C to 21°C. Average annual precipitation is between 500 and 600 mm, with most rainfall occurring during the summer months. The surrounding terrain is primarily flat plains with occasional rolling hills.

The Anshan-Benxi mining areas are distributed in Liaoning Province, China. The region features a temperate continental monsoon climate with distinct seasons. The annual average temperature ranges from 7°C to 9°C, with winter (January) averages of –10°C to –15°C and summer (July) averages of 24°C to 26°C. Annual precipitation is between 700 and 1000 mm, with over 70 % occurring during the rainy season (June to August). The terrain around the mining areas is mostly represented by hills and low mountains.

Data collection

The LULC data used in this study for the years 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, and 2020 were sourced from the Global 30-meter Fine Ground Cover Dynamic Monitoring Product (GLC_FCS30 1985_2020) [Zhang et al., 2021], provided by the Aerospace Information Research Institute of the Chinese Academy of Sciences. This dataset, covering the period

from 1985 to 2020, offers a spatial resolution of 30m x 30m. Following standardized land use classification systems [Anderson, 1976; Di Gregorio, 2005; Савин, Березуцкая, 2024], the original data were reclassified in ArcGIS 10.8.1 into seven primary land use types: Cropland, Forest, Grassland, Wetland, Water Body, Bareland, and Construction Land (Table 1). This reclassification ensured consistency and comparability with established methodologies for LULC studies [Turner et al., 1995; Foley et al., 2005; Lambin, Geist, 2008].

Table 1
Таблица 1

LULC type definition
Определение видов землепользования/наземного покрова

LULC	Definition
Cropland	paddy fields, irrigated dry land, rain-fed dry land, vegetable plots.
Forest	evergreen broadleaf forest, deciduous broadleaf forest, evergreen needleleaf forest, deciduous needleleaf forest, and mixed forest.
Grassland	grasslands, meadows, savannas, desert steppes, and urban artificial grasslands.
Wetland	inland swamps, lake swamps, river floodplains, forest/shrub wetlands, peat bogs, mangroves, salt marshes, etc., which are located at the junction of land and water.
Water body	water-covered areas such as rivers, lakes, reservoirs, and ponds.
Bareland	land cover types with less than 10% vegetation coverage, such as deserts, sandy areas, gravelly areas, bare rocks, saline-alkaline soils.
Construction land	urban areas, roads, rural cottages, and mines, which are primarily based on asphalt, concrete, sand and stone, bricks, glasses, and other materials.

Land Use Transfer Matrix Analysis

The land use transfer matrix is a widely used analytical tool to quantify and visualize the direction and magnitude of transitions between different land use types over a specific period and spatial scale [Pontius, Malanson, 2005]. This matrix provides a comprehensive view of land use change dynamics, reflecting the flow and interaction of land use types during the study period [Lambin et al., 2003]. In this study, the raster calculator tool in ArcGIS 10.8.1 software is utilized to overlay the land use raster data layers from the beginning (period t1) and the end (period t2) of the study. This process calculates the areas of mutual transitions between different land use types within the study area. The formula is as follows:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix}$$

where A_{ij} is the area transferred from land use type i (at the start of the study) to land use type j (at the end of the study) during the study period, and n is the total number of land use types.

Land Use Dynamics Index

The Land Use Dynamics Index (K) measures the changes a specific land use type within a defined time range on the site under study [Liu et al., 2005; Lambin, Geist, 2008]. A higher K value indicates more significant changes and lower stability, while a lower K value reflects less significant changes and higher stability. The formula is as follows:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\%$$

where U_a and U_b are the areas of a specific land use type at the beginning and end of the study, respectively; T is the the study duration (in years).



Comprehensive land-use dynamics (S) illustrate the overall intensity of land use changes, reflecting transitions among all land use types during the study period [Verburg et al., 2004; Turner et al., 2007]. A higher S value indicates more intense changes. The formula is:

$$S = \left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta U_{i-j}}{U_i} \right) \times \frac{1}{T}$$

where ΔU_{i-j} is the total area converted from land use Type i to Type j during the period T ; U_i is the area of land use Type i at the beginning of the study.

Carbon Sink Estimation

The carbon sink capacity of mining area ecosystems refers to their net carbon absorption, primarily driven by two mechanisms: the absorption of carbon by vegetation and soil, particularly in forests, grasslands, and croplands, through photosynthesis that produces organic matter [Lal, 2004; Ni, 2013] and artificial carbon inputs from land reclamation efforts [Post, Kwon, 2000]. However, this study excludes the latter due to the unavailability of data and its limited relevance.

Based on previous research and vegetation and soil carbon density values for various land use types (see Table 1) [Zhang et al., 2012], the carbon sequestration for the research area is estimated using the formula:

$$P_c = S \times (C_{c \text{ vegetation}} + C_{c \text{ soil}})$$

where P_c is the carbon sequestration of a single land-use type, in t; S is the area of a certain land-use type, in hm^2 ; C_c is the vegetation or soil carbon density of a certain land-use type, in Mg/hm^2 .

Results and discussion

Land use/land cover classification

From 1985 to 2020, the LGOK and SGOK iron ore affected areas in Russia and the Anshan-Benxi iron ore affected areas in China experienced significant spatiotemporal changes in land use/land cover (LULC). These changes reflect both anthropogenic influences, such as mining expansion and urbanization, and natural ecological processes [Liu et al., 2023]. The study shows that land use changes were driven by various factors, including mining activities [Raskazov et al., 2023], infrastructure expansion, and ecological protection policies [Hu et al., 2024], which displayed regional characteristics. The previously obtained results of mapping the structure of the land fund in the zone with a radius of 20 km from LGOK and SGOK [Корнилов и др., 2015] were associated with the result of classification according to seven LULC types [Хуан, Полетаев, 2024], which made it possible to verify the data obtained by different methods.

Tables 1 and 2 summarize the area (km^2) and proportion (%) changes across seven major land use types: cropland, forest, grassland, wetland, water body, bareland, and construction land. Additionally, LULC distribution maps (Fig. 1 and 2) visually illustrate the spatial distribution and dynamic transitions, highlighting the adaptation of land use in different areas.

Table 2
Таблица 2

Carbon intensity of different land use types (Mg/hm^2)
Углеродоемкость различных видов землепользования ($\text{Mg}/\text{гм}^2$)

LULC	Forest	Grassland	Cropland
Vegetation	86	21	5
Soil	189	116	95

In Russia's LGOK and SGOK regions, cropland area declined significantly, decreasing from 53.23 % (4264.68 km²) in 1985 to 45.24 % (3623.90 km²) in 2020, providing an overall reduction of around 8 % (Fig. 3). Forest area notably increased from 12.69 % (1016.40 km²) in 1985 to 16.69 % (1337.35 km²) in 2020, especially in the post-2000 period, indicating a potential shift towards ecological restoration and natural vegetation regeneration. Grassland areas, though showing minor fluctuations, remained relatively stable, increasing from 28.90 % to 30.05 %, with most expansion occurring near mining peripheries. Wetland and water body areas showed minimal but stable recovery; wetlands expanded from 0.06 % (4.45 km²) in 1985 to 0.11 % (8.79 km²) in 2020. Construction land doubled in area, from 3.97 % (317.70 km²) in 1985 to 6.60 % (528.41 km²) by 2020, reflecting infrastructure demands related to mining activities.

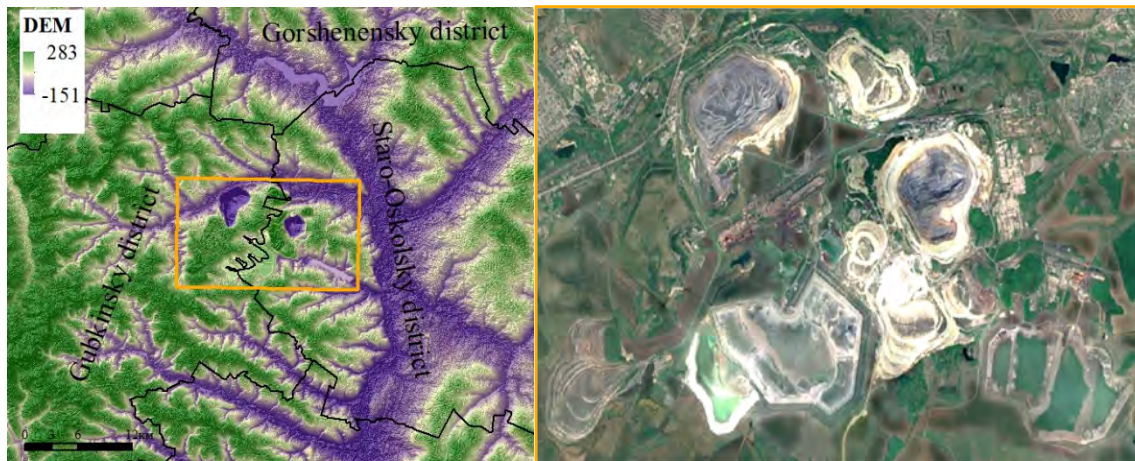


Fig. 1. Geographical location of LGOK and SGOK iron ore mining areas of Russia
Рис. 1. Географическое положение месторождений железной руды ЛГОК и СГОК в России

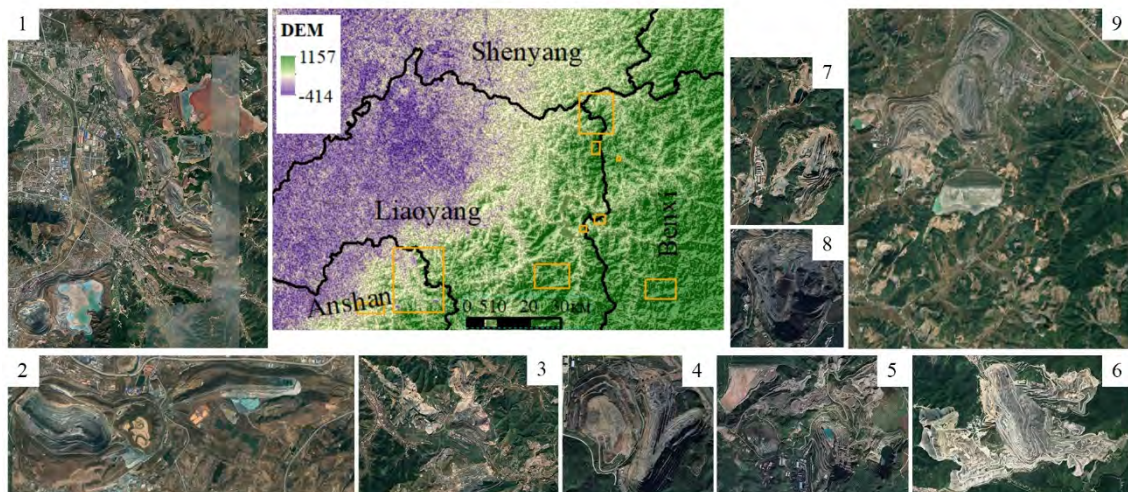


Fig. 2. Geographical location of Anshan-Benxi iron ore mining areas of China
Рис. 2. Географическое положение районов добычи железной руды Аньшань-Бэньси в Китае

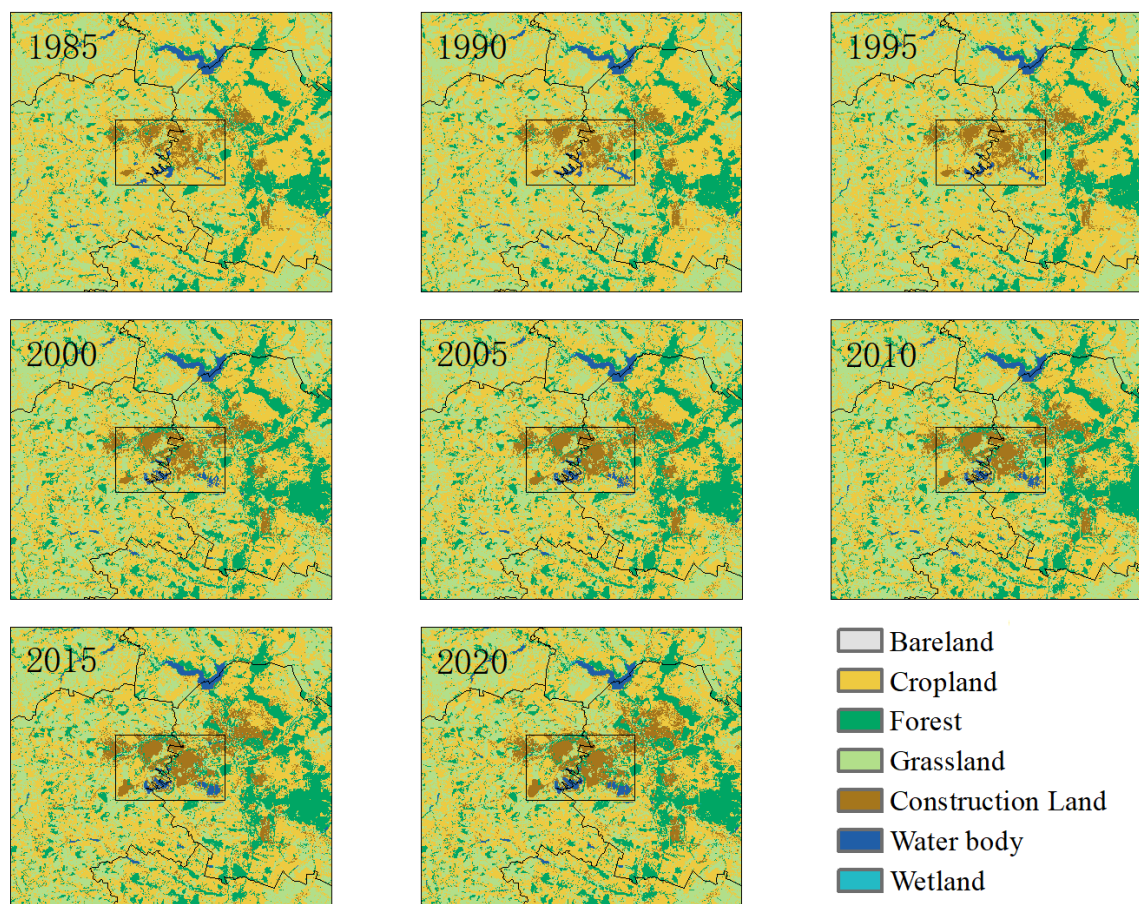


Fig. 3. LULC distribution map of the affected area of LGOK and SGOK Iron Ore Mine
 Рис. 3. Карта распределения землепользования / наземного покрова
 в зоне воздействия железорудного производства (ЛГОК и СГОК)

Spatially, Figure 3 reveals that cropland, initially the dominant land type, was gradually supplanted by grassland and construction land. Forest areas expanded significantly along northern and eastern boundaries, while urban expansion and mining operations intensified within the mining zones. These transformations underscore the complex interaction between ecological recovery (e.g., forest expansion) and industrial development (e.g., construction land growth).

In the Anshan-Benxi region of China, a fluctuating decline in cropland area was observed, peaking at 16.76 % (3306.46 km²) in 1990, then steadily declining to 15.05 % (2968.50 km²) by 2020 (Table 3, 4). Forests, while dominant, showed a declining trend from 40.44 % (7978.63 km²) in 1985 to 36.73 % (7246.15 km²) in 2020. Grassland initially declined from 38.71 % to 35.18 % by 2000, later stabilizing at 34.13 % (6733.02 km²) in 2020. Wetland recovery was consistent, with wetland area expanding from 0.02 % (4.07 km²) in 1985 to 0.54 % (106.21 km²) in 2020. Water body areas remained stable, peaking at 234.40 km² (1.19 %) in 2005, and showing slight decreases. The share of construction land increased more than twofold, from 5.62 % (1108.63 km²) in 1985 to 12.51 % (2468.95 km²) by 2020.

As shown in Figure 4, cropland, initially prominent around the mining periphery, was gradually replaced by grassland and construction land. Forest and grassland coverage fluctuated, primarily in the northern and eastern zones, while urbanization intensified within and around the mining areas. The wetland recovery was evident, and water body areas remained stable.

Table 3
Таблица 3

LULC area (km²) and proportion (%) of LGOK and SGOK iron ore affected areas in Russia, 1985–2020
Площадь (км²) и доля (%) землепользования / наземного покрова зоны воздействия железорудного производства ЛГОК и СГОК в России с 1985 по 2020 год

Time	LULC area	Cropland	Forest	Grassland	Wetland	Water body	Bareland	Construction land
1985	Area	4264.68	1016.40	2314.98	4.45	92.90	0.00	317.70
	Proportion	53.23	12.69	28.90	0.06	1.16	0.00	3.97
1990	Area	4001.06	1022.81	2549.10	3.67	98.50	0.00	335.97
	Proportion	49.94	12.77	31.82	0.05	1.23	0.00	4.19
1995	Area	4005.88	990.86	2561.45	3.60	90.72	0.00	358.60
	Proportion	50.00	12.37	31.97	0.04	1.13	0.00	4.48
2000	Area	3776.91	1362.81	2392.83	7.83	95.90	0.03	374.80
	Proportion	47.15	17.01	29.87	0.10	1.20	0.00	4.68
2005	Area	3722.14	1363.03	2401.56	7.98	98.21	0.03	418.15
	Proportion	46.46	17.01	29.98	0.10	1.23	0.00	5.22
2010	Area	3696.26	1357.14	2401.22	8.13	99.68	0.03	448.65
	Proportion	46.14	16.94	29.97	0.10	1.24	0.00	5.60
2015	Area	3666.47	1335.30	2404.95	8.40	101.88	0.03	494.07
	Proportion	45.77	16.67	30.02	0.10	1.27	0.00	6.17
2020	Area	3623.90	1337.35	2407.55	8.79	105.07	0.03	528.41
	Proportion	45.24	16.69	30.05	0.11	1.31	0.00	6.60

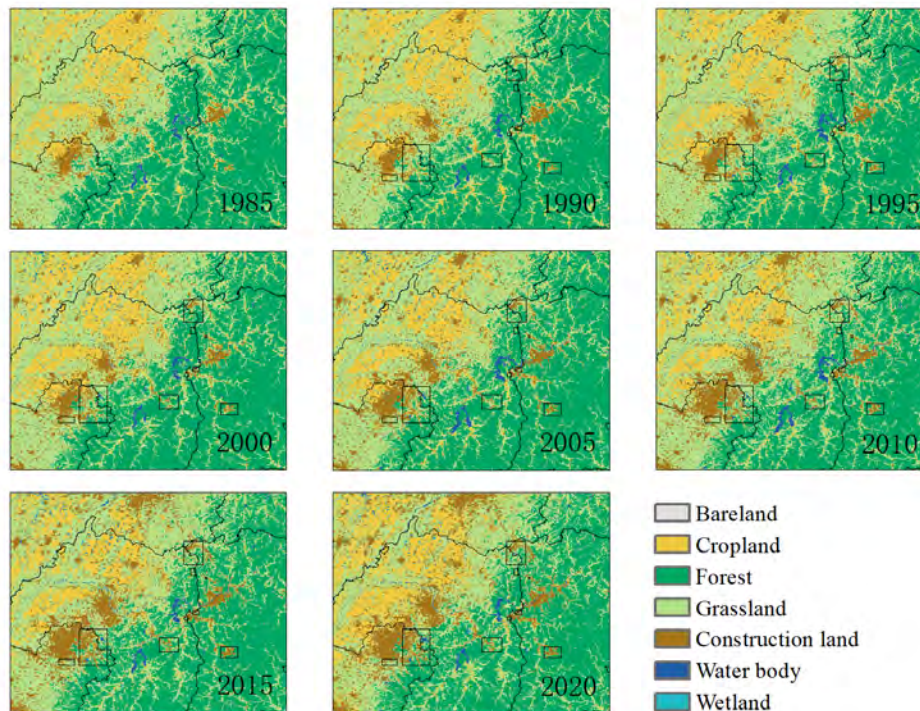


Fig. 4. LULC distribution map of the affected area of Anshan-Benxi Iron Ore Mine
Рис. 4. Карта распределения классов землепользования / наземного покрова в зоне воздействия рудника Аньшань-Бэньси



Table 4
 Таблица 4

LULC area (km²) and proportion (%) of Anshan-Benxi Iron ore affected area, 1985–2020
 Площадь землепользования / наземного покрова (км²) и доля (%)
 от зоны воздействия рудника Аньшань-Бэньси в период с 1985 по 2020 год

Time	LULC area	Cropland	Forest	Grassland	Wetland	Water body	Bareland	Construction land
1985	Area	2855.80	7978.63	7637.40	4.07	145.11	0.36	1108.63
	Proportion	14.47	40.44	38.71	0.02	0.74	0.00	5.62
1990	Area	3306.46	7951.74	7125.62	3.74	157.35	1.46	1183.62
	Proportion	16.76	40.30	36.12	0.02	0.80	0.01	6.00
1995	Area	3072.89	7576.56	7564.49	14.29	207.40	1.80	1429.89
	Proportion	15.57	38.40	38.34	0.07	1.05	0.01	7.25
2000	Area	3153.34	7960.77	6941.95	54.55	188.78	0.73	1429.89
	Proportion	15.98	40.35	35.18	0.28	0.96	0.00	7.25
2005	Area	2706.98	7699.82	7283.61	68.88	234.40	0.37	1735.93
	Proportion	13.72	39.03	36.92	0.35	1.19	0.00	8.80
2010	Area	2390.25	7052.82	7865.91	91.57	233.34	1.29	2094.82
	Proportion	12.11	35.75	39.87	0.46	1.18	0.01	10.62
2015	Area	2253.69	7221.69	7516.94	179.03	213.79	3.79	2340.96
	Proportion	11.42	36.60	38.10	0.91	1.08	0.02	11.86
2020	Area	2968.50	7246.15	6733.02	106.21	204.40	2.76	2468.95
	Proportion	15.05	36.73	34.13	0.54	1.04	0.01	12.51

Overall, LULC changes from 1985 to 2020 in the LGOK and SGOK regions in Russia and the Anshan-Benxi regions in China illustrate the diverse impacts of mining, urbanization, and ecological initiatives. Common patterns across both regions include reductions in cropland, expansions of construction land, and some degree of wetland recovery, highlighting the influence of mining activities on LULC changes [Liu et al., 2023; Rasskazov et al., 2023]. However, regional differences emerge: forest recovery was more pronounced in Russia, potentially due to less intensive urbanization [Kou et al., 2014], while construction land expansion was more dominant in China, likely driven by extensive urban and industrial development [Hu et al., 2024]. Wetland recovery and water body stability were observed in both regions, while bareland remained a minimal fraction.

LULC dynamic analysis

Table 5 presents the changes in the proportion of vegetation cover and bareland + construction land in the affected areas of the LGOK and SGOK iron ore regions in Russia and the Anshan-Benxi iron ore region in China from 1985 to 2020. These changes reflect the varying impacts of mining development, urbanization, and ecological processes on land use in the two regions.

In the LGOK and SGOK regions, vegetation cover decreased gradually, from 94.87 % in 1985 to 92.09 % in 2020. Concurrently, the proportion of bareland + construction land rose from 3.97 % to 6.60 %. This steady decline in vegetation cover suggests the combined influence of mining development and infrastructure expansion, which resulted in the conversion of vegetated areas to construction land. The relatively moderate rate of vegetation loss may also reflect efforts to mitigate ecological impacts, such as natural vegetation regeneration or policy-driven restoration initiatives.

Table 5
 Таблица 5

Proportion (%) of Vegetation and Bareland + Construction land in LGOK and SGOK and Anshan-Benxi iron ore affected areas from 1985 to 2020
 Процентное соотношение (%) растительности и незастроенной территории плюс земли для строительства в зонах воздействия месторождений железной руды ЛГОКа и СГОКа и районе Аншань-Бэньси с 1985 по 2020 год

Time	LGOK and SGOK		Anshan-Benxi	
	Vegetation	Bareland+ Construction land	Vegetation	Bareland+ Construction land
1985	94.87	3.97	93.64	5.62
1990	94.58	4.19	93.20	6.01
1995	94.39	4.48	92.39	7.26
2000	94.12	4.68	91.79	7.25
2005	93.55	5.22	90.01	8.80
2010	93.15	5.60	88.19	10.62
2015	92.56	6.17	87.03	11.88
2020	92.09	6.60	86.44	12.53

In contrast, the Anshan-Benxi region experienced a more pronounced decline in vegetation cover, dropping from 93.64 % in 1985 to 86.44 % in 2020, coupled with a significant increase in bareland + construction land, which rose from 5.62 % to 12.53 %. This sharper decline in vegetation and rapid expansion of construction land likely reflects the more intensive mining activities and urbanization pressures in this region. The Anshan-Benxi region’s proximity to densely populated urban areas and its role as an industrial hub may have amplified the extent of land-use changes, with mining-related developments exerting a stronger impact on the local environment.

The analysis of LULC changes in the LGOK and SGOK mining areas from 1985 to 2020 reveals significant dynamic transitions and conversion patterns among different land use types (Fig. 5 and 6, Tables 6 and 7).

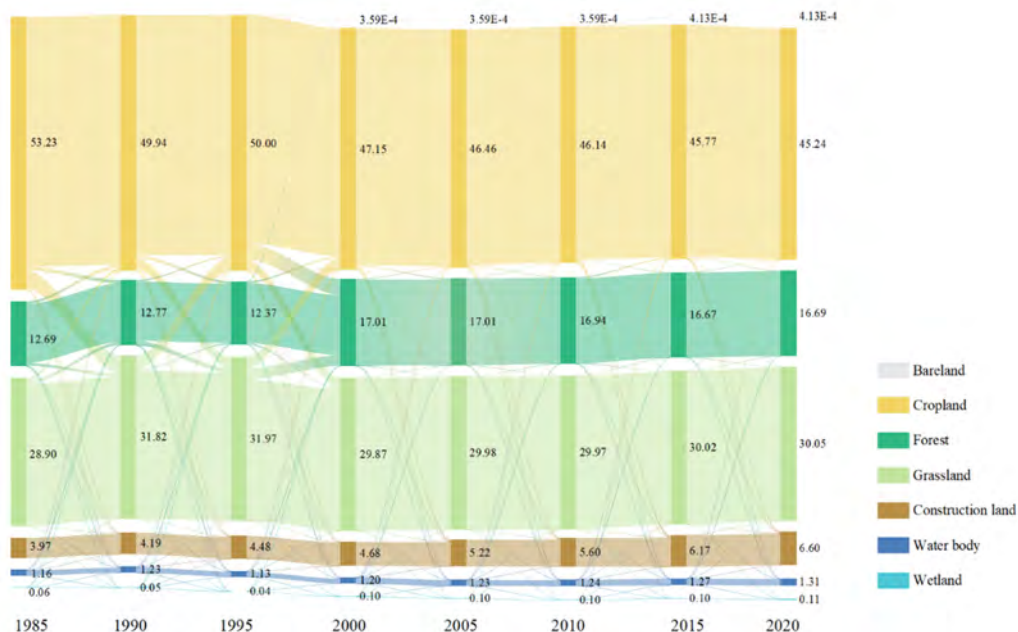


Fig. 5. Sankey diagram of LULC changes in the affected area of LGOK and SGOK Iron Ore Mine
 Рис. 5. Диаграмма Сэнкей по изменению классов землепользования / наземного покрова в зоне воздействия рудников ЛГОК и СГОК

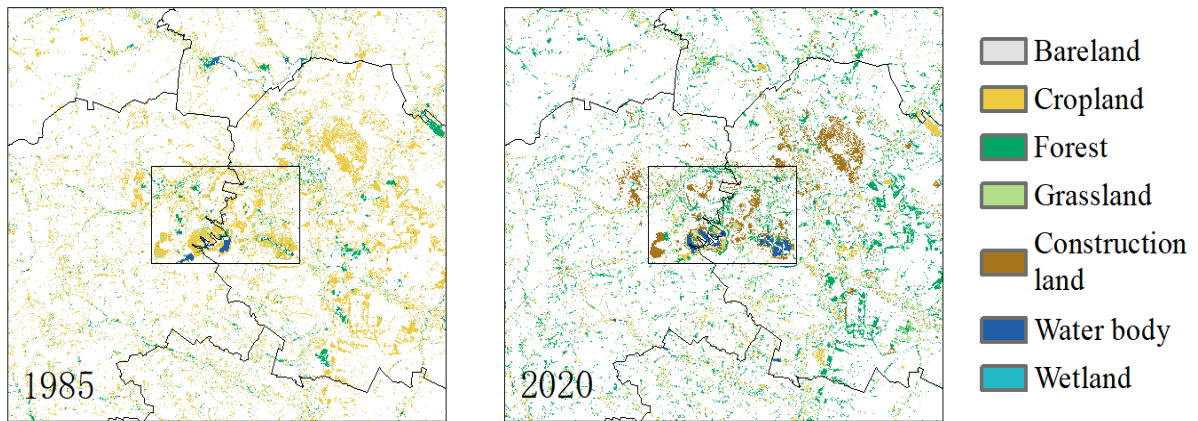


Fig. 6. LULC change map of the affected area of LGOK and SGOK Iron Ore Mines in Russia
 Рис. 6. Карта изменений LULC в зоне воздействия рудников ЛГОК и СГОК в России

Table 6
 Таблица 6

LULC area change (km²) and change rate (%) in the affected area of LGOK and SGOK Iron Ore Mines
 Изменение площади землепользования / наземного покрова (км²) и скорость изменений (%)
 в зоне воздействия рудников ЛГОК и СГОК

Time	Changes	Cropland	Forest	Grassland	Wetland	Water body	Bareland	Construction land	S ¹
1985–1990	Area change	-263.62	6.41	234.12	-0.77	5.60	0.00	18.27	0.16
	Change rate	-0.01	0.00	0.02	-0.03	0.01	—	0.01	
1990–1995	Area change	4.82	-31.95	12.35	-0.07	-7.78	0.00	22.63	0.16
	Change rate	0.00	-0.01	0.00	-0.00	-0.02	—	0.01	
1995–2000	Area change	-228.97	371.95	-168.63	4.23	5.19	0.03	16.20	0.13
	Change rate	-0.01	0.08	-0.01	0.23	0.01	—	0.01	
2000–2005	Area change	-54.77	0.21	8.73	0.16	2.31	0.00	43.36	0.01
	Change rate	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	
2005–2010	Area change	-25.88	-5.88	-0.34	0.14	1.47	0.00	30.50	0.01
	Change rate	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	
2010–2015	Area change	-29.79	-21.84	3.74	0.27	2.20	0.00	45.42	0.01
	Change rate	-0.00	-0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.02	
2015–2020	Area change	-42.57	2.05	2.60	0.39	3.18	0.00	34.34	0.01
	Change rate	-0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	
1985–2020	Area change	-640.78	320.95	92.58	4.34	12.17	0.03	210.72	0.02
	Change rate	-0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	—	0.02	

¹ S represents comprehensive land-use dynamics.

Table 7
Таблица 7

Matrix of LULC change and transfer (km²) in the affected area of LGOK and SGOK Iron Ore Mine in Russia from 1985 to 2020

Матрица изменений и трансформаций классов землепользования / наземного покрова (км²) в зоне воздействия железорудного производства ЛГОК и СГОК в России с 1985 по 2020 год

LULC type	Cropland	Forest	Grassland	Wetland	Water body	Bareland	Construction land
Cropland	0	23	0	0	0	0	0
Forest	0	2424574	39630	54122	0	2495	26
Grassland	0	235447	621005	68293	0	5200	337
Wetland	0	164509	34932	1472251	1	2918	123
Water body	0	125307	6369	12495	220994	2402	5
Bareland	0	15019	5090	2408	0	50443	126
Construction land	0	1705	0	768	0	1164	2477

Overall, bareland exhibited the smallest degree of change, maintaining relative stability throughout the study period. Grassland and cropland experienced moderate fluctuations, while wetland and construction land showed the largest changes. Construction land consistently increased, reflecting regional development and urban expansion, while cropland area decreased significantly, indicating land conversion driven by mining and infrastructure growth. Among the seven land use types, all except cropland showed an overall increase in area.

The comprehensive land-use dynamics index (S) peaked during 1985–1995, indicating that this was the most intense period of LULC change. After 2000, the S value stabilized at 0.01, suggesting a trend toward land-use equilibrium, possibly driven by a balance between development activities and ecological restoration efforts.

The Sankey diagram (Figure 5) and transfer matrix (Table 7) provide further insights into land-use conversion patterns.

Cropland Decline: Cropland was the primary donor land type, transitioning into forest, grassland, and construction land. Between 1995 and 2000, 251.87 km² of cropland was converted to forest. Significant cropland-to-grassland conversions were observed during 1985–2000, with conversion areas of 283.65, 174.90, and 163.66 km², respectively. However, between 1990 and 2000, grassland-to-cropland conversions exceeded cropland-to-grassland transitions. After 2000, cropland-to-grassland conversions declined sharply.

Construction Land Expansion: Construction land primarily expanded through cropland conversions, with the largest conversion (41.16 km²) occurring between 2010 and 2015, reflecting infrastructure and urban development demands.

Forest and Wetland Recovery: Grassland contributed significantly to forest increases, particularly between 1995 and 2000, when 167.80 km² of grassland was converted to forest. Wetland increases were primarily sourced from cropland, with the largest transfer of 9.81 km² occurring during 1995–2000, highlighting localized hydrological recovery.

The spatial distribution of LULC changes (Figure 6) reveals that 14.01% of the study area underwent significant transformations between 1985 and 2020. These changes were concentrated

within the mining cores and in the eastern portion of the study region, where mining and urbanization activities were most intense. Construction land expanded significantly, replacing cropland in the core and surrounding areas of the mines, reflecting the direct impact of mining operations and regional development. In contrast, forest areas exhibited slight increases in some regions, likely due to vegetation restoration efforts or the implementation of environmental protection policies.

The analysis of LULC changes in the Anshan-Benxi iron ore affected area from 1985 to 2020 highlights significant dynamic transitions and conversion patterns among different land use types (Figures 7 and 8; Tables 8 and 9).

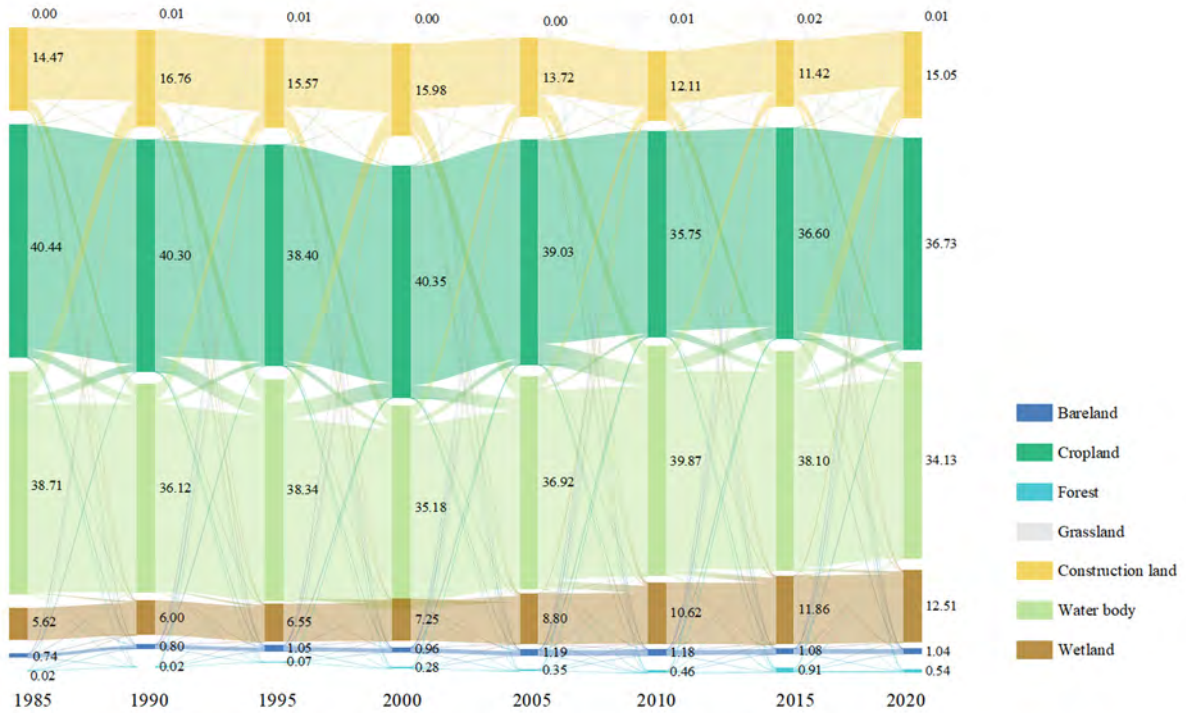


Fig. 7. Sankey diagram of LULC changes in the affected area of Anshan-Benxi Iron Ore Mine in China

Рис. 7. Диаграмма Санкей по изменению классов землепользования / наземного покрова в зоне воздействия железорудного производства Аньшань-Бэньси в Китае

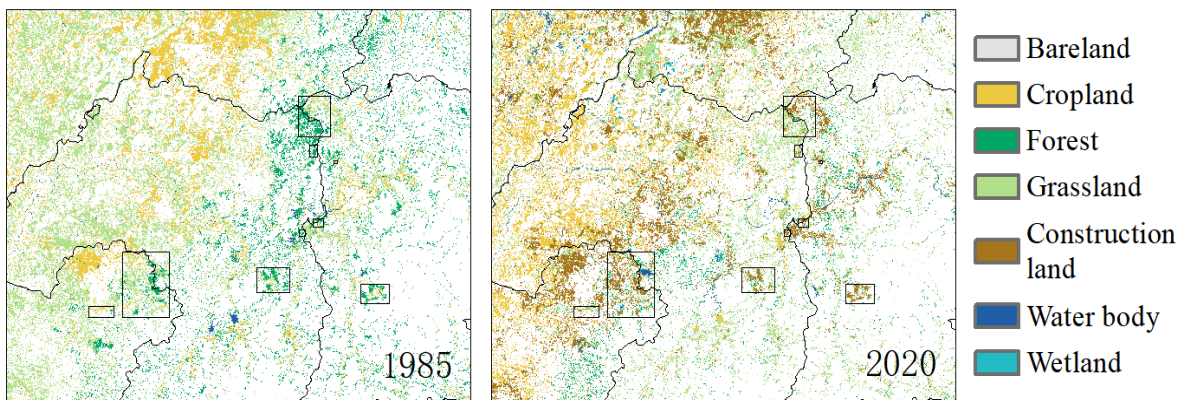


Fig. 8. LULC change map of the affected area of Anshan-Benxi Iron Ore Mine in China

Рис. 8. Карта изменений землепользования / наземного покрова в зоне воздействия рудника Аньшань-Бэньси в Китае

Table 8
Таблица 8

LULC area change (km²) and change rate (%) in the affected area of Anshan-Benxi Iron Ore Mine
Изменение площади классов землепользования / наземного покрова (км²)
и скорости изменений (%) в зоне воздействия рудника Аньшань-Бэньси

Time	Changes	Cropland	Forest	Grassland	Wetland	Water body	Bareland	Construction land	S ¹
1985–1990	Area change	450.66	-26.89	-511.78	-0.33	12.23	1.11	74.99	0.28
	Change rate	3.16	-0.07	-1.34	-1.61	1.69	62.36	1.35	
1990–1995	Area change	-233.57	-375.18	438.87	10.55	50.05	0.34	246.27	0.33
	Change rate	-1.41	-0.94	1.23	56.44	6.36	4.63	1.84	
1995–2000	Area change	80.44	384.21	-622.54	40.26	-18.62	-1.07	0.00	0.45
	Change rate	0.52	1.01	-1.65	56.35	-1.80	-11.90	2.12	
2000–2005	Area change	-446.35	-260.95	341.66	14.34	45.62	-0.36	306.04	0.43
	Change rate	-2.83	-0.66	0.98	5.26	4.83	-9.74	4.28	
2005–2010	Area change	-316.74	-647.00	582.30	22.69	-1.06	0.91	358.89	0.42
	Change rate	-2.34	-1.68	1.60	6.59	-0.09	48.63	4.13	
2010–2015	Area change	-136.55	168.88	-348.98	87.46	-19.54	2.51	246.14	0.37
	Change rate	-1.14	0.48	-0.89	19.10	-1.68	38.99	2.35	
2015–2020	Area change	714.81	24.46	-783.91	-72.82	-9.40	-1.03	127.99	0.55
	Change rate	6.34	0.07	-2.09	-8.13	-0.88	-5.44	1.09	
1985–2020	Area change	112.70	-732.48	-904.38	102.14	59.28	2.41	1360.32	0.07
	Change rate	0.11	-0.26	-0.34	71.77	1.17	19.33	3.51	

¹ S represents Comprehensive land-use dynamics.

Table 9
Таблица 9

Matrix of LULC change and transfer (km²) in the affected area of Anshan-Benxi Iron Ore Mine in China from 1985 to 2020
Матрица изменений и трансформаций классов землепользования / наземного покрова (км²)
в зоне воздействия железорудного производства Аньшань-Бэньси в Китае с 1985 по 2020 год

LULC type	Cropland	Forest	Grassland	Wetland	Water body	Bareland	Construction land
Cropland	1557.90	18.93	1369.08	0.14	22.44	0.02	0.00
Forest	12.85	6946.87	285.31	0.01	1.11	0.00	0.00
Grassland	765.17	914.31	5035.94	0.20	17.20	0.20	0.00
Wetland	52.94	0.82	38.86	3.52	10.07	0.00	0.00
Water body	45.20	10.71	59.59	0.09	88.80	0.02	0.00
Bareland	0.72	0.91	1.08	0.00	0.05	0.01	0.00
Construction land	421.03	86.09	847.54	0.11	5.45	0.10	1108.63

Over the study period, forest exhibited the smallest degree of change, reflecting relative stability. Grassland and cropland followed with moderate fluctuations, while wetland and bareland experienced the most significant changes. Construction land showed a consistent increase across all periods, aligning with drivers of industrial and urban development. Among the



land-use types, all except forest and grassland exhibited an overall increase in area, reflecting a shift toward more anthropogenic land uses.

The comprehensive land-use dynamics index (S) peaked at 0.55 during 2015–2020, indicating the most intense LULC changes during this period. The lowest value of S (0.01) was recorded during 1985–1990, suggesting relative land-use stability. The overall trend in S showed an increase from 1985–2000, a decrease from 2000–2015, and a subsequent increase during 2015–2020, highlighting varying pressures on land use over time.

The Sankey diagram (Figure 7) and transfer matrix (Table 9) further reveal key land conversion patterns:

Grassland Reduction and Cropland Increase: Grassland-to-cropland conversions were the largest source of cropland growth, particularly during 2015–2020, when 1040.01 km² of grassland was converted. This accounted for a significant portion of grassland reduction.

Grassland Conversion to Construction Land: Grassland also contributed substantially to the expansion of construction land, especially during 2005–2010, when 245.93 km² of grassland was converted.

Forest Reduction: Forest loss was primarily driven by its conversion to grassland, with the highest conversion observed during 2005–2010, totaling 714.52 km².

Wetland and Water Body Increases: Wetland and water body areas increased, primarily sourced from cropland and grassland conversions. For example, during 2010–2015, 77.88 km² of cropland and 42.34 km² of grassland were converted into wetland. Similarly, from 1990–1995, cropland and grassland transfers to water bodies reached 31.83 km² and 30.31 km², respectively.

The spatial distribution of LULC changes (Figure 8) reveals that approximately 25.28 % of the study area underwent significant transformations between 1985 and 2020. Changes were concentrated in the northwestern region, influenced by topography and urban expansion, while fewer changes were observed in the southeastern areas. Construction land expanded significantly near the mining areas and the provincial capital, Shenyang. This expansion was driven by the conversion of grassland and forest near mining sites and cropland in the northern region, reflecting the pressures of urban and industrial development. In contrast, grassland and cropland exhibited notable decreases, largely attributed to mining activities and urban growth in proximity to the mining areas. Forest areas increased slightly in localized regions, particularly along the boundary between Liaoyang and Anshan.

The establishment of changes in land cover has important practical applications for substantiating the boundaries of sanitary protection zones in the context of the prospective development of the mining industry [Полетаев, Лисецкий, 2023]. The LULC changes observed in both the LGOK and SGOK regions in Russia and the Anshan-Benxi region in China highlight the complex interplay between industrial development, urbanization, and ecological recovery [Lambin et al., 2003]. While construction land expansion was a common feature driven by mining and urban growth, significant regional differences in land-use dynamics and ecological impacts underscore the importance of tailored land management strategies.

In the LGOK and SGOK regions, the modest percentage of changed areas (14.01 %) and the observed recovery of forest and wetland areas suggest relatively effective land management practices [Galperin, 2015]. The stabilization of the S index after 2000 indicates a balance between development and ecological restoration, reflecting some degree of success in mitigating the environmental impacts of mining [Chazdon, 2008]. However, the continued decline in cropland highlights the need for strategies that support economic growth while minimizing agricultural land losses.

Conversely, the Anshan-Benxi region experienced more intense land-use changes, with 25.28 % of the area undergoing significant transformations [Liu et al., 2023]. The pronounced reduction in grassland and cropland, coupled with the rapid expansion of construction land, reflects greater pressure from industrialization and urbanization [Seto et al., 2012]. The Anshan-Benxi region's proximity to densely populated urban areas and its role as an industrial hub have

amplified the extent of land-use changes, with mining-related developments exerting a stronger impact on the local environment [Kou et al., 2024]. While localized forest and wetland recovery efforts have shown promise [Wu et al., 2024], the overall shift from ecological to anthropogenic land use has disrupted the regional ecosystem balance.

These findings emphasize the urgent need for integrated policies that balance economic growth with environmental conservation, such as soil improvement measures [Kong et al., 2023], stricter land-use regulations, and enhanced ecological restoration initiatives. Collectively, these findings underscore the critical role of adaptive and region-specific land management strategies in mining regions [Turner et al., 1995].

For the LGOK and SGOK regions, continued emphasis on ecological restoration and sustainable practices will be essential to maintain the current balance between development and environmental protection [Chazdon, 2008]. In the Anshan-Benxi region, additional efforts are required to curb the rapid loss of natural land uses, ensure sustainable urban expansion, and mitigate the ecological impacts of mining activities [Worlanyo, Jiangfeng, 2021].

Estimation of carbon sequestration

As shown in Figure 9, from 1985 to 2020, the total carbon sink (sum of all types) in the Russian iron mining areas remained generally stable, with a slight increase from 102.3 Mt to 106.0 Mt. Specifically, the carbon sink capacity of forest and grassland areas remained relatively stable, while that of cropland experienced a slight decline. Forest carbon sequestration decreased to 27.2 Mt in 1995 but subsequently recovered, reaching a peak of 37.5 Mt in 2000. Grassland carbon sequestration showed fluctuations, gradually declining after 1995. Cropland carbon sequestration demonstrated minor variations over the time periods but showed a slight overall decrease. In terms of period-specific changes, forest carbon sequestration increased substantially between 1995 and 2000 (+10.23 Mt), while that of grassland and cropland decreased by 2.31 Mt and 2.29 Mt, respectively. Overall, the changes in carbon sequestration in the Russian iron mining areas were minimal during the study period, with total carbon sequestration increasing by only 3.69 Mt.

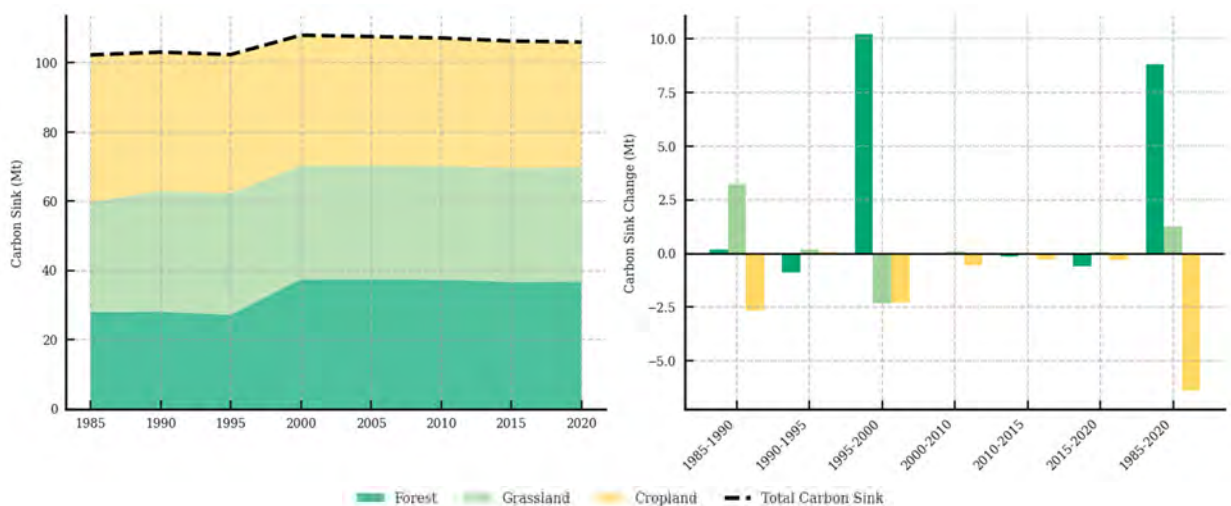


Fig. 9. Carbon Sequestration in the Affected Area of LGOK and SGOK Iron Ore Mines
Рис. 9. Поглощение углерода в зоне воздействия железорудных месторождений ЛГОК и СГОК

In contrast, as illustrated in Figure 10, the carbon sequestration in the Chinese iron mining areas showed a significant declining trend from 1985 to 2020, decreasing from 352.6 Mt to 321.2 Mt. Forest carbon sink capacity decreased most notably, especially between 2010 and 2015, with a reduction of 17.79 Mt. Grassland carbon sequestration fluctuated significantly over the study period, with an increase between 1990 and 1995, followed by substantial variations.

Cropland carbon sequestration, meanwhile, showed an overall decline after 1990, particularly between 2000 and 2010. Regarding changes across various periods, forest carbon sequestration decreased by 20.14 Mt, that of grassland fell by 12.39 Mt, and cropland sequestration reduced by 1.13 Mt between 1985 and 2020. The total carbon sequestration in the Chinese iron mining areas declined by 31.41 Mt over the study period, indicating a notable downward trend.

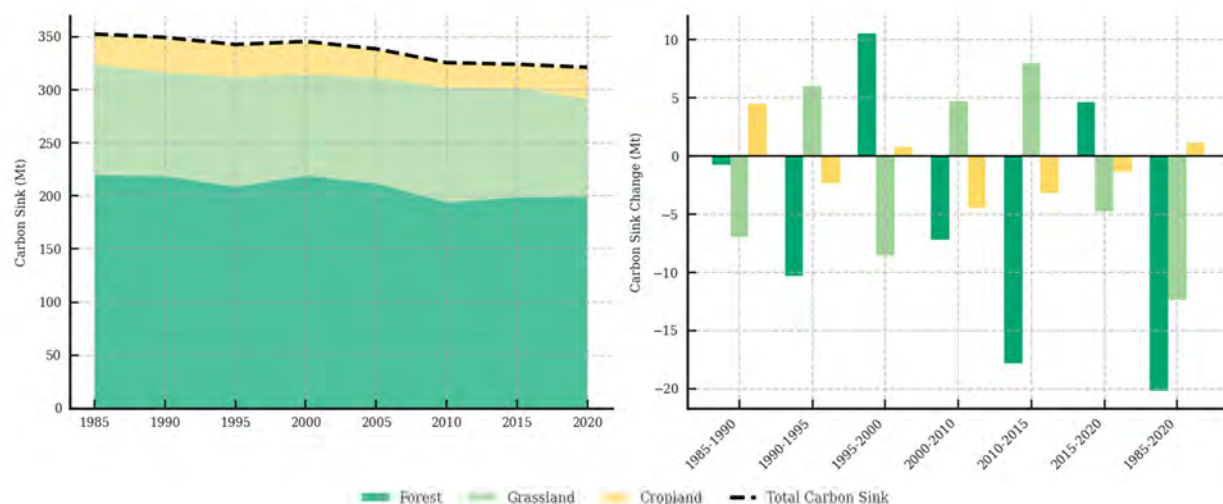


Fig. 10. Carbon Sequestration in the Affected Area of Anshan-Benxi Iron Ore Mine
 Рис. 10. Секвестрация углерода в зоне воздействия рудника Аньшань-Бэньси

In summary, during the study period, the total carbon sequestration in the Russian iron mining areas remained stable, with a slight increase of 3.69 Mt, while the Chinese iron mining areas experienced a significant decrease of 31.41 Mt, primarily due to reductions in forest and grassland carbon sink capacity. These findings further underscore the necessity of strengthening environmental protection and sustainable practices in the Chinese mining areas to mitigate the adverse impacts of land-use changes on carbon sequestration and regional ecosystems [Han, Li, 2022].

Conclusion

This study provides a comprehensive analysis of LULC dynamics and changes in carbon sequestration in the LGOK and SGOK iron ore regions in Russia and the Anshan-Benxi iron ore region in China from 1985 to 2020. The findings reveal that mining activities and urban expansion significantly influenced LULC patterns and carbon sequestration capacity in both regions, though with differing degrees and trends.

In Russia, cropland area decreased by approximately 8 % (640.78 km²), primarily replaced by construction land and forest. Forest cover increased from 12.69 % to 16.69 %, reflecting effective ecological management practices. Consequently, the total carbon sequestration in Russian mining regions remained stable, with a slight increase of 3.69 Mt over the study period. In contrast, the Anshan-Benxi region in China experienced stronger development pressures, leading to a decrease in forest cover from 40.44 % to 36.73 % and an increase in construction land from 5.62 % to 12.51 %. These changes contributed to a significant decline in total carbon sequestration by 31.41 Mt, driven largely by reductions in forest and grassland carbon sink capacity.

These contrasting trends underscore the importance of sustainable land management strategies that prioritize ecological restoration alongside industrial growth. Effective strategies such as afforestation, wetland restoration, and adaptive land-use policies are critical for mitigating the environmental impacts of mining and maintaining carbon sequestration capacities. Future policies should focus on harmonizing economic growth with environmental conservation, ensuring that industrial development in mining regions is balanced with sustainable land use to promote long-term ecological and economic stability.

Список литературы

- Беленко В.В., Ассех К.Ф. 2022. Проблемные вопросы обнаружения изменений состава земель методами дистанционного зондирования Земли из космоса для целей рационального использования на примере Республики Кот-д'Ивуар. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 66(4): 86–100. <https://doi.org/10.30533/0536-101X-2022-66-4-86-100>.
- Гзогян С.Р., Гзогян Т.Н. 2018. Особенности вещественного состава богатых железных руд месторождений КМА. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки, 42(2): 131–141. <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2018-42-2-131-141>.
- Кирсанов А.К. 2023. Обзор современного состояния горнодобывающей промышленности Китая. Горные науки и технологии, 8(2): 115–127. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-11-35>.
- Корнилов А.Г., Кичигин Е.В., Колмыков С.Н., Новых Л.Л., Дроздова Е.А., Петин А.Н., Присный А.В., Лазарев А.В., Колчанов А.Ф. 2015. Экологическая ситуация в районах размещения горнодобывающих предприятий региона Курской магнитной аномалии. Белгород, Изд. Белгородского государственного университета, 157 с.
- Полетаев А.О., Лисецкий Ф.Н. 2023. Использование мониторинговых данных и ГИС-технологий для корректировки границ санитарно-защитных зон в связи с развитием Старооскольско-Губкинского промышленного района. Геополитика и экогеодинамика регионов, 9(3): 338–347.
- Савин И.Ю., Березуцкая Э.Р. 2024. Концепция наземного покрова (Land Cover) как основа дистанционного мониторинга земель. Региональные геосистемы, 48(1): 77–90. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2024-48-1-77-90>.
- Хуан Л., Полетаев А.О. 2024. Использование возможностей космического мониторинга для выявления особенностей трансформации земель в зоне влияния ведущих железорудных предприятий России и Китая. В кн.: Геоэкология и рациональное недропользование: от науки к практике. Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых, Белгород, 10 октября 2024. Белгород, Белгородский государственный национальный исследовательский университет: 117–125.
- Abbas Z., Yang G., Zhong Y., Zhao Y. 2021. Spatiotemporal Change Analysis and Future Scenario of LULC Using the CA-ANN Approach: A Case Study of the Greater Bay Area, China. Land, 10(6): 584. <https://doi.org/10.3390/land10060584>.
- Alshari E.A., Gawali B.W. 2021. Development of a Classification System for LULC Using Remote Sensing and GIS. Global Transitions Proceedings, 2(1): 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.gltp.2021.01.002>.
- Anderson J.R. 1976. A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data. US Government Printing Office, 28 p.
- Basheer S., Wang X., Farooque A.A., Nawaz R.A., Liu K., Adekanmbi T., Liu S. 2022. Comparison of Land Use Land Cover Classifiers Using Different Satellite Imagery and Machine Learning Techniques. Remote Sensing, 14(19): 4978. <https://doi.org/10.3390/rs14194978>.
- Chazdon R.L. 2008. Beyond Deforestation: Restoring Forests and Ecosystem Services on Degraded Lands. Science, 320(5882): 1458–1460. <https://doi.org/10.1126/science.1155365>.
- Di Gregorio A. 2005. Land Cover Classification System: Classification Concepts and User Manual. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 208 p.
- Digra M., Dhir R., Sharma N. 2022. Land Use Land Cover Classification of Remote Sensing Images Based on the Deep Learning Approaches: A Statistical Analysis and Review. Arabian Journal of Geosciences, 15: 1003. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10246-8>.
- Foley J.A., Defries R., Asner G.P., Barford C., Bonan G., Carpenter S.R., Chapin F.S., Coe M.T., Daily G.C., Gibbs H.K., Helkowski J.H., Holloway T., Howard E.A., Kucharik Ch.J., Monfreda Ch., Patz J.A., Prentice I.C., Ramankutty N., Snyder P.K. 2005. Global Consequences of Land Use. Science, 309(5734): 570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>.
- Galperin A. 2015. Using of Man-Made Massives in Russian Mining (Engineering: Geological Aspects). Engineering Geology for Society and Territory, 6: 1057–1062. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09060-3_192.
- Grimm N.B., Faeth S.H., Golubiewski N.E., Redman C.L., Wu J., Bai X., Briggs J.M. 2008. Global Change and the Ecology of Cities. Science, 319(5864): 756–760. <https://doi.org/10.1126/science.1150195>.
- Han H., Li X. 2022. Sustainable Land Use Management in Mining Areas: Challenges and Strategies. Resources Policy, 76: 102616. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102616>.



- Hu X., Liao W., Wei Y., Wei Z., Huang Sh. 2024. Analysis of Land Use Change and Its Economic and Ecological Value under the Optimal Scenario and Green Development Advancement Policy: A Case Study of Hechi, China. *Sustainability*, 16(12): 5039. <https://doi.org/10.3390/su16125039>.
- Kou X., Zhao J., Sang W. 2024. Impact of Typical Land Use Expansion Induced by Ecological Restoration and Protection Projects on Landscape Patterns. *Land*, 13(9): 1513. <https://doi.org/10.3390/land13091513>.
- Lal R. 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 304(5677): 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>.
- Lambin E.F., Geist H.J. 2008. *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts*. Springer Science & Business Media, 222 p.
- Lambin E.F., Geist H.J., Lepers E. 2003. Dynamics of Land-Use and Land-Cover Change in Tropical Regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28(1): 205–241. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>.
- Liu H., Wang Q., Liu N., Zhang H., Tan Y., Zhang Z. 2023. The Impact of Land Use/Cover Change on Ecological Environment Quality and Its Spatial Spillover Effect under the Coupling Effect of Urban Expansion and Open-Pit Mining Activities. *Sustainability*, 15(20): 14900. <https://doi.org/10.3390/su152014900>.
- Liu Y., Li J., Yang Y. 2023. Urbanization and Its Effects on Land Use and Land Cover Change in the Anshan-Benxi Region, China. *Journal of Geographical Sciences*, 33(2): 245–260. <https://doi.org/10.1007/s11442-023-2035-6>.
- Liu Y., Zhan J., Deng X. 2005. Spatio-Temporal Patterns and Driving Forces of Urban Land Expansion in China During the Economic Reform Era. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 34(6): 450–455. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-34.6.450>.
- Ni J. 2013. Carbon Storage in Chinese Terrestrial Ecosystems: Approaching a More Accurate Estimate. *Climatic Change*, 119(3): 905–917. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0767-7>.
- Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., Phillips O.L., Shvidenko A., Lewis S.L., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Pacala S.W., McGuire A.D., Piao S., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D. 2011. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 333(6045): 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>.
- Pang Z., Bu J., Yuan Y., Zheng J., Xue Q., Wang J., Guo H., Zuo H. 2023. The Low-Carbon Production of Iron and Steel Industry Transition Process in China. *Steel Research International*, 95(3): 2300500. <https://doi.org/10.1002/srin.202300500>.
- Pirnazar M., Haghghi N., Azhand D., Ostad-Ali-Askari K., Eslamian S., Dalezios N.R., Singh V.P. 2021. Land Use Change Detection and Prediction Using Markov-CA and Publishing on the Web with Platform Map Server: Case Study Qom Metropolis, Iran. *Journal of Geography and Cartography*, 4(1): 7–20. <https://doi.org/10.24294/jgc.v4i1.453>.
- Pontius G.R., Malanson J. 2005. Comparison of the Structure and Accuracy of Two Land Change Models. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2): 243–265. <https://doi.org/10.1080/13658810410001713434>.
- Post W.M., Kwon K.C. 2000. Soil Carbon Sequestration and Land-Use Change: Processes and Potential. *Global Change Biology*, 6(3): 317–327. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x>.
- Seto K.C., Güneralp B., Hutyra L.R. 2012. Global Forecasts of Urban Expansion to 2030 and Direct Impacts on Biodiversity and Carbon Pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(40): 16083–16088. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109>.
- Turner B.L., Lambin E.F., Reenberg A. 2007. The Emergence of Land Change Science for Global Environmental Change and Sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52): 20666–20671. <https://doi.org/10.1073/pnas.0704119104>.
- Turner B.L., Skole D., Sanderson S., Fischer G., Fresco L., Leemans R. 1995. *Land-Use and Land-Cover Change: Science/Research Plan*. IGBP Report, 35: 132.
- Verburg P.H., Schot P.P., Dijst M.J., Veldkamp A. 2004. Land Use Change Modelling: Current Practice and Research Priorities. *GeoJournal*, 61(4): 309–324. <https://doi.org/10.1007/s10708-004-4946-y>.
- Wohlfart C., Mack B., Liu G., Kuenzer C. 2017. Multi-Faceted Land Cover and Land Use Change Analyses in the Yellow River Basin Based on Dense Landsat Time Series: Exemplary Analysis in Mining, Agriculture, Forest, and Urban Areas. *Applied Geography*, 85: 73–88. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.06.004>.

- Worlanyo A.S., Jiangfeng L. 2021. Evaluating the Environmental and Economic Impact of Mining for Post-Mined Land Restoration and Land-Use: A Review. *Journal of Environmental Management*, 279: 111623. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111623>.
- Wu J., Yang J., Ma L., Li Z., Shen X. 2016. A System Analysis of the Development Strategy of Iron Ore in China. *Resources Policy*, 48: 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.01.010>.
- Wu Q., Wang L., Wang T., Chen H., Du P. 2024. Global Versus Local? A Study on the Synergistic Relationship of Ecosystem Service Trade-Offs from Multiple Perspectives Based on Ecological Restoration Zoning of National Land Space – A Case Study of Liaoning Province. *Applied Sciences*, 14(22): 10421. <https://doi.org/10.3390/app142210421>.
- Xu Y., Li J., Zhang C., Raval S., Guo L., Yang F. 2024. Dynamics of Carbon Sequestration in Vegetation Affected by Large-Scale Surface Coal Mining and Subsequent Restoration. *Scientific Reports*, 14: 13479. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64381-1>.
- Yifter T., Razoumny Yu., Lobanov V. 2022. Deep Transfer Learning of Satellite Imagery for Land Use and Land Cover Classification. *Informatics and Automation*, 21(5): 963–982. <https://doi.org/10.15622/ia.21.5.5>.
- Zhang X., Liu L., Chen X., Gao Y., Xie S., Mi J. 2021. GLC_FCS30: Global Land Cover Product with Fine Classification System at 30 m Using Time-Series Landsat Imagery. *Earth System Science Data*, 13(6): 2753–2776. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2753-2021>.
- Zhang Z., Bai Z., He Z., Bao N. 2012. Dynamic Changes of Land Use Type and Carbon Sinks Based RS and GIS in Pingshuo Opencast Coal Mine. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 28(3): 230–236. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2012.03.040>.
- Zheng L., Li Y., Chen Y., Wang R., Yan S., Xia C., Zhang B., Shao J. 2024. Driving Model of Land Use Change on the Evolution of Carbon Stock: A Case Study of Chongqing, China. *Environmental Science and Pollution Research International*, 31(3): 4238–4255. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31335-5>.
- Kong T., Zhang K., Huang L., Di J., Wang Y., Zhang J. 2023. Effects of mixed application of microbial agents on growth and substrate properties of alfalfa in coal gangue matrix with different particle sizes. *Journal of China Coal Society*, 48(S1): 241–251. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2022.0615> (in Chinese).
- Shvidenko A., Nilsson S. 2003. A Synthesis of the Impact of Russian Forests on the Global Carbon Budget for 1961–1998. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 55(2): 391–415. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v55i2.16722>.
- Di Gregorio A., Jansen L.J.M. 2006. *Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual*. Rome, FAO, 179 p.
- Shelestov A., Lavreniuk M., Kussul N., Novikov A., Skakun S. 2017. Exploring Google Earth Engine Platform for Big Data Processing: Classification of Multi-Temporal Satellite Imagery for Crop Mapping. *Frontiers in Earth Science*, 5: 1–10. <https://doi.org/10.3389/FEART.2017.00017>.
- Rasskazov I.Y., Arkhipova Y.A., Kryukov V.G., Volkov A.F. 2023. Mining Industry in the Russian Far East: Balancing the Interests of Subsoil Use and the State. *Journal of Mining Science*, 59(3): 481–489.
- Rengma N.S., Yadav M. 2024. Generation and Classification of Patch-Based Land Use and Land Cover Dataset in Diverse Indian Landscapes: A Comparative Study of Machine Learning and Deep Learning Models. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(6): 568. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12719-7>.
- Ahialek E.K., Kabo-Bah A.T., Gyamfi S. 2024. LULC Changes in the Region of the Proposed Pwalugu Hydropower Project Using GIS and Remote Sensing Technique. *Journal of Geography and Cartography*, 7(2): 8282. <https://doi.org/10.24294/jgc.v7i2.8282>.

References

- Belenko V.V., Assekh K.F. 2022. Problematic Issues of Detecting Changes in Land Composition Using Remote Sensing Methods for Rational Land Use: The Case of Côte d'Ivoire. *Annals of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography*, 66(4): 86–100 (in Russian). <https://doi.org/10.30533/0536-101X-2022-66-4-86-100>.



- Gzogyan S.R., Gzogyan T.N. 2018. Material Composition of Rich Iron Ore Deposits of KMA. *Scientific Bulletin of Belgorod State University. Series: Natural Sciences*, 42(2): 131–141 (in Russian). <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2018-42-2-131-141>.
- Kirsanov A.K. 2023. Chinese Mining Industry: State of the Art Review. *Mining Science and Technology*, 8(2): 115–127 (in Russian). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-11-35>.
- Kornilov A.G., Kichigin E.V., Kolmykov S.N., Novykh L.L., Drozdova E.A., Petin A.N., Prisny A.V., Lazarev A.V., Kolchanov A.F. 2015. Environmental Situation in the Areas where Mining Enterprises on the Region of Kursk Magnetic Anomaly. Belgorod, Publ. Belgorod State University, 157 p. (in Russian).
- Poletaev A.O., Lisetskiy F.N. 2023. The Use of Monitoring Data and GIS Technologies to Adjust the Boundaries of Sanitary Protection Zones in Connection with the Development of the Stary Oskol and Gubkin Industrial Area. *Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions*, 9(3): 338–347 (in Russian).
- Savin I.Yu., Berezutskaya E.R. 2024. The Concept of Land Cover as a Basis for Remote Sensing Monitoring of Land. *Regional Geosystems*, 48(1): 77–90 (in Russian). <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2024-48-1-77-90>.
- Huang L., Poletaev A.O. 2024. Using Space Monitoring Capabilities to Identify Land Transformation Features in the Influence Zones of Major Iron Ore Enterprises in Russia and China. In: *Geocology and Rational Subsoil Use: From Science to Practice. Proceedings of the 4th All-Russian Scientific Conference of Young Scientists*, Belgorod, 10 October 2024. Belgorod, Publ. Belgorod State National Research University: 117–125 (in Russian).
- Abbas Z., Yang G., Zhong Y., Zhao Y. 2021. Spatiotemporal Change Analysis and Future Scenario of LULC Using the CA-ANN Approach: A Case Study of the Greater Bay Area, China. *Land*, 10(6): 584. <https://doi.org/10.3390/land10060584>.
- Ahialek E.K., Kabo-Bah A.T., Gyamfi S. 2024. LULC Changes in the Region of the Proposed Pwalugu Hydropower Project Using GIS and Remote Sensing Technique. *Journal of Geography and Cartography*, 7(2): 8282. <https://doi.org/10.24294/jgc.v7i2.8282>.
- Alshari E.A., Gawali B.W. 2021. Development of a Classification System for LULC Using Remote Sensing and GIS. *Global Transitions Proceedings*, 2(1): 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.gltp.2021.01.002>.
- Anderson J.R. 1976. A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data. US Government Printing Office, 28 p.
- Basheer S., Wang X., Farooque A.A., Nawaz R.A., Liu K., Adekanmbi T., Liu S. 2022. Comparison of Land Use Land Cover Classifiers Using Different Satellite Imagery and Machine Learning Techniques. *Remote Sensing*, 14(19): 4978. <https://doi.org/10.3390/rs14194978>.
- Chazdon R.L. 2008. Beyond Deforestation: Restoring Forests and Ecosystem Services on Degraded Lands. *Science*, 320(5882): 1458–1460. <https://doi.org/10.1126/science.1155365>.
- Di Gregorio A. 2005. Land Cover Classification System: Classification Concepts and User Manual. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 208 p.
- Di Gregorio A., Jansen L.J.M. 2006. Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual. Rome, FAO, 179 p.
- Digra M., Dhir R., Sharma N. 2022. Land Use Land Cover Classification of Remote Sensing Images Based on the Deep Learning Approaches: A Statistical Analysis and Review. *Arabian Journal of Geosciences*, 15: 1003. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10246-8>.
- Foley J.A., Defries R., Asner G.P., Barford C., Bonan G., Carpenter S.R., Chapin F.S., Coe M.T., Daily G.C., Gibbs H.K., Helkowski J.H., Holloway T., Howard E.A., Kucharik Ch.J., Monfreda Ch., Patz J.A., Prentice I.C., Ramankutty N., Snyder P.K. 2005. Global Consequences of Land Use. *Science*, 309(5734): 570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>.
- Galperin A. 2015. Using of Man-Made Massives in Russian Mining (Engineering: Geological Aspects). *Engineering Geology for Society and Territory*, 6: 1057–1062. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09060-3_192.
- Grimm N.B., Faeth S.H., Golubiewski N.E., Redman C.L., Wu J., Bai X., Briggs J.M. 2008. Global Change and the Ecology of Cities. *Science*, 319(5864): 756–760. <https://doi.org/10.1126/science.1150195>.
- Han H., Li X. 2022. Sustainable Land Use Management in Mining Areas: Challenges and Strategies. *Resources Policy*, 76: 102616. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102616>.
- Hu X., Liao W., Wei Y., Wei Z., Huang Sh. 2024. Analysis of Land Use Change and Its Economic and Ecological Value under the Optimal Scenario and Green Development Advancement Policy: A Case Study of Hechi, China. *Sustainability*, 16(12): 5039. <https://doi.org/10.3390/su16125039>.

- Kong T., Zhang K., Huang L., Di J., Wang Y., Zhang J. 2023. Effects of mixed application of microbial agents on growth and substrate properties of alfalfa in coal gangue matrix with different particle sizes. *Journal of China Coal Society*, 48(S1): 241–251. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2022.0615> (in Chinese).
- Kou X., Zhao J., Sang W. 2024. Impact of Typical Land Use Expansion Induced by Ecological Restoration and Protection Projects on Landscape Patterns. *Land*, 13(9): 1513. <https://doi.org/10.3390/land13091513>.
- Lal R. 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 304(5677): 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>.
- Lambin E.F., Geist H.J. 2008. *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts*. Springer Science & Business Media, 222 p.
- Lambin E.F., Geist H.J., Lepers E. 2003. Dynamics of Land-Use and Land-Cover Change in Tropical Regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28(1): 205–241. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>.
- Liu H., Wang Q., Liu N., Zhang H., Tan Y., Zhang Z. 2023. The Impact of Land Use/Cover Change on Ecological Environment Quality and Its Spatial Spillover Effect under the Coupling Effect of Urban Expansion and Open-Pit Mining Activities. *Sustainability*, 15(20): 14900. <https://doi.org/10.3390/su152014900>.
- Liu Y., Li J., Yang Y. 2023. Urbanization and Its Effects on Land Use and Land Cover Change in the Anshan-Benxi Region, China. *Journal of Geographical Sciences*, 33(2): 245–260. <https://doi.org/10.1007/s11442-023-2035-6>.
- Liu Y., Zhan J., Deng X. 2005. Spatio-Temporal Patterns and Driving Forces of Urban Land Expansion in China During the Economic Reform Era. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 34(6): 450–455. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-34.6.450>.
- Ni J. 2013. Carbon Storage in Chinese Terrestrial Ecosystems: Approaching a More Accurate Estimate. *Climatic Change*, 119(3): 905–917. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0767-7>.
- Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., Phillips O.L., Shvidenko A., Lewis S.L., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Pacala S.W., McGuire A.D., Piao S., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D. 2011. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 333(6045): 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>.
- Pang Z., Bu J., Yuan Y., Zheng J., Xue Q., Wang J., Guo H., Zuo H. 2023. The Low-Carbon Production of Iron and Steel Industry Transition Process in China. *Steel Research International*, 95(3): 2300500. <https://doi.org/10.1002/srin.202300500>.
- Pirnazar M., Haghghi N., Azhand D., Ostad-Ali-Askari K., Eslamian S., Dalezios N.R., Singh V.P. 2021. Land Use Change Detection and Prediction Using Markov-CA and Publishing on the Web with Platform Map Server: Case Study Qom Metropolis, Iran. *Journal of Geography and Cartography*, 4(1): 7–20. <https://doi.org/10.24294/jgc.v4i1.453>.
- Pontius G.R., Malanson J. 2005. Comparison of the Structure and Accuracy of Two Land Change Models. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2): 243–265. <https://doi.org/10.1080/13658810410001713434>.
- Post W.M., Kwon K.C. 2000. Soil Carbon Sequestration and Land-Use Change: Processes and Potential. *Global Change Biology*, 6(3): 317–327. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x>.
- Rasskazov I.Y., Arkhipova Y.A., Kryukov V.G., Volkov A.F. 2023. Mining Industry in the Russian Far East: Balancing the Interests of Subsoil Use and the State. *Journal of Mining Science*, 59(3): 481–489.
- Rengma N.S., Yadav M. 2024. Generation and Classification of Patch-Based Land Use and Land Cover Dataset in Diverse Indian Landscapes: A Comparative Study of Machine Learning and Deep Learning Models. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(6): 568. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12719-7>.
- Seto K.C., Güneralp B., Hutyra L.R. 2012. Global Forecasts of Urban Expansion to 2030 and Direct Impacts on Biodiversity and Carbon Pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(40): 16083–16088. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109>.
- Shelestov A., Lavreniuk M., Kussul N., Novikov A., Skakun S. 2017. Exploring Google Earth Engine Platform for Big Data Processing: Classification of Multi-Temporal Satellite Imagery for Crop Mapping. *Frontiers in Earth Science*, 5: 1–10. <https://doi.org/10.3389/FEART.2017.00017>.



- Shvidenko A., Nilsson S. 2003. A Synthesis of the Impact of Russian Forests on the Global Carbon Budget for 1961–1998. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 55(2): 391–415. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v55i2.16722>.
- Turner B.L., Lambin E.F., Reenberg A. 2007. The Emergence of Land Change Science for Global Environmental Change and Sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52): 20666–20671. <https://doi.org/10.1073/pnas.0704119104>.
- Turner B.L., Skole D., Sanderson S., Fischer G., Fresco L., Leemans R. 1995. Land-Use and Land-Cover Change: Science/Research Plan. IGBP Report, 35: 132.
- Verburg P.H., Schot P.P., Dijst M.J., Veldkamp A. 2004. Land Use Change Modelling: Current Practice and Research Priorities. *GeoJournal*, 61(4): 309–324. <https://doi.org/10.1007/s10708-004-4946-y>.
- Wohlfart C., Mack B., Liu G., Kuenzer C. 2017. Multi-Faceted Land Cover and Land Use Change Analyses in the Yellow River Basin Based on Dense Landsat Time Series: Exemplary Analysis in Mining, Agriculture, Forest, and Urban Areas. *Applied Geography*, 85: 73–88. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.06.004>.
- Worlanyo A.S., Jiangfeng L. 2021. Evaluating the Environmental and Economic Impact of Mining for Post-Mined Land Restoration and Land-Use: A Review. *Journal of Environmental Management*, 279: 111623. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111623>.
- Wu J., Yang J., Ma L., Li Z., Shen X. 2016. A System Analysis of the Development Strategy of Iron Ore in China. *Resources Policy*, 48: 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.01.010>.
- Wu Q., Wang L., Wang T., Chen H., Du P. 2024. Global Versus Local? A Study on the Synergistic Relationship of Ecosystem Service Trade-Offs from Multiple Perspectives Based on Ecological Restoration Zoning of National Land Space – A Case Study of Liaoning Province. *Applied Sciences*, 14(22): 10421. <https://doi.org/10.3390/app142210421>.
- Xu Y., Li J., Zhang C., Raval S., Guo L., Yang F. 2024. Dynamics of Carbon Sequestration in Vegetation Affected by Large-Scale Surface Coal Mining and Subsequent Restoration. *Scientific Reports*, 14: 13479. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64381-1>.
- Yifter T., Razoumny Yu., Lobanov V. 2022. Deep Transfer Learning of Satellite Imagery for Land Use and Land Cover Classification. *Informatics and Automation*, 21(5): 963–982. <https://doi.org/10.15622/ia.21.5.5>.
- Zhang X., Liu L., Chen X., Gao Y., Xie S., Mi J. 2021. GLC_FCS30: Global Land Cover Product with Fine Classification System at 30 m Using Time-Series Landsat Imagery. *Earth System Science Data*, 13(6): 2753–2776. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2753-2021>.
- Zhang Z., Bai Z., He Z., Bao N. 2012. Dynamic Changes of Land Use Type and Carbon Sinks Based RS and GIS in Pingshuo Opencast Coal Mine. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 28(3): 230–236. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2012.03.040>.
- Zheng L., Li Y., Chen Y., Wang R., Yan S., Xia C., Zhang B., Shao J. 2024. Driving Model of Land Use Change on the Evolution of Carbon Stock: A Case Study of Chongqing, China. *Environmental Science and Pollution Research International*, 31(3): 4238–4255. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31335-5>.

Received November 02, 2024;

Revised December 01, 2024;

Accepted December 04, 2024

Поступила в редакцию 02.11.2024;

поступила после рецензирования 01.12.2024;

принята к публикации 04.12.2024

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

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Lihua Huang, Postgraduate (PhD) student of the Institute of Earth Sciences, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Хуан Лихуа, аспирант института наук о Земле, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия



УДК 528(88+92):004.9

DOI 10.52575/2712-7443-2024-48-4-565-577

Картографирование сельскохозяйственных угодий Белгородской области на основе данных дистанционного зондирования

Артемьева О.В., Алифанов Н.А.

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
E-mail: o.artemieva@spbu.ru, nikita.alifanov@inbox.ru

Аннотация. Развитие сельского хозяйства Российской Федерации в настоящее время определяется внешнеполитическими и экономическими условиями, сформировавшимися внутри и за пределами страны. Статья рассматривает алгоритм обработки данных дистанционного зондирования (ДДЗ) с итогом в виде электронной карты земельных угодий Белгородской области. Для территорий, сопоставимых по площади с субъектом РФ, необходим особый подход к процедуре дешифрирования и степени обобщения площадных контуров на растре и на карте. Впервые в картографировании сельскохозяйственных угодий применяются условные знаки, несущие информацию одновременно о его современном и существовавшем в прошлом состоянии. Дополнительно составлена карта распределения угодий по муниципальным образованиям региона. Предложенный алгоритм работы с ДДЗ, а также итоговые карты могут непосредственно применяться как для анализа и планирования размещения сельскохозяйственного производства области, так и в качестве примера технологического алгоритма для иных крупных регионов Российской Федерации.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, картографирование сельскохозяйственных угодий, алгоритм дешифрирования, тематическое картографирование, Белгородская область, электронные карты

Для цитирования: Артемьева О.В., Алифанов Н.А. 2024. Картографирование сельскохозяйственных угодий Белгородской области на основе данных дистанционного зондирования. Региональные геосистемы, 48(4): 565–577. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-565-577

Compiling of Agricultural Lands in the Belgorod Region Based on Remote Sensing Data

Olga V. Artemeva, Nikita A. Alifanov

St. Petersburg State University,
7–9 Universitetskaya emb., St. Petersburg 199034, Russia
E-mail: o.artemieva@spbu.ru, nikita.alifanov@inbox.ru

Abstract. The new foreign policy and economic conditions faced by Russia determine the need to apply scientific and applied research in the development of agriculture. The article examines an algorithm for processing remote sensing data of a large area which can be used in agribusiness. The result of the study is represented with a digital map of lands of the Belgorod region. For territories comparable in area to a constituent entity of the Russian Federation, there is a need to apply a special approach to the deciphering procedure and to the degree of generalization of area contours on a raster and on a map. For the first time in agricultural land mapping, conventional symbols were used that simultaneously convey information about its current and past state. In addition, the authors offer a map of agricultural land distribution among municipalities in the region. The algorithm for working with remote sensing data proposed by the authors,



as well as the resulting maps, can be directly used both for analyzing and planning the location of agribusiness facilities in the region, and as an example of a technological algorithm for other large regions of the Russian Federation.

Keywords: remote sensing data, agricultural lands compiling, interpretation algorithm, thematic mapping, Belgorod region, digital maps

For citation: Artemeva O.V., Alifanov N.A. 2024. Compiling of Agricultural Lands in the Belgorod Region Based on Remote Sensing Data. *Regional Geosystems*, 48(4): 565–577. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-565-577

Введение

Сельское хозяйство является одной из важнейших отраслей российской экономики. В числе регионов, занимающих ведущие позиции в производстве сельскохозяйственной продукции, выделяется Белгородская область: в Российской Федерации по состоянию на 2018 год она занимала первое место по производству продукции отрасли на душу населения и второе – по стоимости валовой продукции сельского хозяйства [Белгородская область ..., 2024]. Тем не менее, в этом регионе в настоящее время наблюдается общая для страны тенденция сокращения площади сельскохозяйственных угодий [Белгородская область в цифрах, 2023; Площади сельскохозяйственных угодий..., 2024]. В условиях начавшегося несколько лет назад повышения темпов и объемов производства отрасли [Чекмарев, 2014], ставшего необходимым в силу политических и социально-экономических процессов последних лет, а также возможного благодаря государственной поддержке предпринимателей, сведения о современном и существовавшем в прошлом состоянии угодий могут стать полезным инструментом для прогнозирования и упрощения принятия решений по эксплуатации земель фермерами и иными сельскохозяйственными предпринимателями, занимающимися освоением не используемых ранее территорий.

Представленные в открытом доступе источники информации о земельных угодьях недостаточно информативны. Статистические сборники и построенные на основе представленных в них данных картограммы и картодиаграммы, являющиеся элементом содержания тематических карт, не позволяют выявить динамику изменений сельскохозяйственных угодий, поскольку показывают расположение земельных угодий определенной территории и их трансформацию по годам только в рамках XXI века. Решить эти проблемы возможно в ходе обращения к материалам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в ретроспективе. В современном научном мире уже существуют примеры крупномасштабного дешифрирования сельскохозяйственных территорий. В частности, таковыми являются картографические слои, созданные на основе данных спутниковых съемок в среде существующих ГИС [Единая федеральная ..., 2024; Атлас «Природные ресурсы ...», 2024]. Используемые алгоритмы обработки раstra достаточно известны в профессиональном сообществе, однако сами по себе они применимы были только в задачах крупномасштабного картографирования. Авторы предлагают алгоритмы для визуального отображения территорий, сопоставимых по площади с субъектом Российской Федерации, где необходима иная степень обобщения площадных контуров. В результате обработки данных дистанционного зондирования Земли получены электронные карты с полигонами земель, в обозначение которых заложена информация о современном и существовавшем в прошлом виде угодий. Предложенная классификация до сих пор не использовалась в научных исследованиях. Исходя из этого практической целью исследования стал алгоритм обработки ДДЗ и создание по их материалам карт сельскохозяйственных угодий Белгородской области, показывающих эволюцию земельных угодий региона в период с 1988 по 2023 год.

Объекты и методы исследования

Карты земельных угодий, создаваемые с высоким уровнем географической детализации, являются одними из базовых карт сельского хозяйства. Наряду с картами, показывающими формы собственности в сельском хозяйстве, картами общих экономических показателей (объёма продукции, интенсивности производства и др.) карты земельных угодий относятся к группе карт общей характеристики сельскохозяйственного производства [Евтуев, 1999]. Значимым дополнением к карте угодий может стать карта, изображающая долю каждого типа угодий от общего их числа и их суммарные площади. Перечень изображаемых угодий устанавливается с опорой на соответствующие акты земельного законодательства.

В соответствии с пунктом 1 статьи 79 Земельного кодекса РФ [2001] такие угодья подразделяются на пашни, сенокосы, пастбища, залежи и земли, занятые многолетними насаждениями; самостоятельным видом являются особо ценные продуктивные угодья, такие как опытные поля научных организаций и учебных заведений.

На отдельном снимке по спектральным характеристикам составляющих его пикселей возможно дешифровать пашни и кормовые угодья, включающие сенокосы и пастбища: так, в комбинации каналов *NIR-Red-Green* территории, занятые травянистой растительностью, отображаются светло-оранжевыми оттенками, открытая почва, в данном исследовании приравниваемая к пашне, имеет на снимке цвета от светло-зеленого до коричневого (рис. 1). В ходе настоящего исследования в силу специфики используемых материалов – данных дистанционного зондирования – возможно получить достоверные сведения о фактическом использовании земель и культур, произрастаемых на них; по этой причине пашни, занятые многолетними травами, были отнесены к сенокосам (в основном многолетние травы являются кормовыми культурами), в то время как залежи не выделялись в отдельную категорию земель, а приравнивались к естественным кормовым угодьям или лесам в зависимости от характера растительного покрова на них. Для достоверного дешифрирования залежей необходимо использовать несколько разновременных снимков сверхвысокого (до 1 м) пространственного разрешения, которое позволит определить сохраняющиеся продолжительное время борозды пропашки [Стыценко, 2017]. При выделении многолетних насаждений среди других типов угодий большее значение имеет рисунок посадок, прослеживаемый на изображении: так, сады и плодпитомники отличает в плане правильная прямоугольная форма и регулярная сетчатая структура внутри контура [Шихов и др., 2020].

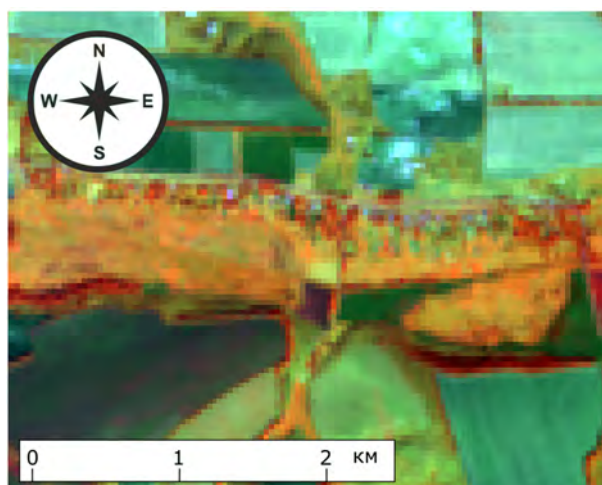


Рис. 1. Пойменный луг в окружении пашни на снимке *Landsat-9* (синтез каналов *NIR-Red-Green*)
Fig. 1. Floodplain meadow surrounded by arable land in the *Landsat-9* image
(synthesis of *NIR-Red-Green* channels)



Знание совокупности характеристик почвы земельного участка и растительности, находящейся на нём, позволяет определить его принадлежность к тому или иному виду сельскохозяйственных угодий посредством анализа многоканального спутникового снимка.

Для составления карт Белгородской области в масштабе 1: 1 000 000 были использованы снимки миссий *Landsat 9, 8, 5, 4*; пространственное разрешение этих снимков, находящихся в открытом доступе, позволяет использовать их в задачах мелкомасштабного картографирования [Khanal, Fulton, 2017]. По причине присутствия на картах большого количества контуров малой площади было решено отказаться от классических приемов изображения динамики природных процессов и отобразить угодья двух периодов времени «на одном уровне»: традиционно развитие объекта или его переход из одной формы в другую показывается наложением обозначений, при котором одно просматривается под другим (например, процессы преобразования рисунка растительного покрова или ландшафта могут быть показаны с тем условием, что исчезающее явление будет отображено фоновой заливкой, а развивающееся – штриховкой, ареалами, значками и др.) [Заруцкая, 1966]. Первичная обработка снимков выполнялась в ПО *QGIS* версии 3.28, основные операции по созданию тематического слоя угодий производились в ГИС *ArcGIS* версии 10.4.1. Итоговое оформление карт осуществлялось в среде графического редактора *Inkscape* версии 1.3.2.

Территория Белгородской области была выбрана для картографирования по нескольким причинам. Расположенный на границе лесостепной и степной зон регион обладает выгодным географическим положением для ведения сельского хозяйства и «пользуется» преимуществами такой локализации: субъект Федерации является одним из лидеров по показателям аграрного производства в стране. Сравнительно мягкий климат Белгородской области обуславливает разнообразие возделываемых здесь культур, в том числе плодовых многолетних насаждений, обрабатываемых на больших площадях. В то же время экономика региона после распада СССР была перестроена, структура сельского хозяйства, несмотря на сохранение общих объемов производства отрасли, претерпела ряд изменений – таким образом, на основе рисунка угодий прошлого и настоящего возможно составить содержательную карту эволюции земель, подчеркивающую преимущества выбранных способов картографирования. Достоинством Белгородской области в контексте задачи составления карты по спутниковым снимкам является небольшая площадь территории субъекта: чем меньше снимков требуется для полного покрытия ими площади региона, тем выше шансы найти изображения, которые отличаются по дате съемки незначительно.

Результаты и их обсуждение

Координатная привязка растровой физической карты Белгородской области, в ходе которой было получено модифицированное изображение – подложка для векторизации по ней элементов общегеографического слоя карты (гидрографии, населенных пунктов, дорожной сети), во избежание несоответствия объектов, показанных на карте и отображенных на снимках, выполнялась перед первичной обработкой сцен *Landsat* за сентябрь 1988 года и 2023 года. Данный процесс заключался в создании синтезированных изображений (каналы *NIR* и *SWIR* были добавлены как наиболее подходящие для дешифрирования растительного покрова [Schowengerdt, 2007]) и проведении их контролируемой классификации в модуле *dzetsaka QGIS*. Для выполнения обработки полученных растров классификации были выбраны инструменты группы *Spatial Analyst* программного пакета *ArcGIS* [Ивлиева, Росяйкина, 2015]: после объединения растров в мозаики угодий 2023 года и 1988 года с помощью калькулятора растра было произведено их суммирование с последующей заменой пикселей, соответствующих облакам, на пиксели земель, которые оказались под облаками в другой период времени. Возможности инструментов группы «Генерализация» позволили произвести отбор и обобщение контуров угодий (для обеспечения читаемости

площадных объектов на карте масштаба 1 : 1 000 000 предварительно было осуществлено преобразование изображения в растр с большим размером пиксела на местности). Полученные в ходе конвертации растра векторные полигоны угодий в качестве тематического слоя карты природы были добавлены в проект *Inkscape* и согласованы с элементами общегеографического содержания традиционных для карт земельных угодий (рис. 2) [Атлас сельского ..., 1974; Нольфина, 2010; Национальный Атлас ..., 2011].

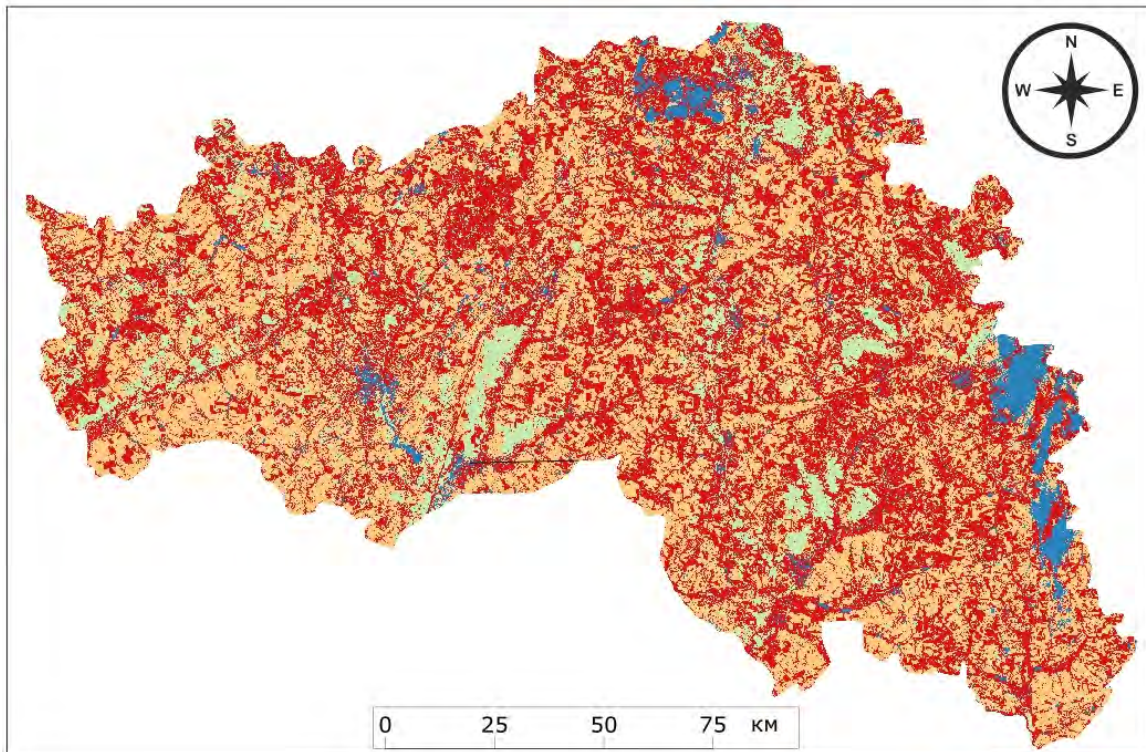


Рис. 2. Растровая мозаика угодий в 2023 году
Fig. 2. Raster mosaic of land in 2023

В ходе анализа растров, использовавшихся для составления карты природы [Artemeva et al., 2019], были получены данные для расчета некоторых абсолютных и относительных показателей, представленных впоследствии в виде картограмм и картодиаграмм на карте распределения земельных угодий. Для растров территорий муниципальных образований Белгородской области были сгенерированы таблицы атрибутов; на основе содержащихся в них значений числа пикселей каждого вида угодий [Price, 2015] были получены характеристики площади земель (в среде редактора таблиц *Excel*).

Необходимость создания карты субъекта Федерации в мелком масштабе мотивировала авторов исследования применить нетрадиционные способы обработки растра и оптимизировать использование некоторых инструментов *ArcGIS*.

Пиксеты растров классификации, соответствующие угодьям определенного типа, имели одинаковое целочисленное значение на обоих суммируемых изображениях; уникальный однозначный идентификатор был присвоен пашне, кормовым угодьям, лесам и прочим объектам местности: рекам, урбанизированным территориям, облакам. Процесс слияния проходил в несколько этапов:

- 1) значения пикселей растра земель 1988 года умножались на 10;
- 2) производилось сложение нового растра угодий прошлого и растра современных земель: по сравнению с изображениями-слагаемыми выходной растр имел вместо 4 однозначных числовых значений 16 двузначных, при этом первая цифра представляла собой идентификатор угодий прошлого, вторая – оказавшихся на их месте земель настоящего;

3) в силу практической невозможности отыскания на территорию региона нескольких снимков одного временного промежутка с отсутствующей на них облачностью и, следовательно, присутствия классифицированных облаков на мозаиках угодий, выполнялось присвоение областям, занятым облаками, значения того объекта местности, который находился на месте облаков на растре земель другого периода времени: замена значений пикселей осуществлялась с помощью условного оператора *Con*, в синтаксисе которого на первом месте после имени растра указывалось заменяемое значение пикселя, на втором – заменяющее (рис. 3). При условии наличия нескольких снимков одной территории подобный способ устранения облаков может давать более полную информацию о местности, чем использование масок облачности [Candra et al., 2016].

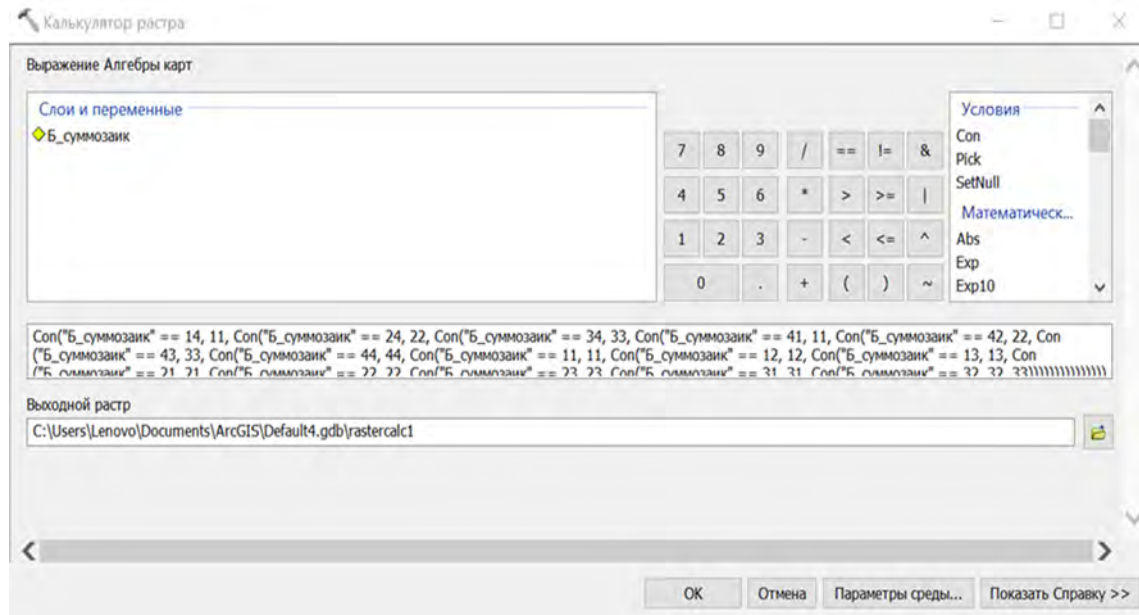


Рис. 3. Фрагмент условного выражения для замены пикселей облачности в калькуляторе растра: идентификатор облаков при классификации – 4

Fig. 3. Fragment of a conditional expression for replacing cloud pixels in the raster calculator: cloud identifier for classification – 4

Генерализация комбинированных мозаик проводилась в среде *ArcMap* по методике, изложенной в справочнике по инструментам геообработки от компании *ESRI* [Генерализация классифицированного ..., 2024]. При создании маски отсечения с помощью инструмента «Установить ноль» для определения порогового числа пикселей использовалась выведенная авторами исследования формула (1):

$$N = (M^2 \cdot s) / (1000000 \cdot L^2), \quad (1)$$

где M – знаменатель масштаба карты; s – установленная минимальная площадь объекта на карте (в мм^2); L – длина стороны пикселя на местности (в м).

По приведенной формуле было определено, что маска для Белгородской области должна состоять из областей, где будет меньше 889 пикселей.

На основе генерализованного изображения был получен векторный слой (инструменты *ArcToolbox* – Конвертация – Из растра – Растр в полигоны, упрощение полигонов выключено). Производилось преобразование нового полигонального слоя обратно в растровый вид (рис. 4) с десятикратным увеличением размера ячейки: геометрические особенности векторов угодий, полученных по первоначально генерализованному изображению, не были бы читаемы в масштабе карты. Созданный в ходе преобразования полигонального слоя растр был генерализован по использовавшемуся ранее алгоритму; при этом в маску отсечения были включены области площадью менее 3 мм^2 (33 пикселя).

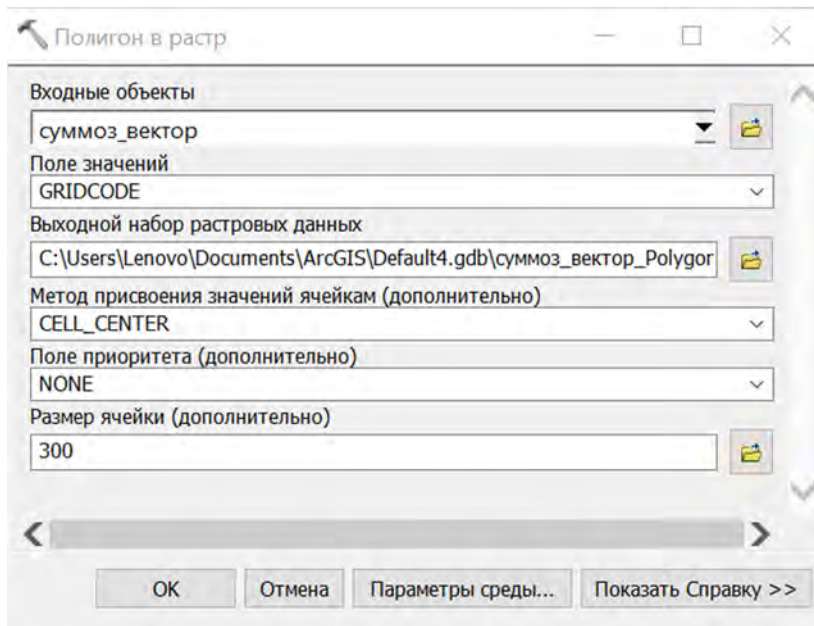


Рис. 4. Параметры окна инструмента «Полигон в растр»
Fig. 4. Parameters of the “Polygon to Raster” tool window

На снимках территории субъекта удалось посредством визуального дешифрирования определить несколько участков, занятых многолетними плодовыми насаждениями: в среде *QGIS* угоды были векторизованы по контурам. Наборы полигонов были экспортированы в файл с расширением *.svg* и в среде редактора *Inkscape* добавлены в документ карты в качестве тематического слоя. Оформление карты оканчивалось составлением легенды, в которой информация о современном и существовавшем ранее состоянии угоды, передаваемая цветом, была отображена в виде таблицы (рис. 5, 6).

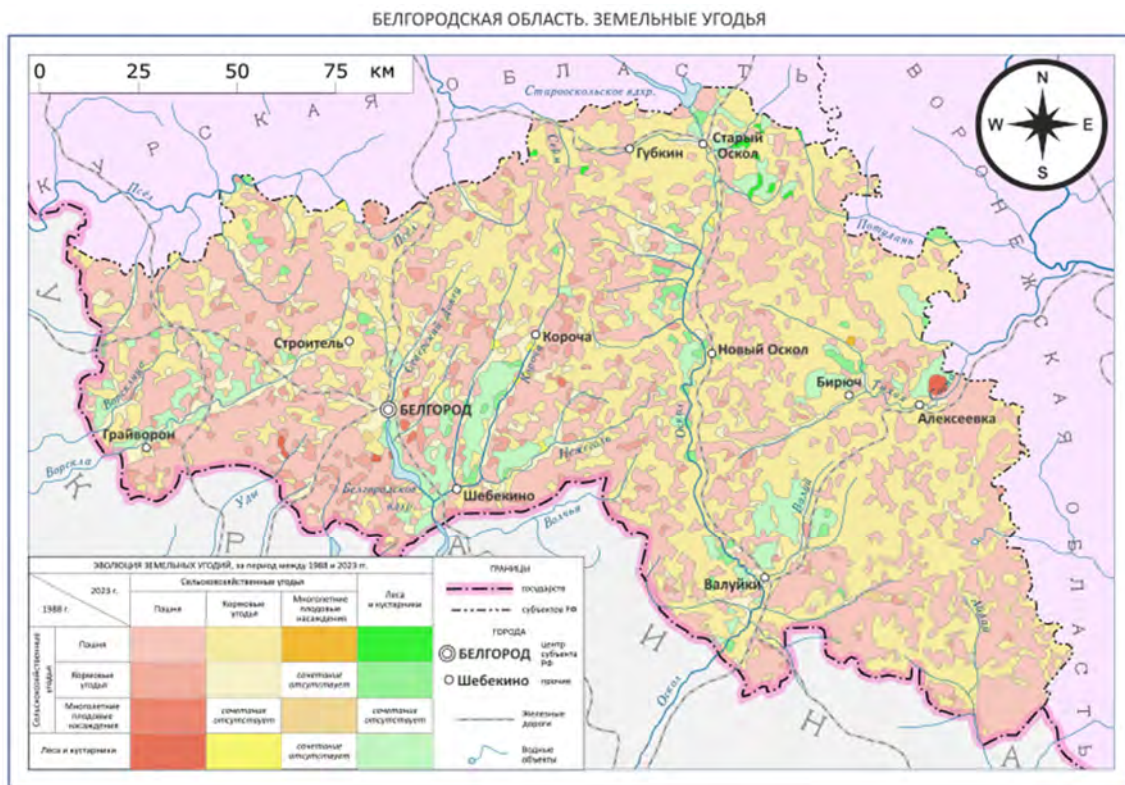


Рис. 5. Карта «Белгородская область. Земельные угоды»
Fig. 5. Map «Belgorod region. Land areas»

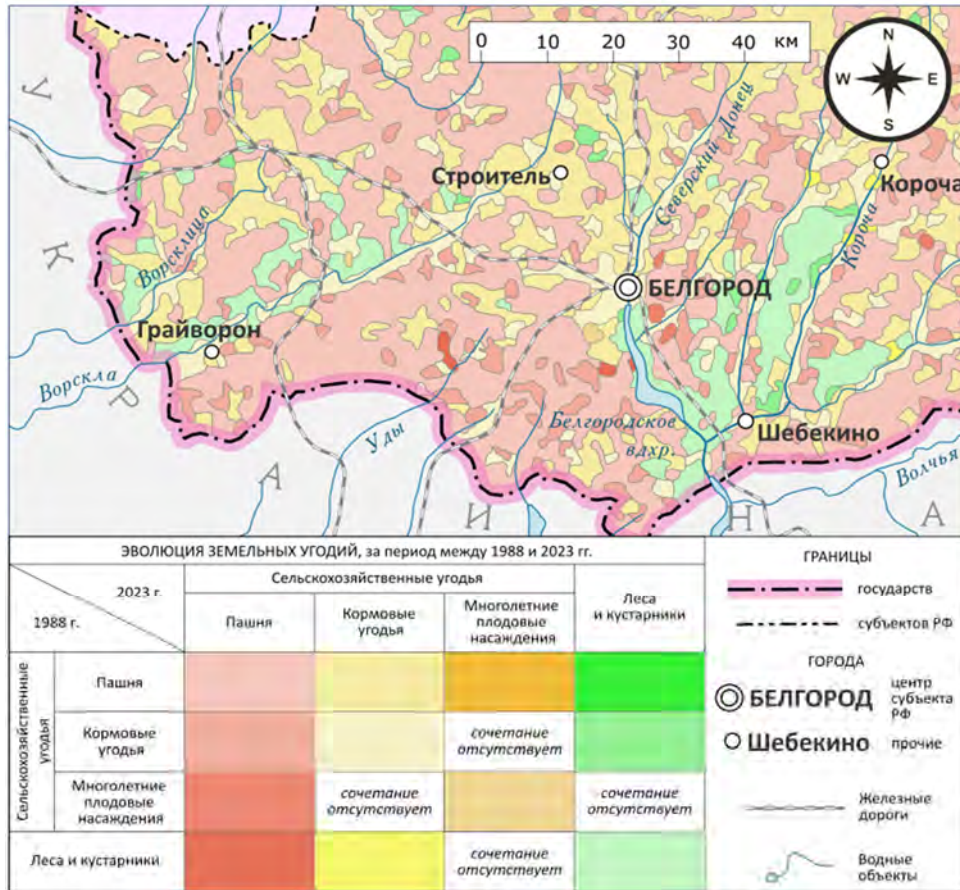


Рис. 6. Фрагмент карты «Белгородская область. Земельные угодья»
 Fig. 6. Fragment of the «Belgorod region. Land areas» map

Исходная комбинированная растровая мозаика на территорию Белгородской области была проанализирована (табл. 1) с последующим сопоставлением полученных данных с материалами статистического учета [Площади сельскохозяйственных угодий..., 2005; Сведения о наличии..., 2019] и использована для создания карты размещения земельных угодий. Абсолютное значение площади современных земель, выраженное в гектарах, было показано на картодиаграммах с помощью матрицы ячеек, построенных в соответствии с принципом «разменной монеты»: отображение больших площадей ячейками крупного размера позволило «облегчить» диаграммную фигуру и повысить читаемость карты. Показатели доли сельскохозяйственных угодий в общей площади муниципального образования, а также «физиологической» плотности населения, т. е. отношения населения территории к площади сельскохозяйственных земель в её пределах [Евтеев, 1999], были отображены на карте способом картограммы (рис. 7).

Таблица 1
 Table 1

Площадь сельскохозяйственных угодий (в том числе пашни) Белгородской области по данным различных источников, тыс. га
 Area of agricultural land (including arable land) in the Belgorod region according to various sources, thousand hectares

Площадь по материалам статистического учета сельскохозяйственных угодий		Площадь, рассчитанная в ходе анализа растра					
		пашни		сельскохозяйственных угодий		пашни	
на 1990 год	на 2019 год	на 1990 год	на 2019 год	на 1988 год	на 2023 год	на 1988 год	на 2023 год
2149,5	2133,7	1665,7	1644,7	2153,2	2140,9	1708,5	1312,9

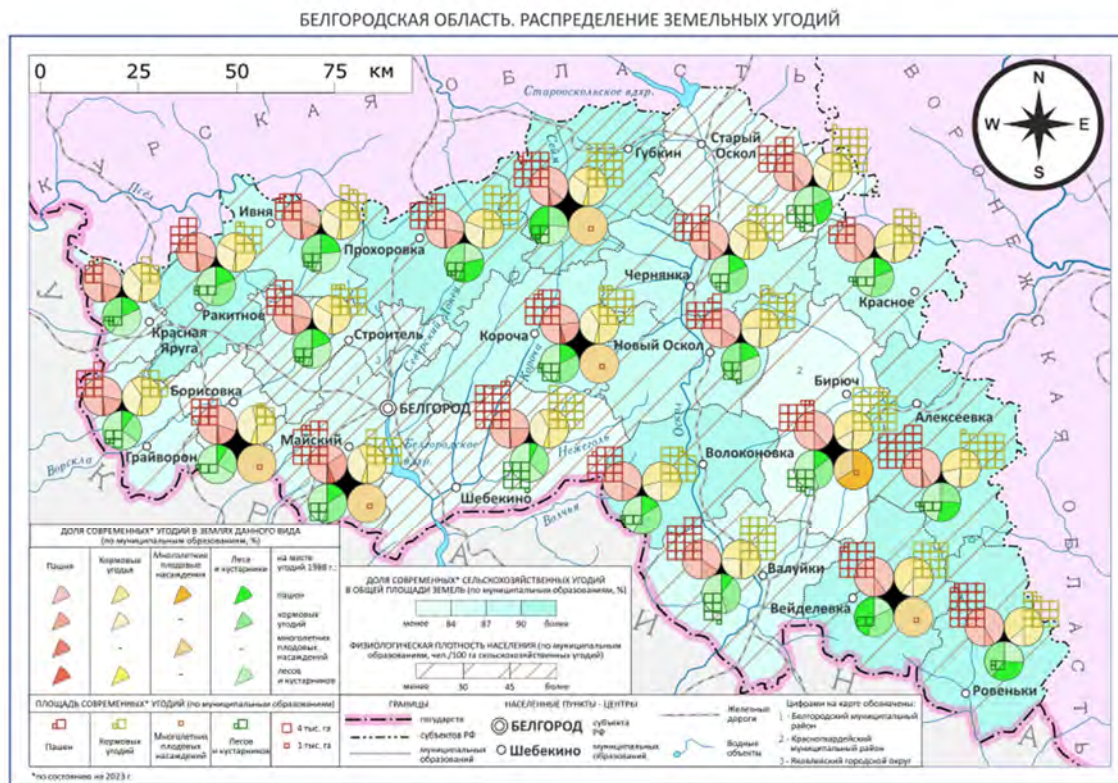


Рис. 7. Карта «Белгородская область. Распределение земельных угодий»

Fig. 7. The «Belgorod region. Land distribution» map

В соответствии с данными статистического учёта в Белгородской области в XXI в. по сравнению с XX в. наблюдалось сокращение площади сельскохозяйственных угодий в целом и отдельно – пашни. Информация, представленная на созданных картах, в целом подтверждает эту закономерность: примеров изменения статуса земель и часто их деградации (т. е. перехода пашни в кормовые угодья или леса, а также преобразования в леса кормовых угодий) больше, чем проявлений культурного освоения угодий. Существенное сокращение площади пашни, выявленное в результате анализа данных ДЗЗ и не подтверждаемое сведениями статистических источников, может быть обусловлено тем, что часть земель, имеющих статус пашни, в настоящее время не используется по назначению. С одной стороны, подобные трансформации связаны с разрушением экономики многих хозяйств в период смены государственного строя и невыходом их из кризиса по настоящее время [Пацала, Горошко, 2021; Карцева, 2010], с другой – с внедрением интенсивных методов растениеводства и, как следствие, отсутствием необходимости в прежних пашенных площадях, а также с возрастанием роли животноводства в общей структуре отрасли [Чекмарев, 2014]. Увеличение площади кормовых угодий Белгородской области, одного из ведущих сельскохозяйственных регионов страны, вероятнее всего, в первую очередь обусловлено усилением специализации в животноводстве, а не запустением пашен.

Заключение

В ходе выполнения работы были сделаны следующие выводы:

1. На сельское хозяйство государством возложена задача обеспечения населения продовольствием. Любые научные изыскания, позволяющие усовершенствовать деятельность предприятий сельскохозяйственного производства, являются актуальными. Картографирование сельскохозяйственных угодий с использованием методов дистанционного зондирования с последующим созданием визуальных моделей пред-



ставляет собой один из самых надежных и оперативных методов исследования территорий, отвечающих за продовольственную безопасность страны.

2. Использованные алгоритмы обработки растра достаточно известны в профессиональном сообществе, однако сами по себе они применимы только в задачах крупномасштабного картографирования. Для карт территорий, сопоставимых по площади с субъектом Российской Федерации, необходима иная степень обобщения площадных контуров. Такая степень генерализации достижима при увеличении размера пиксела изображения на местности; однако подобное преобразование исходного растра классификации может привести к слиянию в единое целое тех небольших по площади объектов, которые на местности разделены непреодолимым препятствием (например, рекой) и должны быть исключены, но не объединены. Вследствие этого уместно проводить генерализацию растра поэтапно, от крупно- к мелкомасштабному изображению, то есть увеличивать размер пиксела растра по мере возрастания степени обобщения.

3. Инструменты работы с растрами, существующие в географических информационных системах, позволяют получать готовый тематический слой карты без обращения в процессе его создания к операциям над векторными объектами (за редким исключением). Генерализация растра позволяет получить более точные и оперативные результаты, чем упрощение векторных примитивов.

4. В результате обработки данных дистанционного зондирования получены векторные полигоны земель, в обозначение которых заложена информация о современном и существовавшем в прошлом виде угодий, тематический слой векторных объектов объединен с набором элементов общегеографического содержания и оформлен в виде электронной карты земельных угодий Белгородской области. Способ отображения динамики процесса, при котором цвет объекта на карте несёт информацию одновременно о его современном и существовавшем в прошлом состоянии, является редким для картографии и на карте, показывающей локализацию земельных угодий, применяется впервые. Предложенная классификация до сих пор не использовалась в научных исследованиях. Основной формой компоновки для легенды карты выбрана табличная.

5. Дополнительно по материалам, используемым для карты природы Белгородской области, была составлена карта распределения угодий по муниципальным образованиям региона, на которой характеристики структуры земель были показаны способами картограммы и картодиаграммы.

6. Информация на созданных картах, коррелируя с данными некоторых статистических источников, иллюстрирует тенденцию сокращения и деградации сельскохозяйственных угодий, наблюдаемую с конца 80-х годов XX века.

7. Сведения о современном и существовавшем в прошлом состоянии угодий могут дать возможность проследить трансформацию насаждений, упростить принятие решений по эксплуатации земель фермерами и иными сельскохозяйственными предпринимателями, занимающимися освоением не используемых ранее территорий, и стать полезным инструментом для прогнозирования развития положительной и отрицательной динамики изменений объектов исследования.

8. Составленные карты, передающие информацию о точной локализации угодий разных видов, могут непосредственно применяться для решения различных экономических и производственных задач, в том числе для анализа и планирования размещения сельскохозяйственного производства.

Список источников

- Атлас «Природные ресурсы и экологическое состояние Белгородской области». Электронный ресурс. URL: <http://maps.bsuedu.ru/atlas/> (дата обращения 13.01.2024).
- Атлас сельского хозяйства Чувашской АССР. 1974. М., ГУГК, 68 с.
- Белгородская область. Большая российская энциклопедия 2004-2017. Электронный ресурс. URL:

- <https://old.bigenc.ru/geography/text/5676142> (дата обращения 02.04.2024).
- Белгородская область в цифрах. 2023: Краткий статистический сборник. Федеральная служба государственной статистики. Электронный ресурс. URL: https://31.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/0107_2023.pdf (дата обращения 14.04.2024).
- Генерализация классифицированного растрового снимка. ArcGIS Pro 3.3. Esri. Электронный ресурс. URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/generalization-of-classified-raster-imagery.htm> (дата обращения 14.02.2024).
- Евтеев О.А. 1999. Проектирование и составление социально-экономических карт. М., Издательство Московского университета, 223 с.
- Единая федеральная информационная система о землях сельскохозяйственного назначения. Электронный ресурс. URL: <https://efis.mcsx.ru> (дата обращения 13.01.2024).
- Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 N 136-ФЗ (ред. от 14.02.2024, с изм. от 11.06.2024) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.04.2024). Электронный ресурс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/ (дата обращения 11.06.2024).
- Национальный Атлас почв Российской Федерации. 2011. М., Астрель, 632 с.
- Площади сельскохозяйственных угодий и пашни, используемые землепользователями, занимающимися сельскохозяйственным производством. Федеральная служба государственной статистики. Электронный ресурс. URL: https://rosstat.gov.ru/bgd/regl/b05_14p/isswww.exe/stg/d010/11-08.htm (дата обращения 17.04.2024).
- Сведения о наличии и распределении земель. Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии. Электронный ресурс. URL: <https://rosreestr.gov.ru/activity/gosudarstvennoe-upravlenie-v-sfere-ispolzovaniya-i-okhrany-zemel/gosudarstvennyu-monitoring-zemel/sostoyanie-zemel-rossii/gosudarstvennyu-natsionalnyu-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-v-rossiyskoy-federatsii/> (дата обращения 16.04.2024).
- Шихов А.Н., Герасимов А.П., Пономарчук А.И., Перминова Е.С. 2020. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения. Пермь, Пермский государственный национальный исследовательский университет, 191 с.

Список литературы

- Заруцкая И.П. 1966. Составление специальных карт природы. М., Издательство Московского университета, 232 с.
- Ивлиева Н.Г., Росяйкина Е.А. 2015. Обработка данных дистанционного зондирования Земли в ГИС-пакете ArcGIS. Огарёв-Online, 4(45): 5.
- Карцева Л.В. 2010. История развития российского сельскохозяйственного производства от первых аграрных реформ при царизме до наших дней. Вестник Казанского государственного университета культуры и искусств, 3: 4–13.
- Нольфина М.А. 2010. О сельскохозяйственных атласах на примере их изданий 1974–1989 гг. Гео-Сибирь, 1(2): 93–95.
- Пацала С.В., Горошко Н.В. 2021. Сельское хозяйство России: глобальные позиции, структурные пропорции и тенденции развития. Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Политические, социологические и экономические науки, 6(1(19)): 96–108. <https://doi.org/10.21603/2500-3372-2021-6-1-96-108>
- Стыщенко Е.А. 2017. Возможности распознавания сельскохозяйственных угодий с использованием методики совместной автоматизированной обработки разносезонных многозональных космических изображений. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 14(5): 172–183. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-5-172-183>
- Чекмарев О.П. 2014. Развитие сельского хозяйства в России от имперских времен до наших дней: краткий обзор. Вестник Ленинградского государственного университета им. А.С. Пушкина, 6(4): 72–88.
- Artemeva O.V., Zareie S., Elhaei Y., Pozdnyakova N.A., Vasilev N.D. 2019. Using Remote Sensing Data to Create Maps of Vegetation and Relief for Natural Resource Management of a large Administrative Region. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-4/W18: 103–109. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W18-103-2019>.



- Candra D.S., Phinn S., Scarth P. 2016. Cloud and Cloud Shadow Masking Using Multi-Temporal Cloud Masking Algorithm in Tropical Environmental. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B2: 95–100. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B2-95-2016>.
- Khanal S., Fulton J. 2017. An Overview of Current and Potential Applications of Thermal Remote Sensing in Precision Agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 139: 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.001>
- Price M. 2015. Mastering ArcGIS Pro. McGraw Hill, 436 p.
- Schowengerdt R.A. 2007. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. Amsterdam, Elsevier; Burlington, Academic Press, 515 p.

References

- Zarutskaya I.P. 1966. Sostavleniye spetsialnykh kart prirody [Compilation of Special Maps of Nature]. Moscow, Publ. Moscow University, 232 p.
- Ivlieva N.G., Rosyaykina E.A. 2015. Processing of Remotely Sensed Data by Means of Arcgis-Software. Ogarev-Online, 4(45): 5 (in Russian).
- Kartseva L.V. 2010. The History of Development of Agricultural Manufacturing from the First Agricultural Reforms in Tzar Days to the Present Time. Bulletin of Kazan State University of Culture and Arts, 3: 4–13 (in Russian).
- Nolfina M.A. 2010. Agriculture Atlases by the Example of 1974-1989 Editions. Geo-Siberia, 1(2): 93–95 (in Russian).
- Patsala S.V., Goroshko N.V. 2021. Russian Agriculture: Global Positions, Structural Proportions, and Development Trends. Bulletin of Kemerovo State University. Series: Political, Sociological and Economic Sciences, 6(1(19)): 96–108 (in Russian). <https://doi.org/10.21603/2500-3372-2021-6-1-96-108>
- Stytsenko E.A. 2017. Evaluation of the Possibilities to Classify Agricultural Lands Using Multi-Seasonal Satellite Data Processing. Current Problems in Remote Sensing of the Earth From Space, 14(5): 172–183 (in Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-5-172-183>
- Chekmarev O.P. 2014. Development of Agriculture in Russia from the Imperial Times Up to Now: a Brief Review. Bulletin of Leningrad State University named after A.S. Pushkin, 6(4): 72–88 (in Russian).
- Artemeva O.V., Zareie S., Elhaei Y., Pozdnyakova N.A., Vasilev N.D. 2019. Using Remote Sensing Data to Create Maps of Vegetation and Relief for Natural Resource Management of a large Administrative Region. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-4/W18: 103–109. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W18-103-2019>.
- Candra D.S., Phinn S., Scarth P. 2016. Cloud and Cloud Shadow Masking Using Multi-Temporal Cloud Masking Algorithm in Tropical Environmental. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B2: 95–100. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B2-95-2016>.
- Khanal S., Fulton J. 2017. An Overview of Current and Potential Applications of Thermal Remote Sensing in Precision Agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 139: 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.001>
- Price M. 2015. Mastering ArcGIS Pro. McGraw Hill, 436 p.
- Schowengerdt R.A. 2007. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. Amsterdam, Elsevier; Burlington, Academic Press, 515 p.

*Поступила в редакцию 27.07.2024;
поступила после рецензирования 14.09.2024;
принята к публикации 13.10.2024*

*Received July 27, 2024;
Revised September 14, 2024;
Accepted October 13, 2024*

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

Артемьева Ольга Владимировна, кандидат географических наук, доцент кафедры картографии и геоинформатики Института наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Алифанов Никита Александрович, студент кафедры картографии и геоинформатики Института наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Olga V. Artemeva, PhD in Geography, Associate Professor of the Department of Cartography and Geoinformatics, Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Nikita A. Alifanov, Student of the Department of Cartography and Geoinformatics, Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia



УДК 711.4-163
DOI 10.52575/2712-7443-2024-48-4-578-590

Картографирование застройки города Грозного по данным дистанционного зондирования Земли

¹Сторожев А.И., ²Братков В.В.

¹Московский государственный строительный университет
Россия, 129337, г. Москва, Ярославское ш., 26
²Московский институт геодезии и картографии
Россия, 105064, г. Москва, Гороховский пер., 4
E-mail: aist.125@mail.ru, v_bratkov@miigaik.ru

Аннотация. Для лучшего использования земельных участков и объектов капитального строительства в статье поднимаются вопросы функционального зонирования территории города, создания карты, доступной не только для специалистов в области градостроения, но и для широкого круга лиц. В результате анализа данных дистанционного зондирования Земли были разработаны карты городской застройки г. Грозного с легендами, которые могут быть включены в атлас, мастер-планы и генеральные планы города. Проведен анализ изменения жилой застройки в период с 1986 по 2019 год. Разработанные карты могут быть включены в генплан г. Грозного для создания материалов по обоснованию размещения социальных, коммунальных и прочих инфраструктурных объектов, а также регулирования застройки, что в дальнейшем приведет к созданию более комфортной городской среды. Рассматривается актуальность использования материалов ДЗЗ для составления и оформления карт для генеральных планов и мастер-планов населенных пунктов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, функциональные зоны, Генплан города Грозный, оформление карт для Генерального плана, легенда карты, тематическое содержание карты

Для цитирования: Сторожев А.И., Братков В.В. 2024. Картографирование застройки города Грозного по данным дистанционного зондирования Земли. Региональные геосистемы, 48(4): 578–590. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-578-590

Compilation and Registration of Grozny Urban Development Map According to Remote Sensing Data

¹Andrey I. Storozhev, ²Vitaly V. Bratkov

¹Moscow State University of Civil Engineering
26 Yaroslavskoe highway, Moscow 129337, Russia
²Moscow Institute of Geodesy and Cartography
4 Gorokhovskiy lane, Moscow 105064, Russia
E-mail: aist.125@mail.ru, v_bratkov@miigaik.ru

Abstract. The majority of Russia's population lives in cities. The main disadvantages of the current development of cities include their uncontrolled growth, irrational use of land, and conflict between lands of different categories. Careless use of land resources can lead to major environmental problems in the future. In this regard, the development of cities and other populated areas requires constant monitoring. One of the ways to control urban development is periodic mapping of the territory. For better use of land plots and capital construction projects, the article raises issues of functional zoning of the city territory, creating a map accessible not only to specialists in urban planning, but also to a wide range of people. As a result of remote sensing data analysis, Grozny urban development maps with legends were developed, which can be included

in the atlas and master plans of the city's General plan. An analysis of changes in residential development in the period from 1986 to 2019 was carried out. The maps can be included in the General plan of the city of Grozny for the purpose of creating materials to justify the placement of social, communal and other infrastructure facilities, as well as for regulating development, which in the future will lead to the creation of a more comfortable urban environment. The authors discuss the relevance of using remote sensing data for the compilation and design of maps for General plans and Master plans of settlements.

Keywords: remote sensing, functional zones, the General plan of the city of Grozny, the design of maps for the General plan, map legend, thematic content of the map

For citation: Storozhev A.I., Bratkov V.V. 2024. Compilation and Registration of Grozny Urban Development Map According to Remote Sensing Data. *Regional Geosystems*, 48(4): 578–590. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-578-590

Введение

Основным недостатком текущего развития городов является их неконтролируемое разрастание, нерациональное использование земель, конфликт между землями различных категорий. В связи с изменением социально-экономической политики нашего государства в конце XX века развитие городов также приобрело иной вектор. Стали появляться как новые преимущества, так и новые проблемы в характере застройки. В связи с этим за развитием городов и прочих населенных пунктов необходим постоянный контроль.

Город Грозный – яркий пример быстрорастущего города России [Народное хозяйство ..., 1991; Российский статистический ..., 1995; Численность населения ..., 2022; *overpass-turbo*, 2024]. Его население непрерывно растет с 2004 года. На момент 2021 года в процентном соотношении прирост населения составил 53,7 %, что увеличивает антропогенную нагрузку на данную местность, обладающую сложным ландшафтом, а, как известно, ландшафт – один из главных факторов, влияющих на застройку [Горбунов, Табунщик, 2020].

В настоящее время разработан Генеральный план города Грозного [Об утверждении инвестиционной ..., 2014; Об утверждении Генерального ..., 2019]. Однако сейчас вся территория Грозного фактически освоена и для развития города необходимо учитывать ряд важнейших градостроительных факторов, таких как реконструкция центра, промзон, застроенных территорий, точечной застройки (с сохранением архитектурного ансамбля), развитие общественных пространств. Все это необходимо проектировать в увязке с транспортной и инженерной инфраструктурами и природного каркаса города в целом [Берлянт, 2011; Дамрин, Боженов, 2012; Прохорова, 2018]. Поэтому сейчас часто переходят от генплана к мастер-плану. И одним из этапов этого перехода является создание отраслевых схем развития транспорта, инженерной инфраструктуры, развитие природных территорий и т. д. Для этого, в первую очередь, необходим контроль городской застройки. Одним из способов контроля является периодическое картографирование территории.

Целью данной работы является составление и оформление карты городской застройки Грозного по данным дистанционного зондирования Земли.

Объекты и методы исследования

Картографирование территории производится с помощью таких программ, как *ENVI* и *QGIS*. Оформление карты и легенды к ней произведено с помощью программы *Adobe illustrator* [Верещака и др., 1990].

Сопоставляя планируемые объемы жилищного строительства и объемы предстоящих работ по восстановлению утраченного жилищного фонда и доведению жилой площади Чеченской Республики до социальных норм Российской Федерации, следует отметить, что все это возможно только при значительном увеличении темпов строительного



монтажных работ. Одним из способов контроля за городской застройкой является периодическое картографирование территории.

При составлении карты городской застройки важнейшей задачей является анализ факторов размещения населения [Салищев, 1976; Салищев, 1987; Лютый, 2002; Сваткова, 2002; Бажукова, 2017; Бажукова, 2020]. В зарубежных источниках большое внимание уделяется картографированию территории [Jalkanen et al., 2020; Aziz, Elsonbaty, 2021; Belenok et al., 2021; Pirtti, 2023].

Важно учесть плотность населения, которая в данном случае составляет 1013,9 человек на км². Расселение в границах городской застройки происходит крайне неравномерно. По естественным причинам в частном секторе города плотность населения в несколько раз меньше, чем в кварталах и микрорайонах.

Транспортные факторы могут оказывать как стимулирующие, так и ограничивающие воздействие на застройку. Так шоссе высокого класса, с одной стороны, может выступать как важная транспортная артерия, служащая для перемещения людей и грузов, с другой стороны, подобные дороги выступают также одним из главных источников шумового загрязнения территории населенных пунктов, что в свою очередь, существенно ограничивает возможности для застройки.

Среди автомобильных дорог стоит отметить дорогу Е50, которая проходит с южной стороны города и является международной, а также одной из важнейших транспортных артерий всего региона. С Грозным дорога Е50 связана главным образом через ул. Мамсурова и ул. М.Я. Узуева. Необходимо выделить улицы, которые являются главными градообразующими осями, так как именно они в наибольшей степени определяют характер развития города в дальнейшем: проспект Ахмат-Хаджи Абдулхамидовича Кадырова, Краснофлотская улица, ул. В. Алиева и ул. А. Шерипова.

В Грозном есть железнодорожное сообщение. Из особенностей необходимо отметить, что железнодорожные пути раньше проходили с востока на запад, но в наши дни западная часть железнодорожных путей демонтирована, что отразится на составляемой карте, так как демонтированный участок входит в городскую черту. В городской черте расположено 2 аэропорта: гражданский – Международный аэропорт Грозный имени Ахмата Кадырова и военный – Ханкала. Крупных портов на территории города нет.

Необходимо верно подобрать общегеографическую основу и по ней составить карту. К картам-источникам предъявляется следующий ряд требований: территория картографируемого объекта должна быть охвачена полностью, масштаб должен быть достаточно крупным для того, чтобы отобразить даже мелкие элементы карты [Салищев, 1976; Берлянт, 2011].

В данной работе использованы программа *ENVI* для дешифрирования снимков, полученных со спутника *Landsat*, архив спутниковых снимков был получен с сайта *USGS*. *ENVI* – эффективное и доступное программное решение для полного цикла обработки оптико-электронных и радарных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а также их интеграции с данными геоинформационных систем. Преимущество программы заключается в всестороннем подходе к дешифрированию и использовании разнообразных методов.

Результаты и их обсуждение

Основой для составления элементов общегеографической основы будут служить листы топографической карты масштаба 1 : 200 000. Именно такой масштаб в наибольшей степени способен удовлетворить приведенные выше требования. Территория города Грозного отображена на двух листах топографической карты – К-38-IV «Наурская» и К-38-Х «Грозный». Сведение листов при выполнении подобных работ требует особой точности, так как даже при небольшой ошибке происходит значительное смещение зон за-

стройки. Сведение листов производилось с помощью программы *QGIS*, так она обладает всем необходимым функционалом. Тип изображения ТАВ позволяет выполнить точную привязку к координатам. Для проведения работ была выбрана проекция WGS 84 / UTM zone 38N, так как она дает наименьшие искажения на картографируемую территорию.

На карте с достаточной точностью приведены гидрография и рельеф. Но для более точного составления элементов гидрографии необходимо привлечь данные ДЗЗ, так как были изменены русло реки в центральной части города и площадь водохранилища. Карты находятся в фонде кафедры географии МИИГАиК.

Для получения информации о улично-дорожной сети Грозного прибегнем к сервису *overpass-turbo* [2024], который позволяет получить информацию о застройке, дорогах, гидрографии и т. д. путем составления соответствующих запросов и выделением необходимой территории.

При описании производственных факторов, влияющих на застройку, необходимо упомянуть характер размещения подобных объектов. Земли промышленности обычно тяготеют к крупным транспортным узлам – шоссе, портам и железнодорожным вокзалам. Промышленность, как правило, занимает существенные площади застройки и редко размещается в центре городов [Яргина и др., 1986; Исаченко, 1990].

По окончании поиска объектов необходимо произвести экспорт слоев в *QGIS*. Экспорт осуществляется в формате *GeoJSON*, как наиболее подходящем для обработки. При экспорте информация о классе дорог сохраняется, что позволяет в дальнейшем разделить дороги по классам уже на составляемой карте.

Одним из преимуществ *QGIS* является возможность работы со слоями. Это позволяет взять несколько разновременных снимков одной и той же территории и провести их сравнительный анализ. В рамках статьи анализируются космоснимки Грозного на момент 1986 и 2019 годов (рис. 1). Путем их наложения можно провести сравнительный анализ застройки территорий [Панарин В.А., Панарин Р.В., 2009].

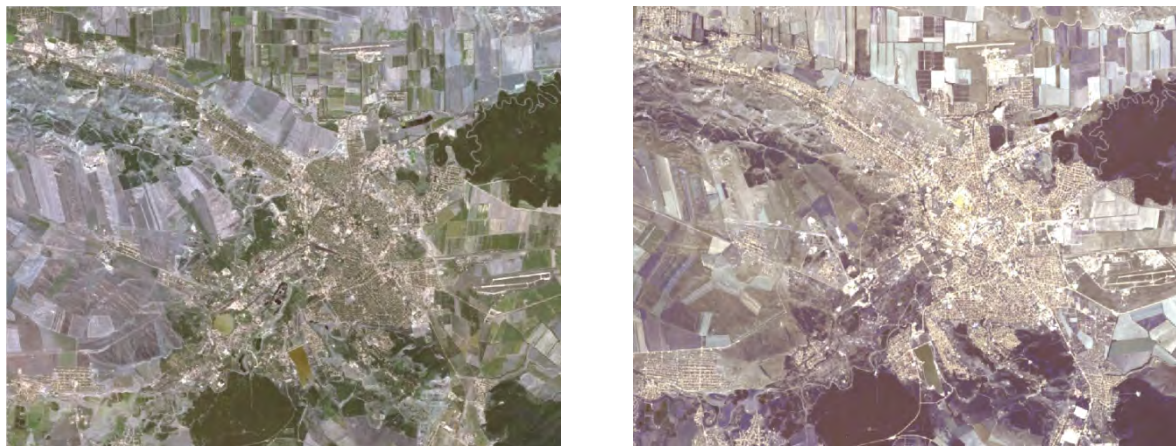


Рис. 1. Снимки города Грозного 1986 (слева) и 2019 (справа) гг.
Fig. 1. Photos from 1986 and 2019

Благодаря открытой архитектуре *ENVI* обеспечивает удобство обработки данных, полученных со спутников *Landsat*, *SPOT*, *RADARSAT*, *NASA*, *NIMA*, *NOAA*, *EROS Data Center*, *Space Imaging*, *Terra*, *ESA*, а также предусматривается включение в этот список *EartWatch* и *ORBIMAGE* и других спутников.

Привязка топографической карты масштаба 1 : 200 000 была выполнена в *QIS*. Рассматриваемая территория отображена на двух листах карты – К-38-IV Нурская и К-38-Х Грозный. Программные возможности *QGIS* позволяют с наименьшим искажением выполнить сведение листов. Это особо важная характеристика, так как даже при небольшом ис-



кажении площади и контуры объектов могут существенно измениться. Была проведена работа по привязке снимков за разные периоды – 1986 и 2019 годы. Оцифровка границ визуальным методом дешифрирования также выполнена в данной программе. Систематизация данных выполнена с помощью программы *ENVI*.

Данные, обработанные в *QGIS* были экспортированы в *Adobe illustrator* с целью окончательного оформления карты. Благодаря использованию цветовой модели *СМΥК* в программе удобно и быстро можно подобрать необходимые цвета. Возможность быстрой заливки позволяет оперативно работать с площадными объектами, а возможность создания кистей поможет создавать линейные объекты.

В результате были спроектированы две карты – основная и дополнительная. Основная карта – «Карта функциональных зон города Грозного», дополнительная – «Изменение застройки города Грозного с 1986 по 2019 год». Такое решение было принято в связи с тем, что в рамках проектирования одной карты грамотно отобразить все тематическое содержание не представляется возможным. Карты обладают единым общегеографическим содержанием и имеют одинаковый масштаб.

При составлении единой общегеографической основы для карт применялся размер листа карты – 420 × 297 мм (А3). Ориентировка – горизонтальная. Компонировка карты – плавающая, сетка – отсутствует. Масштаб составляемых карт – 1:10 000.

На картах представлены следующие элементы общегеографической основы – границы городского округа города Грозного, объекты гидрографии, выражающиеся в масштабе карты и имеющие площадной характер локализации, а именно река Сунжа, Грозненское водохранилище и Альдинский пруд. На дополнительной карте приведено деление Грозного по районам. Также для улучшения восприятия тематического изображения и возможности выявления между его элементами взаимодействий отражена транспортная сеть, а именно автомобильные и железные дороги.

На проектируемой основной карте, помимо выше приведенного общегеографического содержания, будут отображаться функциональные зоны рассматриваемого города. От показа функции каждого конкретного здания решено отказаться, так как быстрое считывание информации будет затруднено, а в некоторых случаях и вовсе невозможно. Функциональные зоны будут переданы с помощью качественного фона. При таком способе разница между объектами передается благодаря различию в цвете.

Информацию о расположении той или иной функциональной зоны решено было брать из документа «№-60 Решение ГГД об утверждении Генерального-плана» [Горбунов, 2020], размещенного на официальном сайте мэрии города Грозного. При этом были проведены актуализация карты путем сравнения спутниковых снимков с генеральным планом и уточнение функциональной принадлежности здания с помощью интернет-порталов Яндекс Карты и 2GIS.

На проектируемой карте было решено отобразить следующие функциональные зоны, разделенные по группам. Группа «жилая застройка» с разделением на малоэтажную, среднеэтажную и многоэтажную. Группа «Общественная застройка» с разделениями на такие функциональные зоны, как специализированная общественная зона и многофункциональная зона. Группа «транспортная инфраструктура» включает земли вокзалов и аэропортов. В группе «земли промышленности» представлены такие функциональные зоны, как промышленные территории и коммунально-складские территории. Группа «насаждения и озеленение» состоит из четырех функциональных зон: поля, садоводства, рекреация и озеленение. Группа кладбищ показывает деление на мусульманские и христианские кладбища. Группа «инженерные и складские территории» объединила такие функциональные зоны, как инженерная инфраструктура и земли складирования и захоронения. Последней группой является группа «режимных объектов».

Разделение на те или иные функциональные зоны имеет ряд особенностей в каждом конкретном городе. Это зависит от размеров населенного пункта, его истории, цели

составления карт и производственной структуры города. Рассмотрим более конкретно, что включает в себя каждая конкретная функциональная зона города.

Выделение зон по этажности при выполнении идентичной функции необходимо с целью обозначения самого характера застройки. Также от этажности в значительной мере зависит и плотность населения в конкретном районе, что в свою очередь влияет на антропогенную нагрузку.

Группа «транспортная инфраструктура» включает в себя зоны вокзалов и аэропортов. Важно отметить, что под землями транспортной инфраструктуры в каждом конкретном случае понимают разные вещи, это могут быть как только земли, отведенные под строительство вокзалов, портов, аэропортов и пр., так и полотно автомобильных и железных дорог, нередко также к этой категории относят и земли отчуждения вблизи железнодорожного полотна и дорог высокого класса. В нашем же случае под землями вокзалов и аэропортов подразумевается территория, выделенная данным предприятиям под нужды обслуживания соответствующей транспортной сети. Автомобильные и железные дороги в данной карте относятся к общегеографической основе.

Земли промышленности включают в себя функциональные зоны – промышленные территории и коммунально-складские территории. Промышленные территории предназначены для размещения на них производственных площадок различных предприятий. Такие зоны не пригодны для проживания людей и, более того, часто обособляются отдельными санитарными зонами, призванными минимизировать какое-либо влияние производств на жилую застройку. Промышленная зона характерна еще и тем, что оказывает наибольшее влияние на прочие территории. Тяготеет к крупным транспортным узлам. Коммунально-складская зона – территория населенного пункта, предназначенная для размещения групп и отдельных предприятий, обеспечивающих потребности населения в хранении товаров, коммунальных и бытовых услугах, с общими для них объектами инженерно-технического и административного обеспечения.

Насажение и озеленение – крайне разнообразная по функциональным зонам группа, объединенная одним признаком, а именно наличием большого количества земель, предназначенных для посадки деревьев, кустарников, сельскохозяйственных культур. Каждая функциональная зона при таком разделении имеет свой набор характерных насаждений. На территории полей, как правило, высаживаются сельскохозяйственные культуры, необходимые для удовлетворения потребностей населения, производство организовано в промышленных масштабах.

Под зоной рекреации понимают земли, отведенные под парки культуры и отдыха, дендрарии, санатории и т. д. В первую очередь подобные территории предназначены для массового отдыха граждан. В пределах зоны отдых может подразумеваться различный, будь то катание на аттракционах или же прогулка по дендрарию.

Функциональная зона озеленения предполагает все прочие озелененные участки. Дальнейшее деление приведет к перегрузке карты, при этом подробность и информативность существенно не увеличатся.

Зона кладбищ предназначена для захоронения. При проектировании карты были выделены по религиозному признаку христианские и мусульманские кладбища.

Инженерные и складские территории включают в себя зону инженерной инфраструктуры и зону складирования и захоронения. В зону инженерной инфраструктуры включаются территории, необходимые для технического обслуживания и охраны объектов, сооружений и коммуникаций зоны. В пределах зоны инженерной инфраструктуры возможно размещение комплексов производственных и коммунальных предприятий, складских баз с низкими уровнями шума и загрязнения.

Зоны складирования и захоронения предполагают обустройство специальных площадок-полигонов для сбора и дальнейшей утилизации бытовых и производственных от-



ходов. В отличие от зоны коммунально-складского предназначения отходы из зоны складирования и захоронения в дальнейшем не используются в хозяйстве.

Режимные объекты – это военные и специальные объекты, воинские части, предприятия, организации, учреждения, для функционирования которых установлены дополнительные меры безопасности. Согласно п. 3 Перечня сведений, отнесенных к государственной тайне, утвержденного Указом Президента РФ от 30.11.1995 № 1203, режимные объекты – это объекты, на которых ведутся работы с использованием сведений, составляющих государственную тайну, и для функционирования которых установлены специальные меры безопасности.

При проектировании и составлении легенды был учтен опыт составления ранее изданных карт и сделан ряд выводов. Объекты в легенде необходимо разделить на группы для улучшения читаемости и более быстрого выявления взаимосвязей между ними. Объекты одной группы необходимо оформить в похожих цветах. По возможности подобрать «традиционные» и ассоциативные цвета. Так, например, для общественных пространств на картах подобной тематики обычно выбирают сиреневые и фиолетовые цвета. Серый, коричневый и их оттенки подсознательно вызывают ассоциации с производственными и коммунально-складскими зонами. При этом необходимо учитывать, что цвета должны быть не слишком тусклыми и не слишком яркими, что при долгой работе с картой может привести к усталости глаз. При этом есть объекты, выбор цветов которых был произведен исходя из того, что на картографируемой территории они занимают сравнительно малую площадь. К ним относятся зоны объектов транспортной инфраструктуры, инженерные и складские территории.

Учитывая культурные особенности региона было принято решение разделить кладбища на 2 типа: христианские и мусульманские. В таком случае отличия передаются внутренним рисунком – чаще всего штриховкой. В нашем случае отличия переданы благодаря геометрическим значкам, расположенным в шахматном порядке. Для христианских кладбищ геометрический значок – крест, для мусульманских – месяц. Размеру обоих значков следует уделить особое внимание, так как знак кладбища по своей структуре имеет сложную геометрию, то необходимо, с одной стороны, подобрать хорошо различимый и понятный знак, с другой стороны, при слишком крупном отображении теряется структура изображения и различия перестают быть считываемыми.

Отображение автомобильных дорог было принято разделить на три группы – главные, основные и прочие. Это сделано с целью лучше продемонстрировать взаимосвязь и выявить логические цепочки во взаимодействии отображаемых на карте объектов. Так, можно заметить, что зоны многоэтажной жилой застройки тяготеют к главным и основным автодорогам, в свою очередь малоэтажная застройка обслуживается автодорогами более низкого класса, но густота путей там значительно больше.

Цель составления дополнительной карты – показать динамику городской застройки города Грозного. Сравнивается городская застройка 1986 и 2019 гг. Если основная карта призвана познакомить пользователя с главными особенностями размещения застройки в городе путем отображения соответствующих функциональных зон, то дополнительная своим содержанием призвана показать вектор развития застройки.

При этом стоит особое внимание уделить грамотному распределению тематического содержания. Из анализа изданных карт можно сделать вывод, что карты подобной тематики сильно перегружены. Стоит учитывать, что недостаток в тематическом содержании также является ошибкой, ведь он делает составленное картографическое произведение бесполезным. На составляемых картах тематическое содержание подобрано так, чтобы их по необходимости можно было рассматривать и по отдельности.

Как уже было сказано выше, общегеографическое содержание для обеих карт единое. В легенде дополнительной карты объекты общегеографического содержания также приводятся с целью возможности рассматривать карты по отдельности.

На карте будут представлены территории, которые подлежали застройке в рассматриваемый период, цифрами обозначена площадь, которую занимает каждая территория. Также, помимо границ города, показывается административное деление по районам города. Районы подписаны по состоянию на 2019 год.

Выявление территорий, подлежащих застройке, производилось путем сравнения двух снимков города, сделанных в разное время (рис. 2).



1986 год



2019 год

Рис. 2. Выявление подлежащих застройке территорий
Fig. 2. Identification of areas for development

По характерной зернистой структуре города легко отличить застроенную территорию. При этом стоит учитывать, что выделение отдельных зданий часто бывает невозможно. Программа *QGIS*, в которой происходит обработка изображений, позволяет точно привязывать спутниковые снимки по координатам. Соответственно, выделенная на карте площадь будет точно совпадать реальными размерами. Таким образом можно получить информацию о площади, занятой той или иной застройкой (рис. 3).

На дополнительной карте (рис. 4) информация об отношении выделенного участка к той или иной функциональной зоне не представлена, так как информацию об этом легко можно получить путем сравнения двух карт.

Для улучшения восприятия информации о новой застройке на дополнительной карте решено показать две круговые диаграммы – «Распределение новой застройки по функциональным зонам км²» и «Распределение новой застройки по районам км²». На основной карте расположен график численности населения по годам. Эти диаграммы помогут пользователю карт лучше понять ситуацию, которая сложилась с распределением и типом застройки.

Необходимо отметить, что в существующем Генеральном плане города Грозного от 2019 года уже имеется карта функционального зонирования, однако она сложна для быстрого считывания и понимания информации. Благодаря проектируемым картам (Рис. 3, 4) при их сопоставлении появилась возможность проследить динамику изменения площади застройки города для улучшения регулирования процесса застройки территории. Изменение цветовой гаммы и разделение легенды на группы позволило сделать работу с картой более комфортной для зрения. Дополнительный график «Численность населения по годам» и диаграммы «Распределение новой застройки по функциональным зонам» и «Распределение новой застройки по районам» помогут получить больше информации от проектируемых карт.

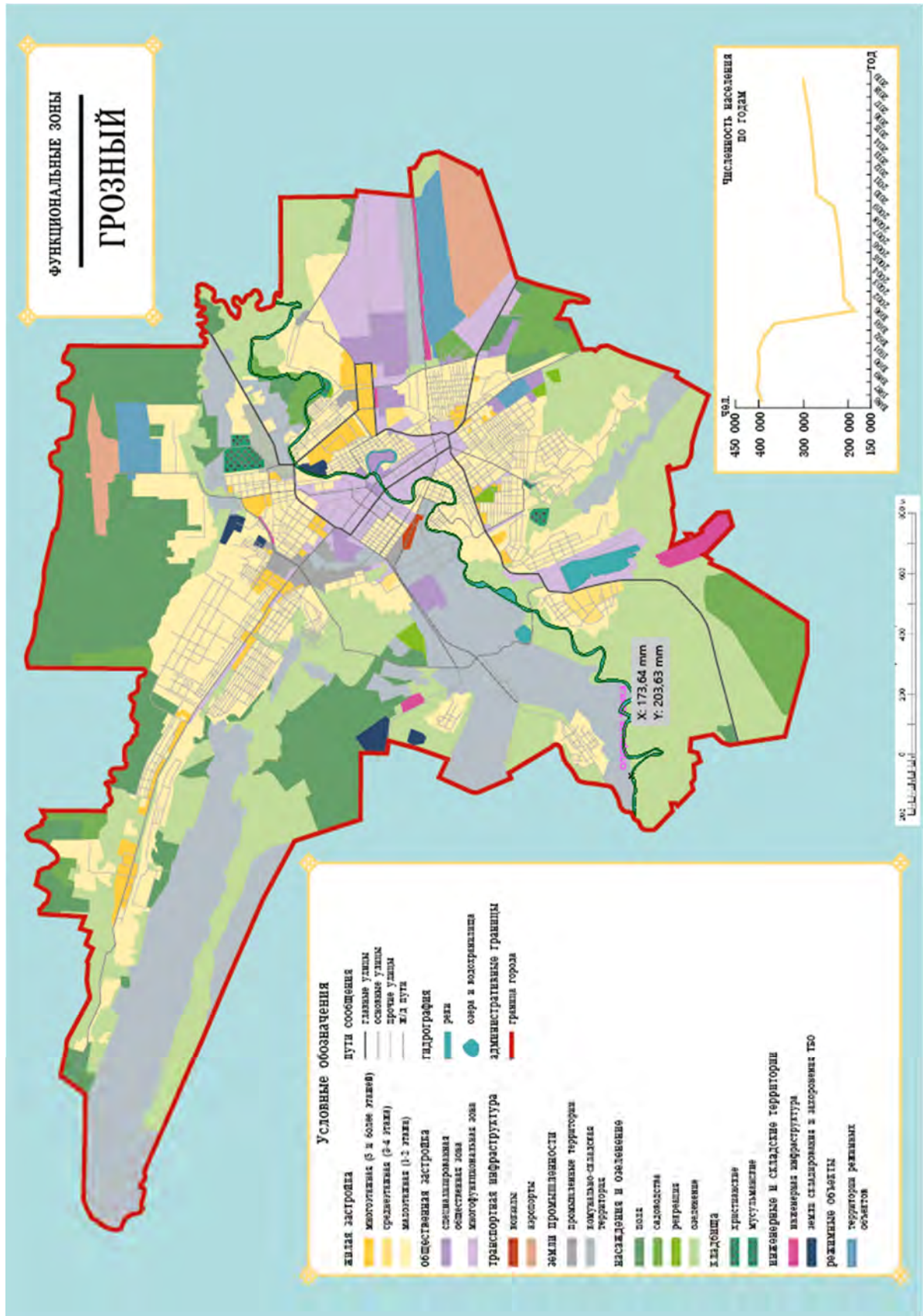


Рис. 3. Итоговая карта зонирования города Грозного
 Fig. 3. The final zoning map of the city of Grozny

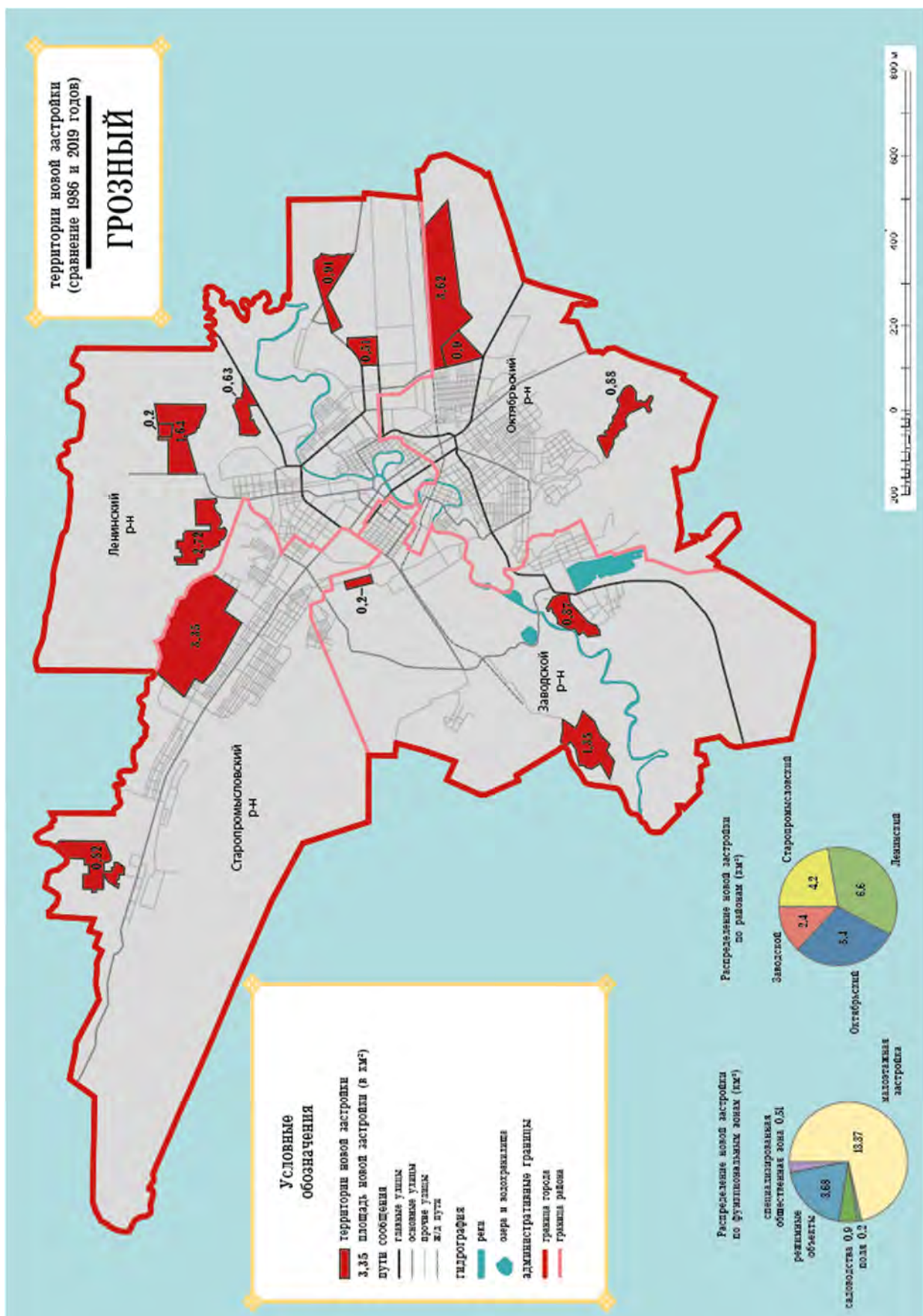


Рис. 4. Карта изменений площади городской застройки города Грозного
 Fig. 4. Map of changes in the area of Grozny urban development



Цвета диаграммы «Распределение новой застройки по функциональным зонам км²» решено было выбрать в точном соответствии с теми цветами, которые обозначают данную функциональную зону на основной карте с целью повышения скорости считывания информации. Однако подписи также приведены рядом с каждой соответствующей долей, ведь, как уже было сказано выше, дополнительная карта при необходимости может восприниматься отдельно от основной. Также в диаграмме числами обозначены площади, которые занимает тот или иной тип функциональной зоны. Из-за разных значений невозможно отобразить все числа внутри самой диаграммы, в связи с этим, некоторые значения подписаны у названия функциональной зоны.

Заключение

В результате проведенного анализа ранее изданных карт рассмотренной тематики, выявлены закономерности и недостатки их разработки. На основе разновременных данных дистанционного зондирования определены изменения селитебной территории города. В итоге была разработана методика составления тематических карт с применением данных ДЗЗ. Дано детальное описание алгоритма построения графических материалов, который в дальнейшем можно использовать в различных проектах, в том числе при разработке мастер-плана. Данная методика позволит существенно упростить проведение подобных работ на других объектах исследования.

На основе разработанной методики построены две карты на тему анализа городской застройки – «Функциональные зоны города Грозного» и «Территории новой застройки». Карты могут как дополнять друг друга, так и выступать самостоятельным картографическим произведением. Составленные карты могут использоваться в дальнейшем для анализа городской застройки и направления развития Грозного. На примере составленных двух карт было продемонстрировано, каким именно способом можно избежать недочетов и сделать карты более читаемыми и понятными широкому кругу лиц.

Список источников

- Бажукова Н.В. 2017. Картография. Надписи на географической карте и шрифтовое оформление карт. Пермь, Пермский государственный национальный исследовательский университет, 62 с.
- Бажукова Н.В. 2020. Картография. Пермь, Пермский государственный национальный исследовательский университет, 310 с.
- Берлянт А.М. 2011. Картография. М., Книжный дом Университет, 447 с.
- Дамрин А.Г., Боженков С.Н. 2012. Картография. Оренбург, Оренбургский государственный университет, 132 с.
- Народное хозяйство СССР в 1990 г.: Статистический ежегодник. 1991. М., Госкомстат СССР. 752 с.
- Прохорова Е.А. 2018. Социально-экономические карты. М., «КДУ», «Добросвет», 119 с.
- Об утверждении инвестиционной стратегии развития муниципального образования города Грозный до 2025 года: Решение Депутатов города Грозный № 73 от 25.12.2014. Электронный ресурс. URL: <https://docs.cntd.ru/document/444998867> (дата обращения 12.04.2023)
- Об утверждении Генерального плана города Грозного в новой редакции: Решение Грозненской Городской Думы № 60 от 25.12.2019. Электронный ресурс. URL: <https://docs.cntd.ru/document/561747094> (дата обращения 12.04.2023)
- Российский статистический ежегодник. 1994: Статистический сборник. 1995. М., Госкомстат России, 1200 с.
- Салищев К.А. 1976. Картоведение. М., Изд-во МГУ, 438 с.
- Салищев К.А. 1987. Проектирование и составление карт. М., Изд-во МГУ, 240 с.
- Сваткова Т.Г. 2002. Атласная картография. М., Аспект-Пресс, 204 с.

- Численность населения Российской Федерации по полу и возрасту. На 1 января 2022 года. Статистический бюллетень. 2022. Электронный ресурс. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Bul_chislen_nasel-pv_01-01-2022.pdf (дата обращения 12.04.2023).
- Яргина З.Н., Косицкий Я.В., Владимиров В.В., Гутнов А.Э., Микулина Е.М., Сосновский В.А. 1986. Основы теории градостроительства. М., Стройиздат, 326 с.
- Overpass-Turbo. Electronic resource. URL: <https://overpass-turbo.eu/> (access date 03.05.2023).

Список литературы

- Верещака Т.В., Зверев А.Т., Сладкопечев С.А., Судакова С.С. 1990. Визуальные методы дешифрирования. М., Недра, 341 с.
- Горбунов Р.В., Табунщик В.А. 2020. О выделении городских ландшафтов. Геополитика и экогеодинамика регионов, 6(16(2)): 97–126.
- Исаченко А.Г. 1990. Основы ландшафтоведения и физико-географическое районирование. М., Наука, 330 с.
- Лютый А.А. 2002. Язык карты: сущность, система, функции. М., ГЕОС, 327 с.
- Панарин В.А., Панарин Р.В. 2009. Применение космических снимков в муниципальном управлении урбанизированных территорий для задач территориального планирования. Геоматика, 3: 40–55.
- Aziz K.M.A., Elsonbaty L. 2021. Effect of Using Different Satellite Ephemerides on GPS PPP and Post Processing Techniques. *Geodesy and Cartography*, 47(3): 104–110. <https://doi.org/10.3846/gac.2021.13762>.
- Belenok V., Velikodsky Y., Nikolaienko O., Rul N., Kryachok S., Malik T. 2021. Comparative Analysis for Methods of Building Digital Elevation Models from Topographic Maps Using Geoinformation Technologies. *Geodesy and Cartography*, 47(4): 191–199. <https://doi.org/10.3846/gac.2021.13208>.
- Jalkanen J., Toivonen T., Moilanen A. 2020. Identification of Ecological Networks for Land-Use Planning with Conservation Prioritization. *Landscape Ecology*, 35: 353–371 <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00950-4>
- Pirtti A. 2023. Testing the Contribution, Accuracy and Performance of MGEX (GNSS (GPS+ GLONASS+ GALILEO+ BEIDOU+ QZSS)) Positioning in the Study Region. *Geodesy and Cartography*, 49(4): 222–232. <https://doi.org/10.3846/gac.2023.17707>

References

- Vereshchaka T.V., Zverev A.T., Sladkopevtsev S.A., Sudakova S.S. 1990. *Vizualnyye metody deshifirovaniya* [Visual Methods of Decoding]. Moscow, Publ. Nedra, 341 p.
- Gorbunov R.V., Tabunshchik V.A. About Allocation of Urban Landscapes. *Geopolitics and Ecogeodynamics of regions*, 6(16(2)): 97–126 (in Russian).
- Isachenko A.G. 1990. *Osnovy landshaftovedeniya i fiziko-geograficheskoye rayonirovaniye* [Fundamentals of Landscape Science and Physical-Geographical Zoning]. Moscow, Publ. Nauka, 330 p.
- Lyuty A.A. 2002. *Yazyk karty: sushchnost, sistema, funktsii* [Map Language: Essence, System, Functions]. Moscow, Publ. GEOS, 327 p.
- Panarin V.A., Panarin R.V. 2009. Space Imagery Application in Municipal Management of Urban Areas for the Purpose of Regional Planning. *Geomatica*, 3: 40–55 (in Russian).
- Aziz K.M.A., Elsonbaty L. 2021. Effect of Using Different Satellite Ephemerides on GPS PPP and Post Processing Techniques. *Geodesy and Cartography*, 47(3): 104–110. <https://doi.org/10.3846/gac.2021.13762>.
- Belenok V., Velikodsky Y., Nikolaienko O., Rul N., Kryachok S., Malik T. 2021. Comparative Analysis for Methods of Building Digital Elevation Models from Topographic Maps Using Geoinformation Technologies. *Geodesy and Cartography*, 47(4): 191–199. <https://doi.org/10.3846/gac.2021.13208>.



- Jalkanen J., Toivonen T., Moilanen A. 2020. Identification of Ecological Networks for Land-Use Planning with Conservation Prioritization. *Landscape Ecology*, 35: 353–371 <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00950-4>
- Pirtti A. 2023. Testing the Contribution, Accuracy and Performance of MGEX (GNSS (GPS+ GLONASS+ GALILEO+ BEIDOU+ QZSS)) Positioning in the Study Region. *Geodesy and Cartography*, 49(4): 222–232. <https://doi.org/10.3846/gac.2023.17707>

*Поступила в редакцию 15.09.2024;
поступила после рецензирования 06.10.2024;
принята к публикации 08.12.2024*

*Received September 15, 2024;
Revised October 06, 2024;
Accepted December 08, 2024*

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

Сторожев Андрей Игоревич, магистрант, Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

Братков Виталий Викторович, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой географии, Московский институт геодезии и картографии, г. Москва, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey I. Storozhev, Master's Student, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

Vitaly V. Bratkov, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of the Department of Geography, Moscow Institute of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia



УДК 502.5

DOI 10.52575/2712-7443-2024-48-4-591-603

Особенности формирования экологического каркаса городского округа Балашиха Московской области

¹Подрубный Д.Г., ²Кулаков А.П.

¹Государственный университет по землеустройству,
Россия, 105064, Москва, ул. Казакова, 15

²Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Россия, 101000, Москва, Уланский пер., 13, стр. 2

E-mail: dmitrypodrubny@gmail.com, bomberos@inbox.ru

Аннотация. Целью исследования является выделение экологического каркаса городского округа Балашиха Московской области, его ключевых элементов, а также выявление геоэкологических особенностей его формирования на современном этапе. Материалами исследования послужили исследования зеленой инфраструктуры городского округа Балашиха с 2021 по 2023 год, генеральный план городского округа Балашиха, актуальные данные дистанционного зондирования Земли. Используются методы и подходы балльно-рейтинговой системы оценки, базовые картографические методы. В результате исследования проведена оценка геоэкологических условий формирования экологического каркаса и выявлено состояние ключевых элементов экологического каркаса городского округа Балашиха. Составлена карта-схема, отражающая ключевые элементы экологического каркаса и его геоэкологическое состояние. Выявлено, что ключевые элементы экологического каркаса городского округа Балашиха преимущественно находятся в напряженных геоэкологических условиях. Среди ключевых элементов, на которые оказывается наибольшее негативное воздействие, выделяются природно-рекреационные зоны рек Пехорка и Черная. Данные коридоры неустойчивы вследствие строительных и благоустроительных работ. Экологические ядра каркаса находятся под угрозой фрагментации, для их защиты необходимо создавать сеть особо охраняемых природных территорий (ООПТ) регионального и местного значения. В сельской местности площадь природно-рекреационных зон сокращается по причине новой дачной и коттеджной застройки. В ряде многонаселенных микрорайонов существует необходимость в проектировании новых озелененных зон, так как на локальные экологические коридоры и клинья, занятые парковыми зонами, оказывается высокая рекреационная нагрузка.

Ключевые слова: экологический каркас, зеленая инфраструктура, антропогенная нагрузка, геоэкологическая оценка, Московская область, Балашиха, Железнодорожный

Для цитирования: Подрубный Д.Г., Кулаков А.П. 2024. Особенности формирования экологического каркаса городского округа Балашиха Московской области. Региональные геосистемы, 48(4): 591–603. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-591-603

Features of the Ecological Framework Formation in Balashikha Urban District, Moscow Oblast

¹Dmitry G. Podrubny, ²Artem P. Kulakov

¹State University of Land Use Planning
15 Kazakov St, Moscow 105064, Russia

²Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS
13 Ulansky lane, building 2, Moscow 101000, Russia

E-mail: dmitrypodrubny@gmail.com, bomberos@inbox.ru

Abstract. The purpose of the study is to identify the ecological framework of Balashikha urban district in Moscow Oblast, its key elements, and the geoecological features of its formation at the present stage.



The research materials were studies of Balashikha's green infrastructure from 2021 to 2023, the master plan of Balashikha urban district, and current data from remote sensing of the Earth. The methods and approaches of point-rating assessment system, and basic cartographic methods were used. As the result of the study, the geoeological conditions of the ecological framework formation in Balashikha urban district were assessed, the state of its key elements was revealed, and a schematic map reflecting these findings was constructed. It was found that the key elements of the ecological framework of Balashikha urban district are mainly located in "tense" geoeological conditions. Natural and recreational areas of the Pekhorka and Chernaya Rivers are among the key elements that have the greatest negative impact. These corridors are unsustainable due to construction and improvement works. The ecological cores of the framework are under the threat of fragmentation. To protect them, a network of specially protected natural areas (SPNA) of regional and local significance is necessary. In rural areas, the amount of natural and recreational areas is decreasing due to new dacha and cottage development. As local ecological corridors and wedges occupied by park areas are under a high recreational load, there is a need to design new green areas in a number of densely populated microdistricts.

Keywords: ecological framework, green infrastructure, anthropogenic load, geoeological assessment, Moscow Oblast, Balashikha, Zheleznodorozhny

For citation: Podrubny D.G., Kulakov A.P. 2024. Features of the Ecological Framework Formation in Balashikha Urban District, Moscow Oblast. *Regional geosystems*, 48(4): 591–603. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-591-603

Введение

Постоянный рост городов и изменения административных границ вносят коррективы в разработанные природоохранные планы и ведут к нарушенному управлению экологическим каркасом (ЭК). Под экологическим каркасом понимается вся территориальная совокупность геосистем (естественного и искусственного происхождения), выполняющая специфические функции по поддержанию экологического равновесия в городе, районе, регионе [Пономарев и др., 2012].

Отечественное понятие экологического каркаса конкурирует с зеленой инфраструктурой (ЗИ), относительно новым понятием, вошедшим в практику пространственного планирования с начала 1990-х гг. [Климанова и др., 2016]. Под зеленой инфраструктурой подразумевается совокупность незастроенных элементов городского пространства, для которых характерна многофункциональность, связность и иерархичность [Илларионова, Климанова, 2018]. Схожая концепция сине-зеленой инфраструктуры (СЗИ) учитывает как озелененные, так и водные элементы городской среды [Ghofrani et al., 2017; O'Donnell et al., 2021]. Концепция зеленой инфраструктуры получила распространение за рубежом и утверждена на международном уровне [Климанова и др., 2016]. Отмечается, что ЗИ имеет перед ЭК ряд преимуществ (намного шире по объему включаемых элементов и целей, более «гибкое» в инфраструктурных решениях и др.) [Benedict, McMahon, 2002; Климанова и др., 2018; Winslow, 2021; Подрубный, Широкова, 2022]. Так или иначе, в отечественной практике допустимо использование обеих концепций [Климанова и др., 2018; 2020].

Балашиха – городской округ, располагающийся в Московской агломерации к востоку от границ города Москвы, с численностью населения более 500 тысяч человек. Местоположение исследуемой территории показано на рис. 1.

Территория городского округа характеризуется нестабильной экологической обстановкой [Подрубный, Широкова, 2022]. Современные границы городского округа приобрели относительно недавно, в 2015 году, в результате объединения с г.о. Железнодорожный. В данный момент территории объединенных городов не связаны жилой и производственной инфраструктурой, а по причине охраны лесопаркового пояса такая связь не представляется возможной.



Рис. 1. Местоположение городского округа Балашиха на карте Московской области
Fig. 1. Location of Balashikha urban district on the map of Moscow Oblast

Объекты и методы исследования

Работа базировалась на методах и подходах балльно-рейтинговой оценки, а также на последних разработках в области экологического каркаса и зеленой инфраструктуры [Пономарев и др., 2012; Климанова и др., 2016; 2018; 2020; Илларионова, Климанова, 2018]. В работе использованы следующие материалы: исследования зеленой инфраструктуры г.о. Балашиха с 2021 по 2023 год [Подрубный, Корнев, 2022а, б; Подрубный, Широкова, 2022]; картографические данные генерального плана г.о. Балашиха, космические снимки *Sentinel-2*, *Landsat*, *MSS 1–5*; картографические онлайн-сервисы *OpenStreetMap*, Яндекс Карты и др.

На первом этапе исследования выделяются объекты зеленой инфраструктуры исследуемой территории. Далее среди объектов зеленой инфраструктуры выделяются ключевые части экологического каркаса по их типологическим признакам [Климанова и др., 2020].

На втором этапе выделенным элементам экологического каркаса дается оценка по ряду индикаторов (каждый индикатор переводится в балльно-рейтинговую шкалу от 1 до 3 баллов по росту предполагаемых негативных экологических условий):

– антропогенная преобразованность ландшафтов по данным визуального дешифрирования космических снимков, в том числе обработки вегетационных индексов *NDVI*,



NDWI, *NDBI*, полевых наблюдений, оценки по методике А. Machado [2004]; балльно-рейтинговая оценка от 1 до 3 баллов (доля от площади объекта ЗИ/СЗИ: 40–59 % – 1 балл; 60–79 % – 2 балла; 80–100 % – 3 балла) [Подрубный, Широкова, 2022];

– площадь экологически неэффективных насаждений по данным визуального дешифрирования космических снимков, оценки соотношения выбросов в атмосферный воздух и пылеулавливающих способностей лесных пород [Подрубный, Широкова, 2022]; балльно-рейтинговая оценка от 1 до 3 баллов (доля от площади объекта ЗИ/СЗИ: 0–24 % – 0 баллов; 25–49 % – 1 балл; 50–74 % – 2 балла; 75–100 % – 3 балла);

– состояние коридоров биоразнообразия, проходящих из ЗИ/СЗИ в городскую среду через незастроенные или частично застроенные открытые пространства [Penteado, 2021; Подрубный, Корнев, 2022а; Подрубный, Широкова, 2022]; экспертная оценка (сохранность коридоров – 0 баллов; как минимум один коридор утрачен при сохранении альтернативного варианта – 1 балл; как минимум один коридор утрачен, но может быть восстановлен – 2 балла; отсутствие коридоров – 3 балла);

– трансформация объекта ЗИ/СЗИ по результатам ретроспективного анализа данных дистанционного зондирования Земли (начиная с 1972 года) [Подрубный, Корнев, 2022а]; экспертная оценка (доля от площади объекта ЗИ/СЗИ: 0 %, не трансформирован – 0 баллов; 1–14 %, трансформирован незначительно – 1 балл; 15–29 %, трансформирован достаточно – 2 балла; 30–90 %, трансформирован значительно – 3 балла);

– потенциальная рекреационная нагрузка по данным близости объектов ЗИ/СЗИ к жилой городской застройке [De Sousa Silva et al., 2018; Подрубный, Широкова, 2022], экспертная оценка (доля от 300-метровой буферной зоны объекта ЗИ/СЗИ: 0 %, не граничит – 0 баллов; 1–49 %, граничит частично – 1 балл; 50–94 %, граничит преимущественно – 2 балла; 95–100 %, граничит полностью – 3 балла).

Суммарное количество баллов, отражающее состояние ключевых элементов экологического каркаса, оценивается от 0 до наивысшего балла, выявленного на исследуемой территории, по 5-балльной шкале геоэкологических условий: благоприятные, удовлетворительные, напряженные, очень напряженные, критические.

На третьем этапе создается карта-схема экологического каркаса территории, в том числе в соответствии с международным опытом городских планов Великобритании, США и Германии [Mell, 2009; Mejía et al., 2015; Zhang et al., 2018; Jerome et al., 2019].

Результаты и их обсуждение

На исследуемой территории выделено 74 объекта зеленой инфраструктуры. К синезеленой инфраструктуре отнесены те объекты зеленой инфраструктуры, которые так или иначе взаимодействуют с поверхностными водными объектами (в основном долины рек и ручьев, береговые зоны водоемов антропогенного происхождения). В ходе полевых наблюдений авторами непосредственно исследованы 43 объекта зеленой инфраструктуры.

В результате анализа сосредоточения и площадных показателей объектов ЗИ и СЗИ по типологическим признакам выделены следующие ключевые элементы экологического каркаса г.о. Балашиха [Климанова и др., 2020]:

– экологические ядра 1 ранга; выделены по признакам: крупный объект ЗИ относительно площади рассматриваемой территории (более 5 км²), кварталы условно-коренных лесов различного состава с преобладанием или достаточной площадью хвойных пород, обширные поймы; выполняют средообразующую и средостабилизирующую функции, характерные базовому резервату [Тасенко и др., 2023];

– экологические ядра 2 ранга; выделены по признакам: менее крупный объект ЗИ относительно площади рассматриваемой территории (более 0,3 км²), кварталы условно-коренных лесов различного состава с преобладанием, достаточной или менее достаточной

площадью хвойных пород, обширные поймы; выполняют меньшую, но тем не менее ключевую роль в формировании экологического каркаса;

– экологические коридоры 1 ранга; выделены по признакам: отрезки речных долин с неширокими поймами и фрагментами террас с естественной растительностью, ответвления экологических ядер (как правило, также расположены в долинных комплексах); выполняют средообразующую и средостабилизирующую функции, функцию соединения экологических ядер и других ключевых элементов экологического каркаса;

– экологические коридоры 2 ранга; выделены по признакам: отрезки речных долин с неширокими поймами и фрагментами террас с естественной растительностью, ответвления экологических ядер (как правило, также расположены в долинных комплексах), расположенные на периферии исследуемой территории; выполняют меньшую ключевую роль в формировании экологического каркаса;

– экологические коридоры 3 ранга; выделены по признакам: в основном отрезки ложбинно-лощинной сети с некоторым озеленением, иногда с сохранившимися водотоками, а также другие небольшие территории (рощи, озелененные фрагменты полосной формы – буферные зоны и др.), уходящие вглубь городской среды; выполняют средообразующую и средостабилизирующую функции локального значения (например, поддержание биоразнообразия);

– зеленая инфраструктура менее значимая для формирования экологического каркаса; выделена по признакам: биогруппы различного породного состава или слабоозелененные, лишенные растительности открытые пространства в окружении городской среды, как правило, блокированные ею; соответственно имеют наименьший состав экологических функций.

Итого, выделено 56 объектов зеленой и сине-зеленой инфраструктуры г.о. Балашиха, выполняющих ту или иную ключевую роль в формировании экологического каркаса. 18 объектов исключены по причине их малой ценности в силу следующих показателей: неспособность к формированию экологических коридоров и клиньев; отсутствие лесного покрова или его малый процент (менее 15 % от площади объекта). В целом для рассматриваемого экологического каркаса характерны признаки периферийного типа с крупными элементами, а также многими экологическими коридорами и клиньями локального значения.

Результаты балльно-рейтинговой оценки ключевых элементов экологического каркаса показаны в таблице.

В границах экологических ядер рассмотрены участки, выполняющие функцию коридора или большого клина. Также отдельно не оценивались небольшие клинья, отходящие от ключевых элементов экологического каркаса.

Градация геоэкологических условий ключевых элементов экологического каркаса составила значения от 0 до 14 баллов:

- 0–2,7 (благоприятные);
- 2,8–5,5 (удовлетворительные);
- 5,6–8,3 (напряженные);
- 8,4–11,1 (очень напряженные);
- 11,2–14 (критические).

Структура экологического каркаса г.о. Балашиха и геоэкологические условия его формирования схематично изображены на рис. 2. На карте-схеме дополнительно показаны участки экологических ядер и коридоров, которые, по результатам проведенной геоэкологической оценки, находятся под угрозой утраты из-за запланированных строительных работ.



Состояние ключевых элементов экологического каркаса городского округа Балашиха (номера объектов зеленой и сине-зеленой инфраструктуры соответствуют рисунку 2)
The state of the key elements of the ecological framework in Balashikha urban district (the numbers of green and blue-green infrastructure sites correspond to Figure 2)

№	Объект зеленой и сине-зеленой инфраструктуры (ООПТ – особо охраняемая природная территория, ПККиО – парк культуры и отдыха, ПРЗ – природно-рекреационные зоны)	Индикаторы (баллы; в скобках указаны абсолютные значения*)					Суммарный балл состояния элемента
		Антропогенная преобразованность ландшафтов	Экологическая неэффективность	Состояние взаимодействия коридоров биоразнообразия и открытых пространств	Трансформация объекта зеленой инфраструктуры с 1972 года	Рекреационная нагрузка	
<i>Ядро 1 ранга, включая коридоры ЗИ и СЗИ 1, 2, 3 рангов</i>							
1	Озерный лесопарк	2 (60)	1 (30)	1 (1 изм.)	2 (10)	1 (40)	7
2	Кучинский лесопарк	3 (80)	1 (40)	0 (8 сохр.)	2 (15)	1 (30)	7
<i>Ядро 1 ранга, включая коридоры ЗИ 1, 3 рангов</i>							
3	Горенский лесопарк	3 (80)	1 (30)	0 (1 сохр.)	2 (10)	2 (50)	8
4	Салтыковский лесопарк	2 (60)	0 (10)	0 (4 сохр.)	2 (10)	1 (5)	5
<i>Ядро 1 ранга, включая коридоры ЗИ 1, 3 рангов</i>							
5	ООПТ «Старинный парк и кв. 1, 3, 4, 9 Салтыковского участка Балашихинского лесопарка»	2 (60)	1 (25)	0 (2 сохр.)	2 (5)	0 (0)	5
<i>Ядро 1 ранга, включая экологические коридоры ЗИ 1, 3 рангов</i>							
6	Юго-восточные леса	3 (80)	3 (75)	1 (4 изм.)	2 (10)	1 (5)	10
<i>Ядро 2 ранга, включая коридоры ЗИ 3 ранга</i>							
7	Южные леса	3 (90)	3 (90)	0 (2 сохр.)	2 (5)	1 (30)	9
8	Ольгинский лесопарк	2 (60)	1 (25)	2 (1 м.б. восст.)	0 (0)	2 (90)	7
9	Восточные леса	2 (60)	2 (50)	0 (2 сохр.)	2 (5)	1 (20)	7
<i>Ядро 2 ранга, включая коридоры ЗИ и СЗИ 3 ранга</i>							
10	Павлинский лесопарк	3 (80)	2 (50)	0 (1 сохр.)	0 (0)	2 (60)	7
11	ПККиО «Пестовский парк»	3 (80)	2 (50)	0 (1 сохр.)	0 (0)	2 (80)	7
<i>Коридор ЗИ и СЗИ 1 и 2 рангов</i>							
12	Центрально-восточные леса	3 (80)	3 (80)	1 (1 изм.)	0 (0)	0 (0)	7
<i>Коридор ЗИ и СЗИ 1 ранга</i>							
13	Усадьба Горенки	1 (50)	0 (20)	3 (отсутств.)	0 (0)	0 (0)	4
<i>Коридор СЗИ 1 ранга</i>							
14	ПРЗ долины р. Пехорки	3 (80)	2 (60)	2 (3 сохр., 1 м.б. восст.)	2 (15)	2 (50)	11
15	ПРЗ долины р. Малашки	3 (80)	1 (25)	0 (2 сохр.)	0 (0)	2 (60)	6
16	ПРЗ долины р. Черной	3 (80)	3 (80)	1 (8 сохр., 1 изм.)	1 (5)	1 (40)	9

Продолжение таблицы
Continuation of the table

17	ПРЗ долины р. Чечеры	3 (80)	1 (25)	0 (7 сохр.)	2 (30)	1 (5)	7
18	ПРЗ долины р. Горенки	3 (80)	1 (25)	0 (1 сохр.)	0 (0)	0 (0)	4
19	ПРЗ долины ручья, пруд Птичник	3 (80)	1 (30)	0 (1 сохр.)	2 (20)	1 (5)	7
20	Леса ок. г.о. Реутов	3 (80)	1 (25)	0 (1 сохр.)	3 (35)	0 (0)	7
21	Леса ок. мкрн. 17	3 (80)	1 (30)	3 (отсутств.)	0 (0)	2 (70)	9
22	Леса ок. п. Безменково-2	3 (80)	1 (30)	0 (1 сохр.)	0 (0)	0 (0)	4
23	ПРЗ ок. мкрн. Новский	3 (90)	3 (100)	1 (1 сохр.)	0 (0)	0 (0)	7
24	ПКиО «Пехорка Парк»	3 (100)	3 (90)	3 (отсутств.)	2 (15)	3 (100)	14
25	ПКиО «Пехорка Лес»	3 (100)	3 (90)	0 (1 сохр.)	0 (0)	1 (30)	7
26	Усадьба Пехра-Яковлевское	3 (80)	0 (10)	0 (1 сохр.)	3 (50)	0 (0)	6
27	Сквер в мкрн. Ольгино	3 (100)	3 (100)	3 (отсутств.)	0 (0)	3 (100)	12
<i>Коридор СЗИ 2 ранга</i>							
28	Долина р. Вьюнки	3 (80)	2 (50)	1 (1 сохр., 1 изм.)	1 (10)	0 (0)	7
29	Долина р. Малиновки	3 (80)	1 (25)	0 (1 сохр.)	0 (0)	0 (0)	4
<i>Коридор СЗИ 3 ранга</i>							
30	ПРЗ долины р. Камышенки	1 (50)	0 (10)	0 (1 сохр.)	0 (0)	0 (0)	1
31	ПРЗ долины ручья, Васильевский пруд	3 (90)	2 (50)	0 (1 сохр.)	3 (50)	0 (0)	8
32	ПРЗ долины Неждановского ручья	1 (40)	0 (0)	0 (1 сохр.)	0 (0)	0 (0)	1
33	ПРЗ долины ручья, пруды в мкрн. Салтыковка	3 (80)	1 (30)	0 (1 сохр.)	3 (40)	0 (0)	7
34	ПРЗ долины ручья в мкрн. Саввино	3 (90)	1 (25)	0 (1 сохр.)	3 (60)	3 (100)	10
35	ПРЗ долины ручья ок. д. Черное	3 (80)	0 (0)	1 (1 изм.)	0 (0)	3 (100)	7
36	ПРЗ долины ручья ок. д. Федурново	3 (80)	3 (90)	0 (1 сохр.)	0 (0)	0 (0)	6
37	ПРЗ долины ручья в мкрн. Южный	3 (100)	3 (100)	3 (отсутств.)	0 (0)	3 (100)	12
38	ПРЗ долины ручья ок. с. Новый Милет	3 (100)	3 (100)	3 (отсутств.)	1 (15)	0 (0)	10
39	ПРЗ долины ручья ок. д. Полтево	3 (80)	0 (5)	0 (1 сохр.)	0 (0)	0 (0)	3
40	ПРЗ ок. д. Темниково	3 (90)	3 (100)	0 (1 сохр.)	0 (0)	2 (60)	8
41	ПРЗ Миловановского карьера	3 (100)	3 (100)	3 (отсутств.)	0 (0)	3 (100)	12
<i>Коридор ЗИ и СЗИ 3 ранга</i>							
42	ПРЗ в мкрн. Салтыковка	3 (80)	1 (30)	0 (2 сохр.)	3 (30)	0 (0)	7
<i>Коридор ЗИ 3 ранга</i>							
43	ООПТ «Парк в с. Новый Милет»	3 (80)	3 (100)	0 (1 сохр.)	0 (0)	1 (15)	7
44	ООПТ «Парк в д. Полтево»	3 (80)	3 (100)	0 (1 сохр.)	0 (0)	0 (0)	6
45	Леса ок. мкрн. 22А	3 (80)	0 (0)	0 (1 сохр.)	2 (15)	2 (50)	7
46	Леса ок. Пуршевского кладбища	2 (60)	1 (25)	1 (1 изм.)	3 (80)	0 (0)	7
47	ПРЗ ок. мкрн. 22А	3 (90)	2 (40)	0 (1 сохр.)	2 (15)	1 (25)	8
48	ПРЗ ок. д. Фенино	3 (100)	3 (100)	0 (1 сохр.)	0 (0)	0 (0)	6

Окончание таблицы
 End of the table

49	ПРЗ ок. д. Павлино	3 (100)	2 (70)	0 (1 сохр.)	2 (15)	1 (45)	8
50	ПРЗ в д. Русавкино-Романово	3 (90)	3 (100)	0 (1 сохр.)	2 (15)	0 (0)	8
51	ПРЗ в мкрн. Заря	3 (80)	1 (25)	0 (1 сохр.)	0 (0)	2 (70)	6
52	ПРЗ в д. Черное	3 (90)	2 (60)	0 (1 сохр.)	0 (0)	1 (10)	6
53	ПРЗ в мкрн. Купавна	3 (90)	0 (5)	0 (1 сохр.)	3 (90)	2 (40)	8
54	ПРЗ в мкрн. Лукино	3 (100)	3 (100)	1 (1 изм.)	0 (0)	0 (0)	7
55	ПРЗ в мкрн. Павлино	3 (80)	2 (50)	3 (отсутств.)	0 (0)	3 (100)	11
56	Скверы в мкрн. Павлино	3 (100)	2 (70)	3 (отсутств.)	0 (0)	3 (100)	11

Примечание: *В показателях трансформации объекта зеленой инфраструктуры с 1972 года указана доля от 300-метровой буферной зоны объекта ЗИ/СЗИ, %; в показателях состояния взаимодействия коридоров биоразнообразия и открытых пространств использованы сокращения: отсутств. – отсутствуют, м.б. восп. – может быть восстановлен, изм. – изменен(ы), сохр. – сохранен(ы); в остальных показателях указана доля от площади объекта ЗИ/СЗИ, %.

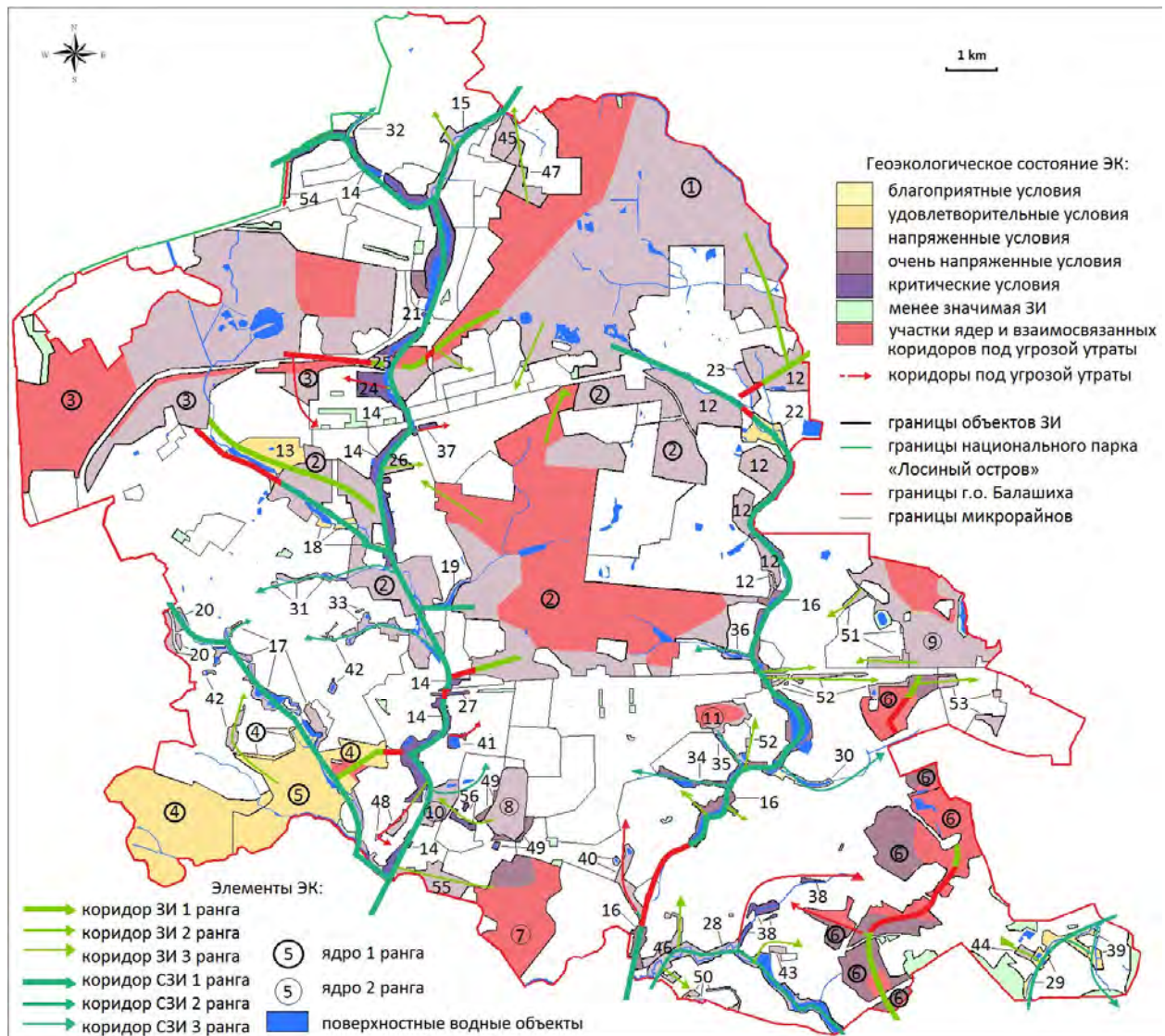


Рис. 2. Карта-схема экологического каркаса городского округа Балашиха
 Fig. 2. A schematic map of the ecological framework of Balashikha urban district

Выделяются следующие стратегические ядра и коридоры экологического каркаса г.о. Балашиха, на устойчивость которых оказывается наибольшее воздействие.

Озерный и Горенский лесопарки.

Экологические ядра 1 ранга, являются наиболее ценными базовыми резерватами г.о. Балашиха. Ядра характеризуются напряженными геоэкологическими условиями. Для обоих лесопарков характерны потери земель за последние 40 лет. В настоящее время они находятся под угрозой раздробления при осуществлении проекта дублера Щелковского шоссе. Трасса разделит Озерный лесопарк на две части, что качественно повлияет на его экосистему. Строительство шоссе также повлияет на состояние и возможную утрату стратегического коридора-моста между Горенским и Озерным лесопарком.

Кучинский лесопарк.

Экологическое ядро 1 ранга, характеризуется напряженными геоэкологическими условиями. На состояние Кучинского лесопарка повлияли санитарные вырубки вследствие заражения насаждений короедом-типографом. В юго-западной части лесопарка расположен стратегический коридор-мост, связанный с долиной р. Пехорки.

Салтыковский лесопарк и ООПТ «Старинный парк и кв. 1, 3, 4, 9 Салтыковского участка Балашихинского лесопарка».

Экологическое ядро 1 ранга. Салтыковский лесопарк, включая ООПТ регионального значения, характеризуется удовлетворительными геоэкологическими условиями, несмотря на близкое расположение к г. Москве, воздействие со стороны полигона ТБО «Кучино», а также антропогенное происхождение участков лесничества. Для лесного покрова характерна целостность и удаленность от автотрасс и городской среды, в том числе от большой рекреационной нагрузки.

Юго-восточные леса.

Экологическое ядро 1 ранга, характеризующееся очень напряженными геоэкологическими условиями. Ландшафты сильно нарушены в ходе хозяйственной деятельности, строительство промышленных зон влияет на направление коридоров биоразнообразия. Строительство трассы «Москва – Казань» дополнительно нарушило целостность коридора, идущего с севера на юг в сторону долины р. Вьюнки.

Павлинский и Ольгинский лесопарки, ПКиО «Пестовский парк».

Экологические ядра 2 ранга, характеризуются напряженными геоэкологическими условиями. В лесопарках основные угрозы связаны с работами по благоустройству и связанной с ними рекреационной нагрузкой. Пестовский парк потерял значительную часть насаждений вследствие заражения короедом-типографом и санитарных вырубок.

Природно-рекреационные зоны долины р. Пехорки.

Территории выполняют функцию важнейшего экологического коридора 1 ранга, который пронизывает городской округ с севера на юг. Коридор характеризуется критическими геоэкологическими условиями. Пойма подвержена застройке, нарушению водоохранной зоны, а также повышенной рекреационной нагрузке в районах высокой плотности населения. Свою целостность коридор больше всего теряет в районах упраздненного города Железнодорожный. Из-за потерь растительного покрова природно-рекреационные зоны характеризуются низкой степенью экологической эффективности. Дальнейшее изъятие земель природно-рекреационных зон должно быть ограниченным.

Природно-рекреационные зоны долины р. Черной.

Территории выполняют функцию стратегического коридора 1 ранга, который охватывает восточную часть г.о. Балашиха. Коридор характеризуется очень напряженными геоэкологическими условиями. Развиваются проблемы с застройкой в водоохранной зоне. Коридор теряет целостность южнее упраздненного города Железнодорожный из-за новых строительных работ, на границе с городской средой он сохраняет структуру, включая связь с долинами безымянных ручьев. Поскольку Железнодорожный и сопредельные



микрорайоны характеризуются нехваткой зеленых зон, на данные территории оказывается большая рекреационная нагрузка.

Природно-рекреационные зоны долин рек Горенка, Чечера (включая каскады прудов), Малашка.

Помимо природно-рекреационных зон долины р. Горенки, территории характеризуются напряженными геоэкологическими условиями. Реки Горенка и Чечера антропогенно преобразованы и зарегулированы каскадом старинных прудов.

Среди экологических коридоров 2 и 3 рангов наиболее ценными для формирования экологического каркаса являются длинные по форме долины ручьев, уходящие вглубь городской среды. Некоторые из них характеризуются напряженными геоэкологическими условиями, во многом по причине повышенного рекреационного воздействия многонаселенных микрорайонов (природно-рекреационные зоны ручьев в деревне Черное, микрорайонах Саввино и Южный). Такие территории не менее подвержены воздействию в сельской местности, где за последние 40 лет площадь природно-рекреационных зон значительно сократилась из-за дачной и коттеджной застройки (например, в микрорайоне Салтыковка).

Критическими геоэкологическими условиями характеризуются парковые зоны, скверы в центральных и многонаселенных районах города: ПКиО «Пехорка Парк» и «Пехорка Лес», скверы в микрорайонах Южный, Павлино, природно-рекреационная зона Миловановского карьера в микрорайоне Керамик. Поскольку данные территории не оказывают опорной функции в экологическом каркасе городского округа, а также нацелены на ежедневную рекреацию, высокие значения оценки объяснимы и для данных территорий могут считаться умеренными. Проектирование новых озелененных зон в многонаселенных микрорайонах г.о. Балашиха способно равномерно распределить рекреационную нагрузку на городскую зеленую инфраструктуру.

Благоприятные геоэкологические условия отмечены в природно-рекреационных зонах Неждановского ручья и реки Камышенки, что объясняется удаленностью от городской среды.

Заключение

Таким образом, ключевые элементы экологического каркаса территории г.о. Балашиха преимущественно характеризуются напряженными геоэкологическими условиями. Это объясняется нестабильностью лесного покрова вследствие строительства и иной хозяйственной деятельности, санитарных вырубок, растущих потребностей в ежедневном отдыхе и соответственно высокой рекреационной нагрузки и работ по благоустройству.

Наибольшее негативное воздействие получают экологические коридоры 1 ранга в природно-рекреационных зонах рек Пехорка и Черная. Данные территории используются недостаточно рационально, что может привести к большему дроблению и утрате некоторых участков двух стратегически важных экологических «магистралей», проходящих через городской округ с севера на юг.

Только четыре экологических ядра из одиннадцати не находятся под угрозой фрагментации в ходе новых строительных работ (в основном транспортной инфраструктуры). Прогнозируется дальнейшая раздробленность экологических ядер и их базовых резерватов, что никак не будет компенсировано относительно экологического каркаса рассматриваемой территории, и также повлияет на состояние лесопаркового пояса г. Москвы.

Защите экологических ядер поспособствует создание новых ООПТ относительно большой площади (помимо Старинного парка и кв. 1, 3, 4, 9 Салтыковского участка Балашихинского лесопарка другие ООПТ регионального значения г.о. Балашиха не выполняют функции экологического ядра и коридоров 1, 2 рангов). Сеть ООПТ регионального и местного значения должна тяготеть к долине реки Пехорки как основополагающему экологическому коридору. Данная территориальная специфика предполагает создание ООПТ, требующих

охраны как преимущественно природных территорий (в экологических ядрах Кучинского, Горенского, Озерного лесопарков), так и природно-культурных комплексов (курганский комплекс вблизи района Акатово, старинный парк в Павлинском лесопарке и др.). На территории нереализованного ООПТ «Пехорка» сохраняется потенциал для создания нескольких ООПТ. В Озерном лесопарке, наиболее уязвимом экологическом ядре рассматриваемого каркаса, необходима охрана комплекса озер (Бабошкино, Юшино, Козлово). Может быть рассмотрена возможность охраны пейзажных ресурсов долины реки Черной как второго по важности экологического коридора, связывающего экологические ядра в восточной части городского округа. Долина реки Черной находится под негативным воздействием строительных работ. Также в целях сохранения экологических ядер и связанных с ними коридоров необходимо рассмотреть расширение границ ООПТ «Старинный парк и кв. 1, 3, 4, 9 Салтыковского участка Балашихинского лесопарка» и «Озеро Бисерово».

В ряде микрорайонов выявлена необходимость в проектировании новых зеленых зон в целях «разгрузки» городских парков, выполняющих функции локальных экологических коридоров и клиньев.

Список литературы

- Илларионова О.А., Климанова О.А. 2018. Трансформация «зеленой инфраструктуры» в крупных городах Южной Америки. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 3: 23–29.
- Климанова О.А., Колбовский Е.Ю., Илларионова О.А. 2020. Зеленая инфраструктура города. М., КМК, 324 с.
- Климанова О.А., Колбовский Е.Ю., Илларионова О.А. 2018. Экологический каркас крупнейших городов Российской Федерации: современная структура, территориальное планирование и проблемы развития. Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле, 63(2): 127–146. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2018.201>
- Климанова О.А., Колбовский Е.Ю., Курбаковская А.В. 2016. Оценка геоэкологических функций зеленой инфраструктуры в городах Канады. География и природные ресурсы, 2: 191–200.
- Подрубный Д.Г., Корнев К.В. 2022а. Применение ретроспективного анализа при изучении геоэкологических особенностей зеленой инфраструктуры (на примере городского округа Балашиха Московской области). В кн.: Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды. Материалы VI Международной научно-практической конференции, 02–03 июня 2022. Гомель, Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины: 192–196.
- Подрубный Д.Г., Корнев К.В. 2022б. Связь открытых пространств и коридоров биоразнообразия (на примере городского округа Балашиха Московской области). В кн.: Сохранение экосистем и биоразнообразия. Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 29 ноября 2022. Владимир, Владимирский государственный университет: 157–160.
- Подрубный Д.Г., Широкова В.А. 2022. Геоэкологические особенности зеленой инфраструктуры (на примере городского округа Балашиха Московской области). Международный сельскохозяйственный журнал, 6: 569–572. https://doi.org/10.55186/25876740_2022_65_6_569
- Пономарев А.А., Байбаков Э.И., Рубцов В.А. 2012. Экологический каркас: анализ понятий. Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки, 154(3): 228–238.
- Тасенко Д.С., Паташова Е.С., Скрипчинская Е.А. 2023. Экологический каркас городов и городов-курортов Кавказских Минеральных Вод (на примере Ессентуков, Пятигорска, Кисловодска, Лермонтова и Железноводска). Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки, 17(4): 71–82. <https://doi.org/10.31161/1995-0675-2023-17-4-71-82>
- Benedict M.A., McMahon E.T. 2002. Green Infrastructure: Smart Conservation for the 21st Century. Renewable Resources Journal, 20(3): 12–17.
- De Sousa Silva C., Viegas I., Panagopoulos T., Bell S. 2018. Environmental Justice in Accessibility to Green Infrastructure in Two European Cities. Land, 7(4): 134. <https://doi.org/10.3390/land7040134>



- Ghofrani Z., Sposito V., Faggian R. 2017. A Comprehensive Review of Blue-Green Infrastructure Concepts. *IJES*, 6(1): 15–36. <https://doi.org/10.24102/ijes.v6i1.728>
- Jerome G., Sinnett D., Burgess S., Calvert T., Mortlock R. 2019. A Framework for Assessing the Quality of Green Infrastructure in the Built Environment in the UK. *Urban Forestry & Urban Greening*, 40: 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.04.001>
- Machado A. 2004. An index of naturalness. *Journal for Nature Conservation*, 12(2): 95–110. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2003.12.002>
- Mejía C.V., Shirotova L., Marques de Almeida I.F. 2015. Green Infrastructure and German Landscape Planning: A Comparison of Approaches. *Urbani izziv*, 26: 25–37. <https://doi.org/10.5379/urbani-izziv-en-2015-26-supplement-002>
- Mell I.C. 2009. Can Green Infrastructure Promote Urban Sustainability? *Proceedings of the Institute of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, 162(1): 23–34. <https://doi.org/10.1680/ensu.2009.162.1.23>
- O'Donnell E.C., Gosling S., Netusil N.R., Chan F., Dolman N. 2021. Perceptions of Blue-Green and Grey Infrastructure as Climate Change Adaptation Strategies for Urban Water Resilience. *Proceedings of the British Academy*, 9(9): 143–182. <https://doi.org/10.5871/jba/009s9.143>
- Penteado H. 2021. Urban Open Spaces from a Dispersal Perspective: Lessons from an Individual-Based Model Approach to Assess the Effects of Landscape Patterns on the Viability of Wildlife Populations. *Urban Ecosystems*, 24: 753–766. <https://doi.org/10.1007/s11252-020-01074-3>
- Winslow J.F. 2021. Multifunctional Green Infrastructure: Planning and Design for Long-Term Care. *Socio-Ecological Practice Research*, 3(3): 293–308. <https://doi.org/10.1007/s42532-021-00088-1>
- Zhang Z., Meerow S., Newell J.P., Lindquist M.W. 2018. Enhancing Landscape Connectivity Through Multifunctional Green Infrastructure Corridor Modeling and Design. *Urban Forestry & Urban Greening*, 38: 305–317. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.10.014>

References

- Illarionova O.A., Klimanova O.A. 2018. Transformation of Green Infrastructure in Large Cities of South America. *Moscow University Bulletin. Series 5, Geography*, 3: 23–29 (in Russian).
- Klimanova O.A., Kolbovsky E.Yu., Illarionova O.A. 2020. Zelenaya infrastruktura goroda [The Green Infrastructure of the City]. Moscow, Publ. KMK, 324 p.
- Klimanova O.A., Kolbovsky E.Yu., Illarionova O.A. 2018. The Ecological Framework of Russian Major Cities: Spatial Structure, Territorial Planning and Main Problems of Development. *Vestnik of St. Petersburg University. Earth Sciences*, 63(2): 127–146 (in Russian). <https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2018.201>
- Klimanova O.A., Kolbovsky E.Yu., Kurbakovskaya A.V. 2016. Assessing the Geoecological Functions of the Green Infrastructure in Cities of Canada. *Geography and Natural Resources*, 37(2): 165–173 (in Russian).
- Podrubny D.G., Kornev K.V. 2022a. Primenenie retrospektivnogo analiza pri izuchenii geokologicheskikh osobennostei zelenoi infrastruktury (na primere gorodskogo okruga Balashikha Moskovskoi oblasti) [The Application of Retrospective Analysis in the Study of Green Infrastructure's Geoecological Features (on the Example of Balashikha Urban Okrug, Moscow Region)]. In: *Transgranichnoe sotrudnichestvo v oblasti ekologicheskoi bezopasnosti i okhrany okruzhayushchei sredy* [Cross-Border Cooperation in the Field of Environmental Safety and Environmental Protection]. Proceedings of the VI International scientific and practical conference, 02–03 June 2022. Gomel, Publ. F. Skorina Gomel State University: 192–196.
- Podrubny D.G., Kornev K.V. 2022b. Svyaz' otkrytykh prostranstv i koridorov bioraznoobraziya (na primere gorodskogo okruga Balashikhi Moskovskoi oblasti) [The Link Between Open Spaces and Biodiversity Corridors (on the Example of Balashikha Urban Okrug, Moscow Region)]. In: *Sokhranenie ekosistem i bioraznoobraziya* [Ecosystem and Biodiversity Conservation]. Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, 29 November, 2022. Vladimir, Publ. Vladimir State University: 157–160.
- Podrubny D.G., Shirokova V.A. 2022. Geoecological Specific Features of the Green Infrastructure (on the Example of Balashikha Urban Okrug, Moscow Region). *International Agricultural Journal*, 6: 569–572 (in Russian). https://doi.org/10.55186/25876740_2022_65_6_569



- Ponomarev A.A., Baibakov E.I., Rubtsov V.A. 2012. The Ecological Framework: an Analysis of Terminology. Scientific notes of Kazan University. Series: Natural Sciences, 154(3): 228–238 (in Russian).
- Tasenko D.S., Patashova E.S., Skripchinskaya E.A. 2023. Ecological Framework for Cities and Resort Cities of Caucasian Spas (Essentuki, Pyatigorsk, Kislovodsk, Lermontov and Zheleznovodsk). Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact Sciences, 17(4): 71–82 (in Russian). <https://doi.org/10.31161/1995-0675-2023-17-4-71-82>
- Benedict M.A., McMahon E.T. 2002. Green Infrastructure: Smart Conservation for the 21st Century. Renewable Resources Journal, 20(3): 12–17.
- De Sousa Silva C., Viegas I., Panagopoulos T., Bell S. 2018. Environmental Justice in Accessibility to Green Infrastructure in Two European Cities. Land, 7(4): 134. <https://doi.org/10.3390/land7040134>
- Ghofrani Z., Sposito V., Faggian R. 2017. A Comprehensive Review of Blue-Green Infrastructure Concepts. IJES, 6(1): 15–36. <https://doi.org/10.24102/ijes.v6i1.728>
- Jerome G., Sinnett D., Burgess S., Calvert T., Mortlock R. 2019. A Framework for Assessing the Quality of Green Infrastructure in the Built Environment in the UK. Urban Forestry & Urban Greening, 40: 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.04.001>
- Machado A. 2004. An index of naturalness. Journal for Nature Conservation, 12(2): 95–110. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2003.12.002>
- Mejía C.V., Shirotova L., Marques de Almeida I.F. 2015. Green Infrastructure and German Landscape Planning: A Comparison of Approaches. Urbani izziv, 26: 25–37. <https://doi.org/10.5379/urbani-izziv-en-2015-26-supplement-002>
- Mell I.C. 2009. Can Green Infrastructure Promote Urban Sustainability? Proceedings of the Institute of Civil Engineers: Engineering Sustainability, 162(1): 23–34. <https://doi.org/10.1680/ensu.2009.162.1.23>
- O'Donnell E.C., Gosling S., Netusil N.R., Chan F., Dolman N. 2021. Perceptions of Blue-Green and Grey Infrastructure as Climate Change Adaptation Strategies for Urban Water Resilience. Proceedings of the British Academy, 9(9): 143–182. <https://doi.org/10.5871/jba/009s9.143>
- Penteado H. 2021. Urban Open Spaces from a Dispersal Perspective: Lessons from an Individual-Based Model Approach to Assess the Effects of Landscape Patterns on the Viability of Wildlife Populations. Urban Ecosystems, 24: 753–766. <https://doi.org/10.1007/s11252-020-01074-3>
- Winslow J.F. 2021. Multifunctional Green Infrastructure: Planning and Design for Long-Term Care. Socio-Ecological Practice Research, 3(3): 293–308. <https://doi.org/10.1007/s42532-021-00088-1>
- Zhang Z., Meerow S., Newell J.P., Lindquist M.W. 2018. Enhancing Landscape Connectivity Through Multifunctional Green Infrastructure Corridor Modeling and Design. Urban Forestry & Urban Greening, 38: 305–317. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.10.014>

*Поступила в редакцию 16.08.2024;
поступила после рецензирования 24.09.2024;
принята к публикации 12.11.2024*

*Received August 16, 2024;
Revised September 24, 2024;
Accepted November 12, 2024*

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Подрубный Дмитрий Германович, аспирант кафедры геоэкологии и природопользования, Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия

Dmitry G. Podrubny, Postgraduate Student of the Department of Geoecology and Environmental Management, State University of Land Use Planning, Moscow, Russia

Кулаков Артем Павлович, младший научный сотрудник, Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева Российской академии наук, Москва, Россия

Artem P. Kulakov, Junior Researcher, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia



УДК 504.064.2.001.18
DOI 10.52575/2712-7443-2024-48-4-604-615

Формирование сети мониторинга воздействия оленеводства на окружающую среду полуострова Ямал

Скрицкая М.К., Петров Ю.В.

Тюменский государственный университет,
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6
E-mail: mskritskaya@bk.ru, petrov19811201@gmail.com

Аннотация. В исследовании рассмотрено традиционное природопользование как фактор воздействия на окружающую среду на примере оленеводства на полуострове Ямал. Целью исследования является разработка рекомендаций по организации мониторинга воздействия традиционного природопользования на окружающую природную среду полуострова (на примере оленеводства). В ходе исследования были проанализированы последствия трансформации оленеводства от экологически-сбалансированной отрасли к аграрно-промышленной, дана характеристика территории как зоны масштабного воздействия традиционного природопользования на окружающую природную среду, продемонстрированы результаты применения современных методов и дистанционного зондирования Земли для мониторинга воздействия, проведен анализ методологических и организационных факторов, определяющих формирование сети мониторинга воздействия традиционного природопользования на окружающую природную среду Ямала. В исследовании применены геоинформационный, картографический метод и хронологический анализ. В результате представлены рекомендации по организации мониторинга воздействия традиционного природопользования на окружающую среду полуострова Ямал, которые заключаются во включении в сеть мониторинга факторий (мониторинг и регулирование численности поголовья оленей), лицензионных участков (локальный экологический мониторинг) и особо охраняемых природных территорий (мониторинг состояния природных комплексов и растительности). В качестве наиболее перспективных методов мониторинга предложены дистанционные методы в связи с масштабом и труднодоступностью территории.

Ключевые слова: традиционное природопользование, оленеводство, полуостров Ямал, NDVI, экологический мониторинг

Для цитирования: Скрицкая М.К., Петров Ю.В. 2024. Формирование сети мониторинга воздействия оленеводства на окружающую среду полуострова Ямал. Региональные геосистемы, 48(4): 604–615. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-604-615

Formation of a Network for Monitoring the Impact of Reindeer Herding on the Environment of the Yamal Peninsula

Margarita K. Skritskaya, Yuriy V. Petrov

Tyumen State University,
6 Volodarsky St, Tyumen 625003, Russia
E-mail: mskritskaya@bk.ru, petrov19811201@gmail.com

Abstract. The article is focused on traditional nature management as a factor of environmental impact exemplified by reindeer herding on the Yamal Peninsula. The study is aimed at developing recommendations on monitoring the impact of traditional nature management on the Yamal environment. The authors analyze the consequences of reindeer herding transformation from an ecologically balanced industry to an agrarian and commercial one, and describe the peninsula as an area where traditional nature management exerts large-scale environmental influence. The paper contains an analysis of methodological and organizational factors determining the formation of a network for monitoring the environmental impact of traditional nature management on the Yamal Peninsula. The results of applying

contemporary methods and remote sensing of Earth are shown. Geoinformational and cartographic methods, chronological and chorological analysis were used in the research. The findings allow to provide recommendations on monitoring the environmental impact of traditional nature management, requiring that the monitoring network should include monitoring stations (deer population number monitoring and control), licensed areas (local environmental monitoring), and protected areas (monitoring of the state of natural complexes and vegetation). Due to the large size and inaccessibility of the area under study, monitoring methods based on remote sensing data are recommended for use.

Keywords: traditional nature management, reindeer husbandry, Yamal Peninsula, NDVI, environmental monitoring

For citation: Skritskaya M.K., Petrov Yu.V. 2024. Formation of a Network for Monitoring the Impact of Reindeer Herding on the Environment of the Yamal Peninsula. *Regional Geosystems*, 48(4): 604–615. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-604-615

Введение

Традиционное природопользование является отраслью народного хозяйства, важной с точки зрения сохранения культурной идентичности коренного населения, и представлено во многих странах, включая Россию. Зачастую под данным видом хозяйства подразумевается экологически сбалансированная деятельность, связанная с рациональным использованием природных ресурсов «без подрыва способности к устойчивому воспроизводству и снижению разнообразия природных ресурсов» [Козин, Петровский, 2005]. В распоряжении Правительства РФ от 8 мая 2009 г. № 631-р закреплён перечень видов традиционной хозяйственной деятельности коренных малочисленных народов РФ, который включает такие отрасли, как животноводство, рыболовство, пчеловодство, охота, земледелие, собирательство и др. Несмотря на устоявшиеся определения данной отрасли хозяйства, на сегодняшний день существует ряд исследований, подтверждающих изменение характера традиционного природопользования с экологически-сбалансированного на промысловый и переход в разряд негативно воздействующих на окружающую природную среду [Морозова, Магомедова, 2006; Богданов и др., 2012; Адаев, 2018; Липски, 2018]. Данный факт демонстрирует необходимость разработки мероприятий, направленных на мониторинг и регулирование воздействия традиционного природопользования на окружающую среду, а также принятие управленческих решений для рационального использования природных ресурсов.

В данном случае ярким примером территории, в пределах которой осуществляется масштабное воздействие традиционного природопользования на окружающую среду, является Ямальский район Ямало-Ненецкого автономного округа. Именно здесь проживает самый крупный по численности населения среди коренных малочисленных народов Севера народ – ненцы (по данным переписи населения 2021 года – 49 787 человек) и наиболее масштабно реализуется один из видов традиционной хозяйственной деятельности – оленеводство, представленное поголовьем оленей, составляющим треть от общемирового (по состоянию на 01.01.2024 г. – 332 434 головы). Оленеводство является важным этническим аспектом для сохранения культуры и языка ненцев [Хомич, 1995], однако, помимо этнической роли, с развитием капиталистических отношений, всё большую роль приобретает и экономический аспект. В истории развития оленеводства Ямала выделяется два тренда в численности поголовья оленей: сокращение в 1960-х гг. вследствие коллективизации и увеличение численности в 1990-х гг. в результате либерализации экономики [Южаков, Деттер, 2020]. Наибольшее внимание органов власти и исследователей оленеводство на Ямале привлекло после вспышки сибирской язвы летом 2014 года, которая стала одним из возможных последствий перевыпаса и нарушения экологического баланса [Южаков, 2016]. Одной из основных проблем оленеводства Ямала исследователи [Богданов и др., 2012] обозначают наличие значительного числа не входящих ни в какие экономические объединения хозяйств. Также в данной работе отмечают внутренний фактор – менталитет

ненцев, направленный на максимальное использование кормовых ресурсов тундры, а промышленное освоение лишь усугубляет ситуацию. Сами ненцы одной из причин перевыпаса называют недостаточно развитую систему приема и сбыта продукции оленеводства, что не позволяет рационально сбывать имеющуюся продукцию [Головнёв, Абрамов, 2014]: цены принимаемой продукции не всегда рентабельны для оленеводов. В связи со всеми вышеперечисленными факторами ведения хозяйства на Ямале возникают трудности для проведения мероприятий мониторинга состояния ландшафтов оленьих пастбищ и разработки регулирующих мер. Именно это является причиной сложности принятия управленческих решений и, как следствие, нерационального использования кормовых ресурсов пастбищ, что влечет за собой их деградацию.

Целью данного исследования является разработка рекомендаций по организации мониторинга воздействия традиционного природопользования на окружающую природную среду полуострова Ямал (на примере оленеводства). Задачи: исследование современного традиционного природопользования как фактора воздействия на окружающую природную среду; характеристика исследуемой территории полуострова Ямал как зоны масштабного воздействия традиционного природопользования на окружающую природную среду; анализ методологических и организационных факторов, определяющих формирование сети мониторинга воздействия традиционного природопользования на окружающую природную среду полуострова Ямал (на примере оленеводства). Объектом исследования является территория современного оленеводства на полуострове Ямал, предмет исследования – воздействие оленеводства на окружающую природную среду полуострова Ямал.

Объекты и методы исследования

Полуостров Ямал является уникальной территорией с точки зрения физико-географической и социально-экономической характеристики. Ключевыми отраслями экономики Ямальского района являются добыча полезных ископаемых, представленная крупнейшими нефтегазоконденсатными месторождениями в мире (Бованенковское, Харасавэйское, Новопортовское), и агропромышленный комплекс, в основном представленный оленеводческими предприятиями. Основная деятельность в оленеводческой отрасли ведётся муниципальным оленеводческим предприятием «Ярсалинское» и малыми формами хозяйствования [Доклад ... за 2023 год, 2024]. По состоянию на 01.01.2024 года поголовье северных оленей в Ямальском районе составляет 332 434 головы, более подробная структура поголовья представлена на рис. 1. Наиболее рентабельным считается крупностадное оленеводство, в результате которого и оказывается наиболее мощное воздействие на ландшафты тундры [Морозова, Магомедова, 2006].



Рис. 1. Структура поголовья оленей в Ямальском районе (в тыс. голов) [Доклад ... за 2023 год, 2024]
Fig. 1. The structure of the reindeer population in the Yamal region (in thousands of heads)
[Report ... for 2023, 2024]

Ямальский район расположен в пределах полуострова Ямал за Северным полярным кругом и входит в Арктическую зону Российской Федерации. Площадь полуострова равна 122 000 км².

Физико-географическая характеристика полуострова Ямал также включает ряд особенностей, которые необходимо учитывать при исследовании воздействия традиционного природопользования на окружающую среду. Первым фактором являются суровые климатические условия на полуострове, такие как низкие температуры и сильные ветры, что обусловлено расположением территории за Северным полярным кругом и влияет на сезонность выпаса и миграции оленей. Вторым фактором является характер рельефа и подстилающих пород. Геоморфология определяет направление сезонной миграции стад – оленеводческие бригады держат путь в северные районы на летние пастбища из южной части Ямала, двигаясь по высоким гипсометрическим уровням срединной части полуострова, постепенно расходясь к побережьям [Панина, 1972]. А особенности рыхлых подстилающих пород способствуют формированию песчаных обнажений по положительным элементам рельефа. Третьим фактором является характер растительности тундры, являющейся кормовой базой для оленеводства, которая включает в себя как мохово-лишайниковые, так и кустарничковые сообщества. Четвертым фактором является природное зонирование территории полуострова, включающее подзоны арктических, типичных и южных тундр [Кулюгина, 2004]. Совокупность данных природно-территориальных факторов в сочетании с прессом антропогенной деятельности приводит к деградации растительного покрова и дальнейшему опустыниванию территории. По данным исследования [Богданов и др., 2012], в результате опустынивания на Ямале безвозвратно потеряно более 580 тыс. га пастбищ. Таким образом, при организации мониторинга воздействия традиционного природопользования на окружающую среду на полуострове Ямал необходимо учитывать ряд территориальных и природных особенностей, влияющих на степень воздействия на окружающую среду.

В ходе исследования использовались картографический и геоинформационный методы, а также был проведен хронологический анализ. Информационной базой исследования послужили открытые источники данных дистанционного зондирования Земли, научные статьи, статистические материалы, данные профильных органов государственной исполнительной власти РФ, субъектов РФ и органов местного самоуправления. В связи с отсутствием систематизированной информации нами были направлены общегражданские запросы в органы власти для формирования базы данных по тематике исследования.

В начале исследования территория была условно разделена авторами на 4 участка в соответствии с принятым делением на подзоны: участок арктической тундры, южной (кустарничковой) тундры и 2 участка типичной тундры (северный и южный) (рис.2). Затем были приведены и проанализированы территориальные факторы, учет которых необходим при формировании сети мониторинга воздействия оленеводства на окружающую среду полуострова Ямал. К данным факторам относятся текущее экологическое состояние территории, расположение промышленной и транспортной инфраструктуры, зоны миграции и выпаса оленей, территории муниципальных оленеводческих предприятий, физико-географические характеристики ландшафтов, расположение лицензионных участков, расположение ООПТ, расположение деградированных участков в соответствии с данными предыдущих исследователей.

Воздействие оленеводства на окружающую среду проявляется прежде всего в использовании кормовых растительных ресурсов пастбищ и физическом воздействии на растительный покров тундры посредством вытаптывания. К примеру, по данным [Морозова, Магомедова, 2006] вследствие перевыпаса происходит увеличение площади пятен морозного пучения и песчаных раздувов, что влечет за собой полное выбивание участков тундры с низким проективным покрытием. Масштабы выбитых участков довольно детально продемонстрированы в исследовании [Golovatin et al., 2010] (рис. 2).

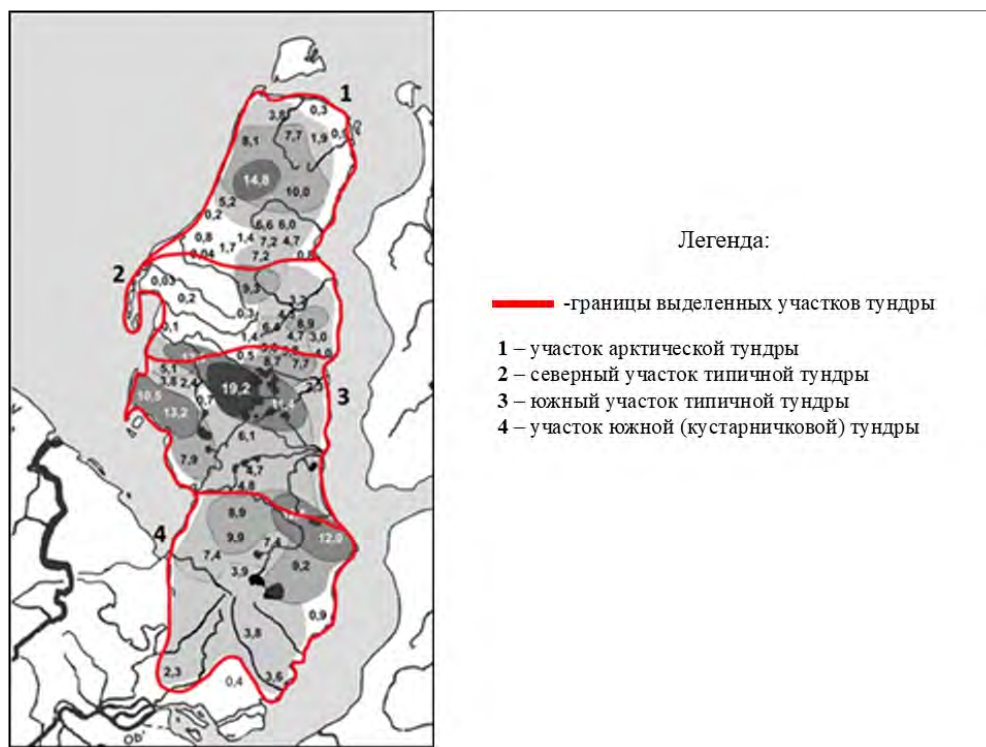


Рис. 2. Карта-схема дефляционных песчаных обнажений на Ямале, образовавшихся под воздействием выпаса оленей

(цифрами обозначена доля участков перевыпаса) [Golovatin et al., 2010]

Fig. 2. Schematic map of deflationary sand outcrops in Yamal which formed under reindeer grazing impact (figures indicate the proportion of overgrazing sites) [Golovatin et al., 2010]

Таким образом, состояние растительности напрямую связано с экологическим состоянием территории. По этой причине для выявления перспективных участков для мониторинга с наиболее критической экологической ситуацией авторами был проведен анализ динамики состояния растительного покрова ямальской тундры за промежуток 1988–2023 гг. на основе данных ДЗЗ [Скрицкая, Петров, 2024а]. Процесс включал подбор и обработку космоснимков спутника *Landsat* на каждый участок за данный период; расчет вегетационного индекса *NDVI* в программе *QGIS*, наиболее часто применяемого в подобных исследованиях [Елсаков, Щанов, 2019; Веселкин и др., 2021; Фахретдинов, Тигеев, 2023]; сопоставление полученных значений индексов с территориальными и другими факторами.

Результаты и их обсуждение

Для формирования системы мониторинга воздействия традиционного природопользования на окружающую природную среду необходимо выделение зон, где комплексное воздействие со стороны промышленного освоения и традиционного природопользования неизбежно и оказывалось или будет оказываться длительное время, соответственно, именно в этих зонах и будут наблюдаться максимальные нарушения растительного покрова. Однако для выделения этих зон требуется учет множества факторов территориального размещения промышленных объектов и природных условий.

Первым фактором, который необходимо учесть при выделении критических зон для мониторинга, является текущее экологическое состояние территории. Для полуострова Ямал наиболее напряженная экологическая ситуация наблюдается в районе наибольшего промышленного освоения и расположения двух крупнейших нефтегазоконденсатных месторождений в западной части полуострова [Доклад ... 2022 году, 2024], что отражено на карте антропогенных нарушений природной среды [Национальный Атлас России, 2024].

Вторым фактором является распределение территорий миграции и выпаса оленей. Выпас северных оленей охватывает всю территорию полуострова целиком. Наиболее чувствительны к вытаптыванию виды плодовых кормовых лишайников, особенно высокая нагрузка создается, когда стадо в 10–12 тыс. голов дважды за сезон пасется и мигрирует на одних и тех же пастбищах. Участки с такими нагрузками в основном располагаются в местах наиболее востребованных путей миграции и размещения стойбищ в южной и центральной части полуострова.

Третьим фактором является размещение объектов промышленной и транспортной инфраструктуры, прямо и косвенно оказывающих воздействие на окружающую природную среду. Активное ее размещение на полуострове началось в 1970–1990-х гг., впоследствии была построена железная и автомобильная дороги. В настоящее время очаги техногенного воздействия локализованы на небольших площадях, подготовленных к эксплуатации газовых и нефтяных месторождений, и в узкой полосе вдоль транспортных магистралей – трубопроводов, автомобильных и железных дорог. По данным Администрации Ямальского района, на его территории по состоянию на 2024 год разведано 26 крупнейших месторождений углеводородов, зарегистрировано 19 лицензионных участков (рис. 3).

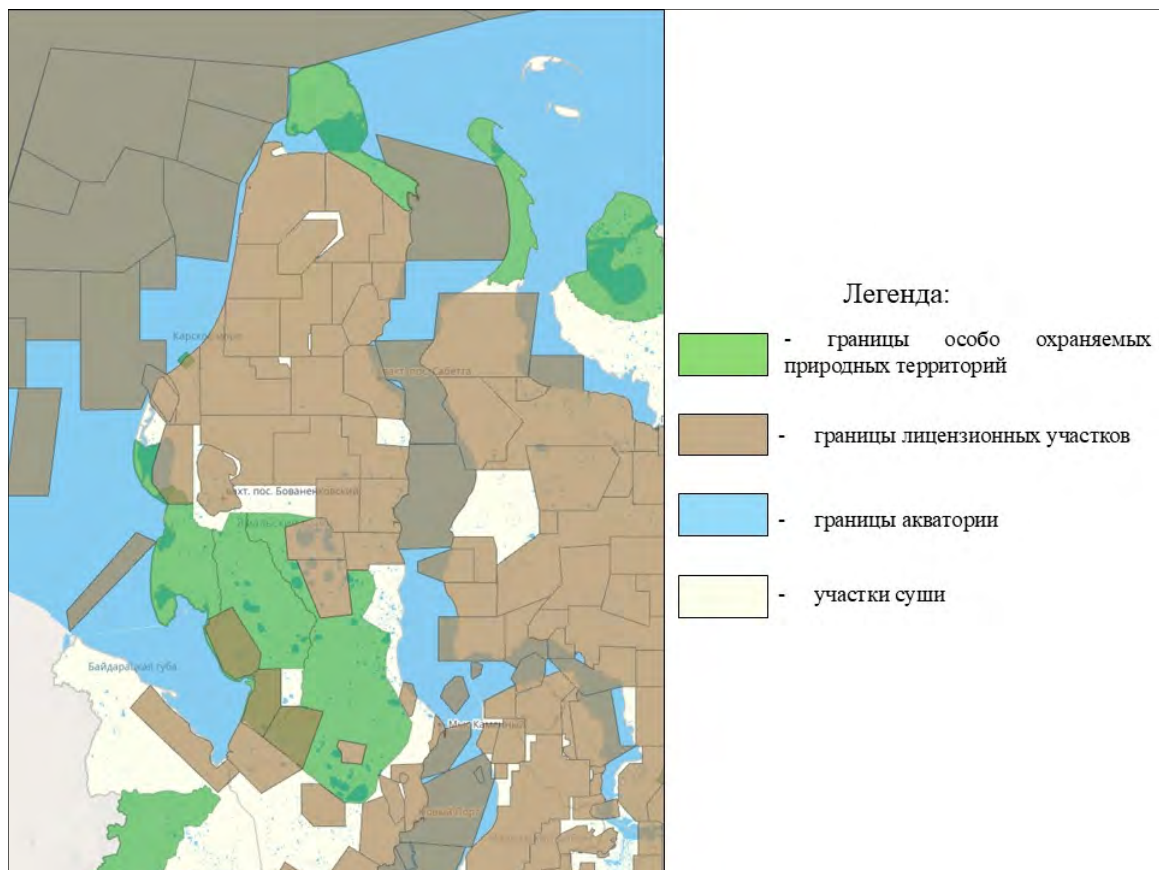


Рис.3. Карта-схема лицензионных участков и ООПТ на полуострове Ямал
[Единая картографическая система ЯНАО]

Fig.3. License areas (brown) and protected areas (green) on the Yamal Peninsula
[Unified Cartographic System of the Yamalo-Nenets Autonomous District]

Четвертым важным фактором при размещении точек мониторинга экологического состояния территории является характеристика природных компонентов исследуемого ландшафта, прежде всего почвенного и растительного покрова. От характерного типа того

или иного компонента зависит степень уязвимости и, соответственно, необходимость мониторинга участка.

Территориями с особым установленным режимом природопользования являются ООПТ, которые также были учтены в ходе исследования. Крупнейшим ООПТ на территории Ямала на сегодняшний день является Ямальский природный заказник, который разделен на несколько участков. Все вышеперечисленные территориальные аспекты были учтены при формировании точек мониторинга воздействия традиционного природопользования на окружающую природную среду на полуострове Ямал.

В результате сопоставления вышеобозначенных факторов с данными, полученными в ходе исследования состояния пастбищ по материалам ДЗЗ за 1986–2023 гг. [Скрицкая, Петров, 2024б], по итогам которого были выделены участки тундры с наибольшими изменениями под воздействием перевыпаса, была составлена схема предполагаемого мониторинга воздействия оленеводства на ландшафты полуострова Ямал (рис. 4).

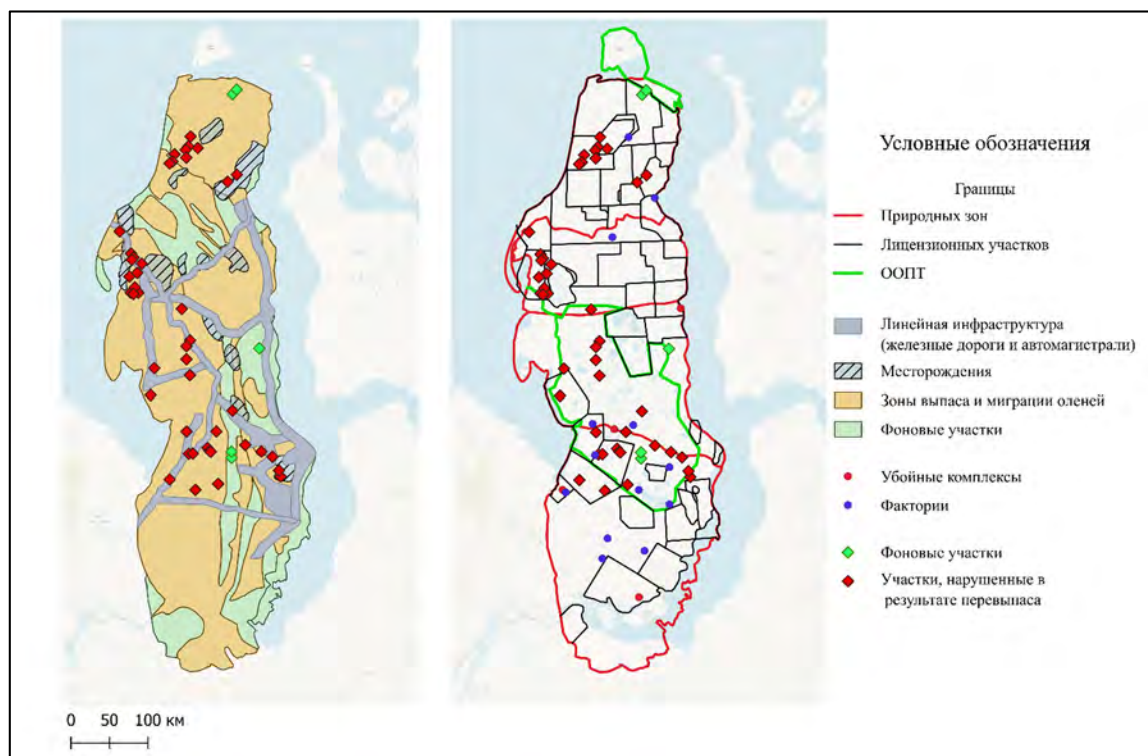


Рис. 4. Мониторинг воздействия оленеводства на окружающую природную среду полуострова Ямал
Fig. 4. Monitoring the impact of reindeer herding on the environment of the Yamal Peninsula

Данная карта-схема демонстрирует локализацию участков с наибольшей деградацией растительного покрова в основном в зоне выпаса и миграции оленей и на границе участков миграции и линейных объектов промышленной инфраструктуры (автомобильные и железные дороги, трубопроводы). Также участки деградации растительного покрова располагаются в основном на участках тундры с наиболее уязвимыми видами растительности, к которым относятся лишайниковые и мохово-кустарничково-лишайниковые ассоциации. При рассмотрении многолетней динамики индекса вегетации растительности $NDVI$ в разрезе 4 выделенных участков тундры выявлено, что наиболее устойчивым к перевыпасу и дальнейшей деградации оказался участок подзоны южной (кустарничковой) тундры, так именно на этом участке среднее значение $NDVI$ подверглось наименьшим колебаниям за период 1986–2023 гг. (рис. 5). В этой подзоне наиболее распространена кустарничковая растительность, которая более устойчива к внешнему воздействию с точки зрения скорости процессов восстановления.

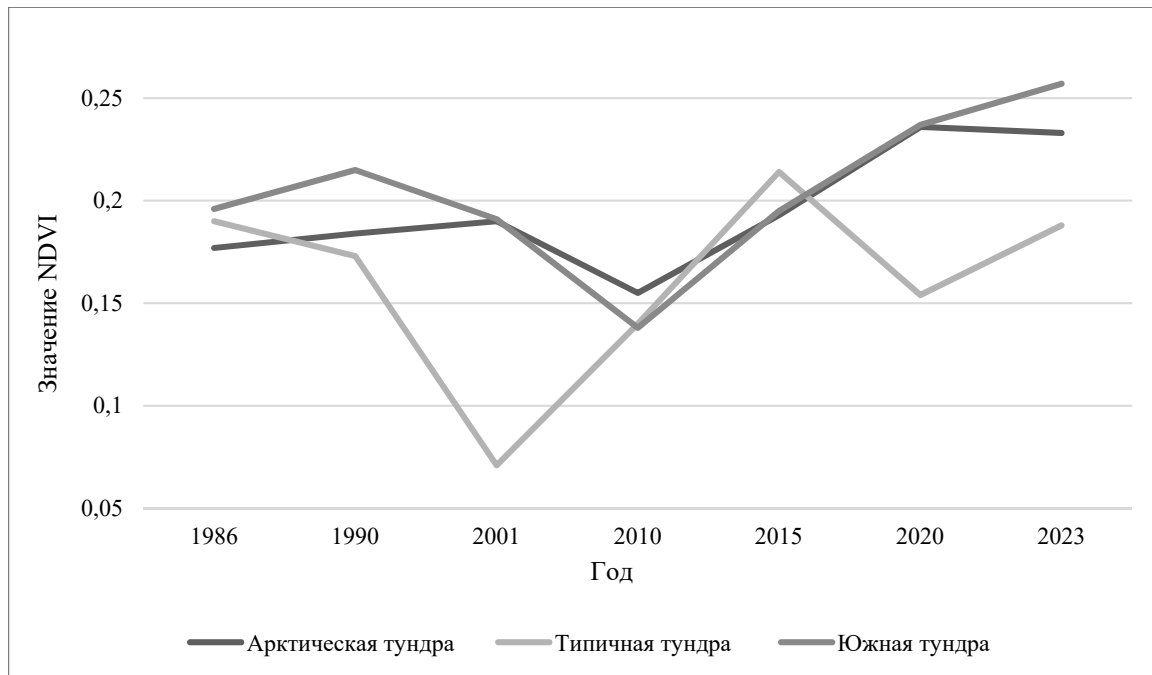


Рис. 5. Динамика индекса NDVI на полуострове Ямал за 1986–2023 гг.
Fig. 5. Dynamics of the NDVI index on the Yamal Peninsula for 1986–2023

В результате проведенного комплексного анализа территориальных особенностей полуострова Ямал, а также ретроспективного индекса состояния растительного покрова в период с 1986 по 2023 год, подтверждается необходимость формирования системы мониторинга воздействия традиционного природопользования на окружающую природную среду полуострова Ямал. Для этого авторами предлагаются следующие рекомендации:

1. При разработке системы мониторинга воздействия необходимо учет всех факторов антропогенного воздействия как промышленных, так и традиционных, а также формирование такой региональной системы мониторинга, которая бы учитывала не только территории промышленного освоения и населенных пунктов, но и территории традиционного природопользования, являющиеся неотъемлемой частью культуры и хозяйствования проживающего населения.

2. Для эффективной работы сеть мониторинга должна включать 3 опорных элемента: фактории, отвечающие за мониторинг и регулирование численности поголовья оленей; лицензионные участки, учитывающие экологическое состояние всех природных компонентов (атмосферный воздух, почвенный покров, поверхностные воды, состояние растительности в их пределах); и ООПТ, отвечающие за мониторинг состояния растительного покрова (см. рис. 3).

3. В связи с тем, что для рационального использования пастбищ допускается использование лишь 40–50 % их ресурсов, необходимо своевременное выявление участков с низкими кормовыми ресурсами и их временное изъятие из использования для восстановления, так как невыполнение данного правила может привести к полной деградации участков растительного покрова.

4. Программа мониторинга воздействия оленеводства на ресурсы пастбищ должна включать ежегодное исследование и планирование нормы кормовых запасов, оленеёмкости, а также отслеживание площадей выбитых участков и дефляции в результате выпаса на участках с наибольшим риском деградации, выделенных в ходе исследования.

5. В качестве наиболее перспективных методов мониторинга в условиях размера и труднодоступности территорий полуострова предлагаются дистанционные методы мо-



ниторинга, основанного на данных ДЗЗ, что подтверждается имеющимися на сегодняшний день научными исследованиями в данной сфере.

Заключение

В ходе анализа традиционного природопользования как источника антропогенного воздействия на окружающую природную среду полуострова Ямал выявлено, что на сегодняшний день в данной сфере существуют актуальные вопросы, связанные со степенью изменения характера традиционного природопользования и его последствиями для окружающей среды, трансформации территорий традиционного природопользования под воздействием антропогенной нагрузки и климатических изменений, необходимостью разработки мероприятий по мониторингу и регулированию данной отрасли. Для успешной реализации данных мероприятий требуются такие организационные действия, как разработка нормативного правового акта, устанавливающего процесс ведения мониторинга на региональном уровне, создание программы с указанием периодичности проведения наблюдений, объединение всех полученных данных в единую государственную информационную систему для хронологического анализа и принятия управленческих решений. В результате, все принимаемые управленческие решения, связанные с регулированием традиционного природопользования, должны основываться на данных, полученных в ходе мониторинга.

Интенсивное промышленное освоение территории Ямала в результате техногенного воздействия влияет на трансформацию природной среды с одной стороны, а с другой стороны влияние оказывает традиционная хозяйственная деятельность, которая и является главным потребителем биологических ресурсов природной среды. Для соблюдения баланса и восстановления ресурсов ландшафтов Ямала необходимо соблюдение рационального и неистощительного использования ресурсов всеми субъектами природопользования, предотвращение конфликтов природопользования и контроль воздействия на окружающую среду.

В ходе комплексного анализа методологических и организационных факторов, определяющих формирование сети мониторинга воздействия традиционного природопользования на окружающую природную среду полуострова Ямал, выделены территориальные особенности каждой зоны тундры полуострова. Для зоны арктической тундры характерно отсутствие густых путей миграции оленей, отсутствие линейных объектов инфраструктуры, локальное воздействие на окружающую среду в зонах работы месторождений и наличие особо уязвимых видов растительности, которые требуют особого внимания со стороны мониторинга из-за трудности восстановления. Для типичной (северной) тундры характерно наличие наиболее густых путей миграции, размещение линейных объектов инфраструктуры, таких как железные и автомобильные дороги, трубопроводы, а также круглогодичное использование растительных ресурсов, в которых сочетается лишайниковая и кустарниковая растительность. Южная тундра является местом сосредоточения постоянного выпаса оленей, наибольшего сосредоточения стойбищ, с наибольшим количеством транспортной и промышленной инфраструктуры, при этом включает в основном более быстровосстановимую кустарничковую растительность, которая является источником питательных веществ для оленей в течение большей части года.

На основании результатов анализа методологических и организационных факторов мониторинга воздействия традиционного природопользования на окружающую среду полуострова Ямал, разработаны рекомендации по организации мониторинга, которые заключаются в учете традиционного природопользования и промышленности как двух факторов воздействия, оказывающих аддитивный эффект, во включении в сеть мониторинга специальных территориальных опорных пунктов, в составлении программы мониторинга и планировании рационального использования ресурсов территории, использовании наиболее актуальных на сегодняшний день дистанционных методов мониторинга окружающей среды.

Список источников

- Доклад о социально-экономическом развитии в Ямальском районе за 2023 год. Электронный ресурс. URL: <https://yam.yanao.ru/documents/other/330117/> (дата обращения: 03.05.2024).
- Доклад об экологической ситуации в Ямало-Ненецком автономном округе в 2022 году. Электронный ресурс. URL: <https://dpr.yanao.ru/documents/active/273069/> (дата обращения: 03.05.2024).
- Единая картографическая система ЯНАО. Электронный ресурс. URL: <https://karta.yanao.ru/eks> (дата обращения: 03.05.2024).
- Козин В.В., Петровский В.А. 2005. Геоэкология и природопользование: понятийно-терминологический словарь. Смоленск, Ойкумена, 574 с.
- Национальный Атлас России. Электронный ресурс. URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/426-428.html> (дата обращения: 03.05.2024).

Список литературы

- Адаев В.Н. 2018. Трансформация культуры: современные материалы и технологии в жизни тундровых ненцев-оленьеводов Ямало-Ненецкого автономного округа. Вестник археологии, антропологии и этнографии, 3(42): 158–168. <https://doi.org/10.20874/2071-0437-2018-42-3-158-168>
- Богданов В.Д., Головатин М.Г., Морозова Л.М., Эктова С.Н. 2012. Социально-экологические условия промышленного освоения полуострова Ямал. Экономика региона. 3(31): 141–150. <https://doi.org/10.17059/2012-3-13>
- Веселкин Д.В., Морозова Л.М., Горбунова А.М. 2021. Снижение значений NDVI в южных тундрах Ямала в 2001–2018 гг. коррелирует с численностью домашних северных оленей. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 18(2): 143–155. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-2-143-155>
- Головнёв А.В., Абрамов И.В. 2014. Олени и газ: стратегии развития Ямала. Вестник археологии, антропологии и этнографии, 4(27): 122–131.
- Елсаков В.В., Щанов В.М. 2019. Современные изменения растительного покрова пастбищ северного оленя Тиманской тундры по результатам анализа данных спутниковой съёмки. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 16(2): 128–142. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-2-128-142>
- Кулюгина Е.Е. 2004. Флора и растительность песчаных обнажений Припечерских тундр. Автореф. дисс... канд. биол. наук. Сыктывкар, 26 с.
- Липски С.А. 2018. Состояние оленьих пастбищ в Арктической зоне Российской Федерации, факторы их деградации и меры по улучшению ситуации. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка, 62(6): 695–702. <https://doi.org/10.30533/0536-101X-2018-62-6-695-702>
- Морозова Л.М., Магомедова М.А. 2006. Влияние выпаса оленей на ресурсный потенциал растительного покрова. В кн.: Полуостров Ямал: растительный покров. Тюмень, Сити-пресс: 235–247.
- Панина Н.А. 1972. Ресурсы поверхностных вод СССР. Л., Изд-во Гидрометеиздат, 15: 55–60.
- Скрицкая М., Петров Ю. 2024а. Воздействие оленеводства на экологию полуострова Ямал в эпоху нефтегазового освоения. Энергетическая политика, 8(199): 58–79. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2024_8199_58
- Скрицкая М.К., Петров Ю.В. 2024б. Экологические аспекты организации традиционного природопользования в ресурсодобывающем регионе. Арктика: экология и экономика, 14(1): 80–89. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2024-1-80-89>
- Фахретдинов А.В., Тигеев А.А. 2023. Оценка динамики растительного покрова оленьих пастбищ полуострова Ямал при помощи метода полуавтоматической классификации спутниковых снимков. Географический вестник, 3(66): 106–119. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2023-3-106-119>
- Хомич Л.В. 1995. Ненцы. СПб, Русский двор, 336 с.



- Южаков А.А. 2016. Проблемы экологии и мониторинг оленеводства на Ямале. В кн.: Экология древних и традиционных обществ. Материалы V Международной научной конференции, Тюмень, 07–11 ноября 2016. Тюмень, Тюменский государственный университет: 269–274.
- Южаков А.А., Деттер Г.Ф. 2020. Трансформация оленеводства Арктики в условиях рыночной экономики (на примере Ямала). Арктика: экология и экономика, 4(40): 139–150. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-4-139-150>
- Golovatin M.G., Morozova L.M., Ektova S.N., Paskhalny S.P. 2010. The Change of Tundra Biota at Yamal Peninsula (the North of the Western Siberia, Russia) in Connection with Anthropogenic and Climatic Shifts. In: Tundra's: Vegetation, Wildlife and Climate trends. Ed. by Gutierrez B., Pena C. New York, Nova Science Publishers: 1–46.

References

- Adaev V.N. 2018. Cultural Transformation: Modern Materials and Technologies in the Life of the Tundra Nenets Reindeer Herders (Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Russia). Vestnik Arheologii, Antropologii i Etnografii, 3(42): 158–168 (in Russian). <https://doi.org/10.20874/2071-0437-2018-42-3-158-168>
- Bogdanov V.D., Golovatin M.G., Morozova L.M., Ektova S.N. 2012. Socio-Ecological Conditions of Industrial Development of the Yamal Peninsula. Economy of Regions, 3(31): 141–150 (in Russian). <https://doi.org/10.17059/2012-3-13>
- Veselkin D.V., Morozova L.M., Gorbunova A.M. 2021. Decrease of NDVI Values in the Southern Tundra of Yamal in 2001-2018 Correlates with the Size of Domesticated Reindeer Population. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 18(2): 143–155 (in Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-2-143-155>
- Golovnev A.V., Abramov I.V. 2014. REINDEER AND GAS: Development Strategies of Yamal. Vestnik Arheologii, Antropologii i Etnografii, 4(27): 122–131 (in Russian).
- Elsakov V.V., Shhanov V.M. 2019. Current Changes in Vegetation Cover of Timan Tundra Reindeer Pastures from Analysis of Satellite Data. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 16(2): 128–142 (in Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-2-128-142>
- Kuljugina E.E. 2004. Flora i rastitel'nost' peschanyh obnazhenij Pripecherskih tundr [Flora and Vegetation of Sandy Outcrops of the Pripechersky Tundra]. Abstract. diss... cand. biol. sciences. Syktyvkar, 26 p.
- Lipiski S.A. 2018. The Condition of Reindeer Pastures in the Arctic Zone of the Russian Federation, the Major Factors of Their Degradation and the Measures to Ease the Situation. Izvestia VUZOV. Geodesy and aerophotosurveying, 62(6): 695–702 (in Russian). <https://doi.org/10.30533/0536-101X-2018-62-6-695-702>
- Morozova L.M., Magomedova M.A. 2006. Vliyanie vypasa oleney na resursnyj potencial rastitel'nogo pokrova [The Impact of Reindeer Grazing on the Resource Potential of Vegetation Cover]. Poluostrov Jamal: rastitel'nyj pokrov [Yamal Peninsula: Vegetation Cover]. Tyumen, Siti-press: 235–247.
- Panina N.A. 1972. Resursy poverhnostnyh vod SSSR [Surface Water Resources of the USSR]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 15: 55–60.
- Skrickaya M., Petrov Yu. 2024a. The Impact of Reindeer Husbandry on the Environment of the Yamal Peninsula in the Era of Oil and Gas Development. Energy policy, 8(199): 58–79 (in Russian). https://doi.org/10.46920/2409-5516_2024_8199_58
- Skritskaya M.K., Petrov Y.V. 2024b. Ecological Aspects of the Traditional Environmental Management Organization in a Resource-Extracting Region. Arctic: Ecology and Economy, 14(1): 80–89. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2024-1-80-89>
- Fakhretdinov A.V., Tigeev A.A. 2023. Assessment of the Vegetation Dynamics of Reindeer Pastures in the Yamal Peninsula Using a Semi-Automatic Classification Method of Satellite Images. Geographical Bulletin, 3(66): 106–119 (in Russian). <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2023-3-106-119>
- Homich L.V. 1995. Nency [Nenets]. Saint-Petersburg, Publ. Russkij dvor, 336 p.
- Yuzhakov A.A. 2016. Problemy jekologii i monitoring olenevodstva na Jamale [Problems of Ecology and Monitoring of Reindeer Herding in Yamal]. In: Ekologiya drevnikh i traditsionnykh obshchestv



[Ecology of Ancient and Traditional Societies]. Proceedings of the V International scientific conference, Tyumen, 7–11 November 2016. Tyumen, Publ. Tyumen State University: 269–274.

Yuzhakov A.A., Deter G.F. 2020. Transformation of Reindeer Farming Under the Market Economy Conditions (on the Example of Yamal). Arctic: Ecology and Economy, 4(40): 139–150 (in Russian). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-4-139-150>

Golovatin M.G., Morozova L.M., Ektova S.N., Paskhalny S.P. 2010. The Change of Tundra Biota at Yamal Peninsula (the North of the Western Siberia, Russia) in Connection with Anthropogenic and Climatic Shifts. In: Tundra's: Vegetation, Wildlife and Climate trends. Ed. by Gutierrez B., Pena C. New York, Nova Science Publishers: 1–46.

*Поступила в редакцию 20.08.2024;
поступила после рецензирования 19.09.2024;
принята к публикации 25.11.2024*

*Received August 20, 2024;
Revised September 19, 2024;
Accepted November 25, 2024*

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

Скрицкая Маргарита Константиновна, бакалавр кафедры геоэкологии и природопользования, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия

Петров Юрий Владимирович, кандидат географических наук, доцент кафедры геоэкологии и природопользования, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Margarita K. Skritskaya, Bachelor of Science, Department of Geoecology and Nature Management, Tyumen State University, Tyumen, Russia

Yuriy V. Petrov, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor of the Department of Geoecology and Nature Management, Tyumen State University, Tyumen, Russia



УДК 631.412
DOI 10.52575/2712-7443-2024-48-4-616-627

Кислотно-основная буферность почв разного гранулометрического состава в условиях загрязнения тяжелыми металлами

**Замулина И.В., Ларина Э.В., Бурачевская М.В., Лацынник Е.С.,
Минкина Т.М., Манджиева С.С.**

Южный федеральный университет,
Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, просп. Стачки, 194/1
E-mail: marina.0911@mail.ru

Аннотация. Для изучения влияния гранулометрического состава на кислотно-основные свойства почвы и почвенно-песчаных субстратов при их модельном загрязнении Pb, Cd и As исследована буферность к основанию и кислоте методом непрерывного потенциометрического титрования водных суспензий. По кривым титрования рассчитана буферность по интервалам значений pH и построены диаграммы зависимости этой величины от pH. При изменении степени кислотности или щелочности почвенного раствора активируются буферные процессы, связанные с участием компонентов твердой фазы почвы. Участниками кислотно-основных буферных реакций в диапазоне pH от 4,2 до 8 в основном являются катионообменная емкость почвы, карбонаты и силикаты почвы. При увеличении доли песка в гранулометрическом составе почв кислотно-основная буферная емкость снижается, вследствие чего снижается способность противостоять подкислению в условиях загрязнения Cd, Pb, As за счет гидролиза и вытеснения протонов из почвенного поглощающего комплекса в результате обменных процессов с катионами. Характер зависимости определяется составом твердой фазы, присутствием в ней карбонатов и обменных катионов. Для оценки качественного состояния почвы эффективным критерием можно считать изменение параметров кислотно-основной буферности.

Ключевые слова: буферная способность, чернозем южный, почвенные субстраты, физико-химические свойства, кислотность

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-24-00646) в Южном федеральном университете.

Для цитирования: Замулина И.В., Ларина Э.В., Бурачевская М.В., Лацынник Е.С., Минкина Т.М., Манджиева С.С. 2024. Кислотно-основная буферность почв разного гранулометрического состава в условиях загрязнения тяжелыми металлами. Региональные геосистемы, 48(4): 616–627. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-616-627

Acid-Base Buffering of Soils with Different Granulometric Composition in the Conditions of Heavy Metal Pollution

**Inna V. Zamulina, Elvira V. Larina, Marina V. Burachevskaya,
Elizaveta S. Lacynnik, Tatiana M. Minkina, Saglara S. Mandzhieva**

Southern Federal University
194/1 Stachki Av, Rostov-on-Don 344090, Russia
E-mail: marina.0911@mail.ru

Abstract. The acid-base buffering capacity of soils and soil-sandy substrates was studied with a view to investigating the effect of the granulometric composition on their acid-base properties under the model contamination with Pb, Cd, and As. The method of continuous potentiometric titration of aqueous suspensions was applied. The titration curves were used to calculate the buffering over the pH value intervals. The authors provide diagrams to show the buffering value dependence on pH. The research findings reveal that when a soil solution is acidified or alkalinized, buffer mechanisms are triggered with

the participation of certain components of the soil solid phase. The participants of acid-alkaline buffer reactions in the pH range from 4.2 to 8 are mainly the soil cation exchange capacity, soil carbonates and silicates. With an increase in the proportion of sand in the granulometric composition of soils, the acid-base buffer capacity decreases, resulting in a reduced ability to resist acidification in conditions of Cd, Pb, and As pollution, due to hydrolysis and displacement of protons from the soil absorbing complex, the latter being caused by exchange processes with cations. The nature of the dependence is determined by the composition of the solid phase, the presence of carbonates and exchange cations in it. The authors suggest that a change in the acid-base buffering parameters may be used as an objective criterion for assessing the qualitative condition of soil.

Keywords: Buffering capacity, Haplic Chernozem, soil substrates, physico-chemical properties, acidity

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-24-00646) at the Southern Federal University.

For citation: Zamulina I.V., Larina E.V., Burachevskaya M.V., Lacynnik E.S., Minkina T.M., Mandzhieva S.S. 2024. Acid-Base Buffering of Soils with Different Granulometric Composition in the Conditions of Heavy Metal Pollution. *Regional Geosystems*, 48(4): 616–627. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-616-627

Введение

Методы оценки экологического состояния через изучение функционирования буферных систем играют важную роль в контроле трансформационных изменений в почвах. Изменения pH почв имеют прямое влияние на экологическую устойчивость, а кислотно-основные буферные системы играют ключевую роль в поддержании постоянного pH. Реакция почвенного раствора зависит от суммарного действия нескольких факторов: минералогического состава, наличия содержания свободных солей, химического состава минеральной части почвы, качества и количества органического вещества, влажности почвы, жизнедеятельности почвенной биоты [Русакова и др., 2012; Соколова и др., 2012; Надточий, Мыслыва, 2014; Ковалев, Ковалева, 2020].

Кислотно-основные свойства почв являются фактором, влияющим на подвижность и доступность металлов в почве [Perelomov et al., 2021]. В щелочных условиях при высоком содержании органических веществ, емкости катионного обмена и карбонатов металлы образуют осадки гидроксидов и прочно адсорбируются твердой фазой почв, что снижает их подвижность. Отрицательный заряд на поверхности глинистых минералов, гидратированных оксидов и органического вещества будет увеличиваться по мере увеличения pH почвы, что усиливает адсорбцию ионов ТМ и снижает концентрацию их в почвенном растворе [Шабанов, Маричев, 2020; Shabanov et al., 2024]. При снижении pH системы отрицательный заряд почвенных коллоидов снижается, конкурентный эффект H^+ усиливается, в результате чего увеличивается растворимая и обменная фракции металлов [Медведев, Деревягин, 2017; Perelomov et al., 2021]. Кислотно-основная буферность, как способность почв противостоять изменению pH в условиях загрязнения тяжелыми металлами, может быть использована для оценки экологического состояния почв [Козлова, Керимадзе, 2020; Головатый и др., 2021].

Цель работы – изучить изменения параметров кислотно-основной буферности почвы различного гранулометрического состава при модельном загрязнении Cd, Pb и As, что позволит учитывать регуляторную функцию почв при экологическом нормировании.

Объекты и методы исследования

Кислотно-основная буферность почв различного гранулометрического состава была исследована в рамках экспериментального модельного опыта с верхним слоем черно-



зема (0–20 см) южного среднемощного тяжелосуглинистого. Образцы почвы отбирались в Миллеровском районе Ростовской области на фоновом участке, не подверженном антропогенному влиянию (согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017¹) (табл. 1). Черноземы южные являются преобладающим подтипом почв данного района и занимают более 70 % территории [Безуглова, Хырхырова, 2008].

Таблица 1
Table 1

Физико-химические свойства чернозема южного
Physico-chemical properties of Haplic Chernozem

Горизонт, глубина в см	рН	Физическая глина (<0,01 мм)	Ил (<0,001 мм)	Сорг	CaCO ₃	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	ЕКО
		%					смоль·кг ⁻¹
А, 0–20	7,5	49,3	24,6	2,9	0,3	35,9	36,5

Для проведения модельного эксперимента в сосуды с дренажем помещали по 2 кг воздушно-сухой почвы, предварительно очищенной от крупных органических остатков, измельченной пестиком с резиновым наконечником и просеянной через сито с размером ячеек 2 мм. В соответствии с экспериментальной схемой (табл. 2) в почву добавляли нитраты Pb, Cd и As в форме арсената натрия. Дозы загрязнения отражали невысокий (2 ОДК), средний (5 ОДК) и высокий (10 ОДК) уровень загрязнения почвы [Minkina et al., 2017] (ОДК Pb = 130 мг/кг; ОДК Cd = 2 мг/кг; ОДК As = 10 мг/кг по СанПиН 1.2.3685-21). (ОДК Pb = 130 мг/кг; ОДК Cd = 2 мг/кг; ОДК As = 10 мг/кг)². Для того, чтобы выяснить совместный эффект загрязнения на высокой дозе загрязнения (10 ОДК) были заложены варианты с полиэлементным загрязнением Pb, Cd и As. Варианты опыта отражали почвы с различным гранулометрическим составом и содержанием органического вещества, карбонатов и рН при помощи создания почвенных субстратов путем разбавления кварцевым песком в разных соотношениях (25, 50 и 75 % от массы почвы) (см. табл. 2). Почвенные образцы инкубировали в течение 6 месяцев при влажности, составляющей 60 % от полной влагоемкости, при температуре +20–22°C и естественном освещении.

Для изучения влияния кислотно-основных свойств почв на трансформацию ТМ и As в почвах и их субстратах была проведена оценка буферности методом непрерывного потенциометрического титрования водных суспензий. Титрование выполнялось в суспензиях при соотношении почва : вода 1 : 25 до значения рН 3 при титровании кислотой (0,1 н. HCl) и до рН 10 при титровании основанием (0,1 н. NaOH). Титрант вводили порциями по 0,2 мл, регистрируя изменение рН через 4 минуты после каждой добавки. На основе полученных данных построены кривые титрования, а величины общей буферности к кислоте и основанию определены как объем титранта, необходимый для достижения рН 3 и 10 на единицу массы почвы, соответственно [Соколова и др., 2012].

Для оценки изменения кислотно-основной буферности при воздействии Cd, Pb, As были выбраны варианты совместного внесения 10 ОДК в условиях разбавления песком 0–75 %. По кривым титрования рассчитана буферность по интервалам значений рН и построены диаграммы зависимости этой величины от рН.

¹ ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. 2019. М., Стандартинформ, 12 с.

² СанПиН 1.2.3685-1. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Электронный ресурс. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 28.10.2024)

Таблица 2
Table 2Схема модельного опыта с загрязнением почв и разбавлением песком
Scheme of the model experiment with soil contamination and sand dilution

№	Варианты опыта
1	Контроль
2	Контроль + 25 % песка
3	Контроль + 50 % песка
4	Контроль + 75 % песка
5	2 ОДК Pb / Cd / As
6	2 ОДК Pb / Cd / As + 25 % песка
7	2 ОДК Pb / Cd / As + 50 % песка
8	2 ОДК Pb / Cd / As + 75 % песка
9	5 ОДК Pb / Cd / As
10	5 ОДК Pb / Cd / As + 25 % песка
11	5 ОДК Pb / Cd / As + 50 % песка
12	5 ОДК Pb / Cd / As + 75 % песка
13	10 ОДК Pb / Cd / As
14	10 ОДК Pb / Cd / As + 25 % песка
15	10 ОДК Pb / Cd / As + 50 % песка
16	10 ОДК Pb / Cd / As + 75 % песка
17	10 ОДК Pb + Cd + As
18	10 ОДК Pb + Cd + As + 25 % песка
19	10 ОДК Pb + Cd + As + 50 % песка
20	10 ОДК Pb + Cd + As + 75 % песка

Результаты и их обсуждение

Изменение рН чернозема южного в условиях модельного опыта

По результатам модельного опыта выявлено снижение рН при моно- и полиэлементном загрязнении Cd, Pb, As по сравнению с контролем (рис. 1). Особенно ярко этот эффект проявляется в условиях полиметалльного загрязнения и облегчения гранулометрического состава. При внесении дозы 2 ОДК снижение рН незначительно и не превышает $0,2 \pm 0,04$ единицы, в то время как для дозы 10 ОДК Cd, Pb, As эта разница составляет $0,5 \pm 0,09$ единиц. При загрязнении в дозе 10 ОДК разница рН между вариантами без внесения песка и 75 % песка составляет 1,7 единиц.

В литературе описан факт снижения рН с увеличением доли металла в почве [Понизовский, Мироненко, 2001; Медведев, Деревягин, 2017; Белопухов и др., 2020; Шабанов, Маричев, 2020]. При высоком уровне загрязнения разница между рН исходных и конечных растворов может достигать 2,5–3,0 единиц и сохраняться стабильной на протяжении длительного времени [Pinskii et al., 2018]. Характер зависимости определяется составом твердой фазы, присутствием в ней карбонатов и обменных катионов [Шабанов, Маричев, 2020; Гукалов, Савич, 2021]. С увеличением доли песка количество этих компонентов снижается, в связи с чем подкисляющая роль ТМ увеличивается. Подкисление почв в условиях загрязнения ТМ обусловлено двумя процессами: гидролизом катионов ТМ в растворе и вытеснением протонов из почвенного поглощающего комплекса в результате обменных процессов с катионами ТМ. Гидролиз ТМ сопровождается образованием гидротализованных форм, таких как $Me(OH)$, что приводит к связыванию анионов OH^- и, как следствие, снижению рН [Савич и др., 2017; Pinskii et al., 2018].

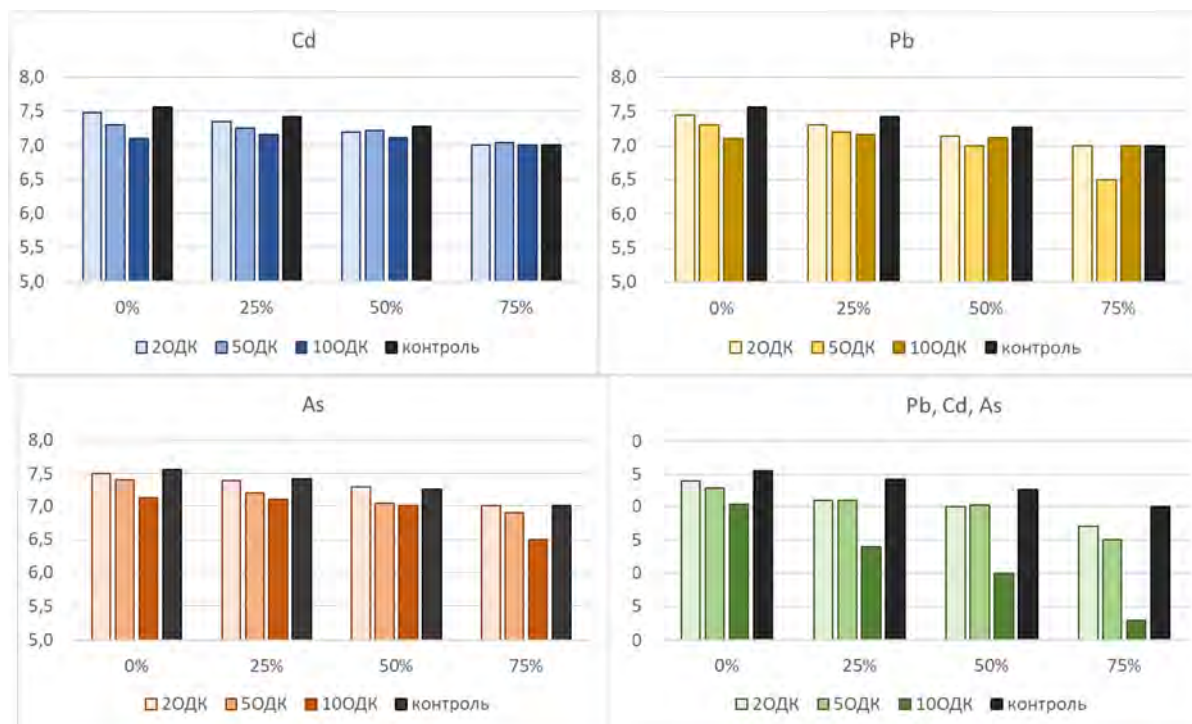


Рис. 1. Изменение pH почв с моделируемым гранулометрическим составом и при загрязнении Pb, Cd и As

Fig. 1. Change in the pH of soils with simulated granulometric composition and with Pb, Cd and As contamination

Кислотно-основная буферность чернозема южного в условиях модельного опыта

В виду максимально выраженных изменений pH при совместном загрязнении Cd, Pb, As в дозе 10 ОДК в условиях разбавления песком 0–75 % именно эти варианты были выбраны для оценки изменения кислотно-основной буферности. По результатам непрерывного потенциометрического титрования построены кривые титрования (рис. 2) и оценена величина общей буферности (рис. 3).

Физико-химические свойства чернозема южного обуславливают высокую устойчивость к подкислению. Наиболее высокой буферной способностью характеризуются тяжелые хорошо гумусированные почвы с высокой удельной поверхностью, высоким содержанием обменных оснований [Соколова и др., 2012]. При этом буферность к кислоте существенно превышает суммарное содержание обменных оснований, что объясняется действием дополнительных буферных механизмов, помимо вытеснения протонами обменных оснований. В то же время общая буферность к основаниям на изученных вариантах опыта оказалась значительно ниже, чем кислотная.

С облегчением гранулометрического состава общая буферность по отношению к кислоте и щелочи снижается более чем 75 % по сравнению с контрольным образцом (до 12 и 11 смоль/кг, соответственно), в связи с уменьшением количества органического вещества, обменных оснований, карбонатов и функциональных групп. Высокая буферная способность наблюдается в тех случаях, когда концентрации компонентов буферного раствора значительно превышают количество сильных кислот или щелочей, вводимых в систему. Внесение 10 ОДК Cd, Pb, As снижает показатель общей буферности по отношению к кислоте и основанию на 23–25 % на варианте с внесением 25 % песка (см. рис. 2).

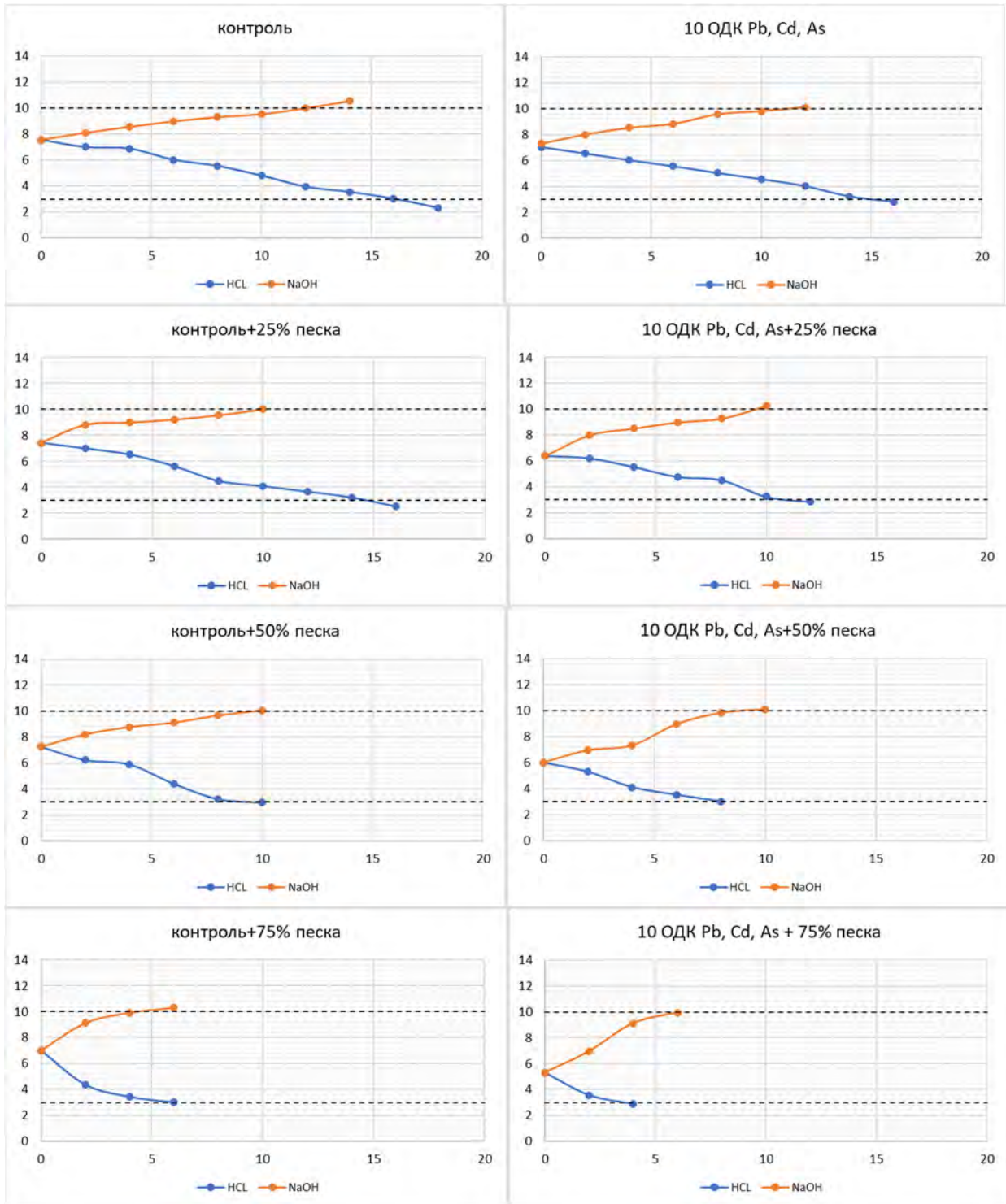


Рис. 2. Кривые потенциометрического титрования почв с моделируемым гранулометрическим составом и при загрязнении Pb, Cd и As
Fig. 2. Potentiometric titration curves of soils with simulated granulometric composition and with Pb, Cd and As contamination

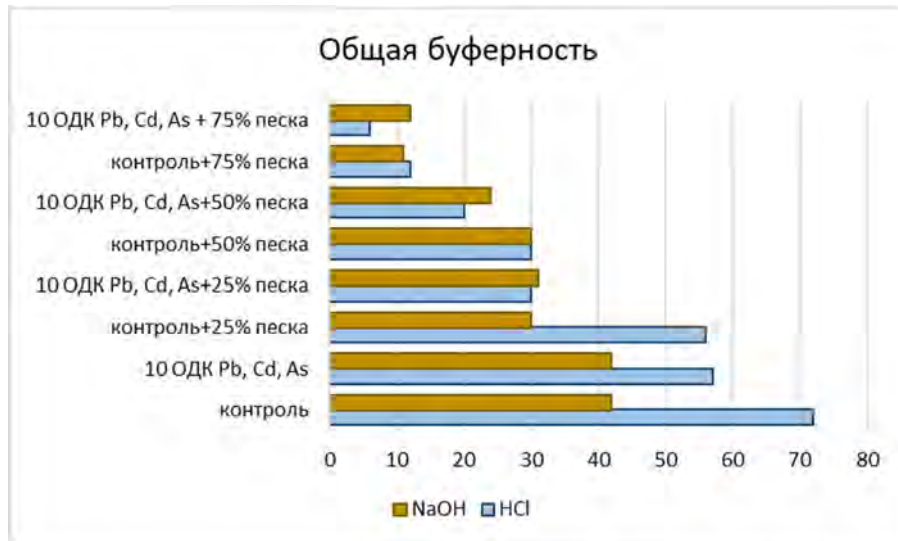


Рис. 3. Общая буферность почв с моделируемым гранулометрическим составом и при загрязнении Pb, Cd и As

Fig. 3. Total buffering of soils with simulated granulometric composition and with Pb, Cd and As contamination

В результате потенциометрического титрования выявлено, что суммарная буферность чернозема южного максимальна и составляет по отношению к кислоте 72 смоль/кг по отношению к основанию 42 смоль/кг (см. рис. 3).

Общая буферность к основаниям на вариантах опыта значительно ниже кислотной. В карбонатных почвах увеличение содержания протонов компенсируется растворением карбоната кальция, тогда как избыток гидроксид-ионов уравнивается образованием карбоната кальция [Русакова и др., 2012].

По кривым титрования рассчитана буферность по интервалам значений pH и построены диаграммы зависимости этой величины от pH (рис. 4).

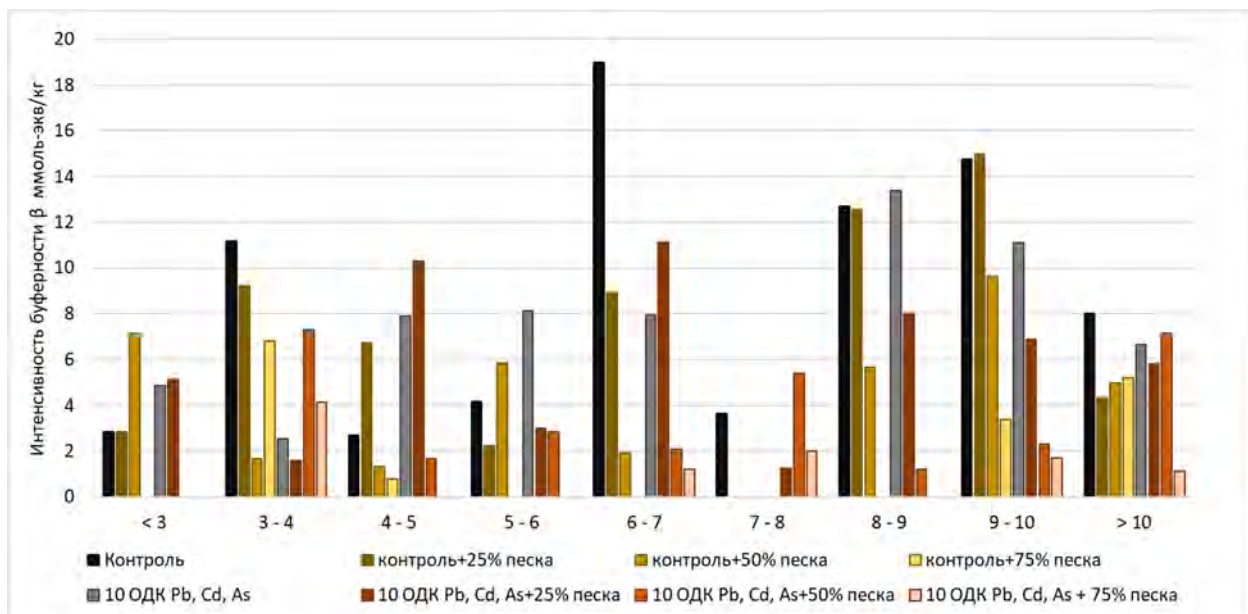


Рис. 4. Структура буферности к кислоте и к основанию чернозема южного разного гранулометрического состава при загрязнении Pb, Cd и As в условиях модельного опыта

Fig. 4. Structure of acid/base buffering of soils with simulated granulometric composition and with Pb, Cd and As contamination

Для теоретического обоснования буферности по отношению к кислотам широко используется концепция буферных систем Б. Ульриха [Соколова и др., 2012], которая отражает доминирующие буферные механизмы в зависимости от величины рН. График зависимости интенсивности буферности, построенный по кривой титрования с шагом изменения рН в 1 единицу, позволяет оценить структуру буферности и выявить присутствие различных буферных компонентов. Можно выделить процессы, связанные с участием минеральных компонентов почвы, специфических и неспецифических органических соединений, а также органо-минеральных комплексов [Покатилова, 2008; Дмитраков и др., 2012; Головатый и др., 2021; Гукалов и др., 2021].

Диапазон значений рН почвенного раствора от 6,2 до 8,6 соответствует карбонатной буферной системе, где основным механизмом, обеспечивающим буферность, является быстро протекающая реакция растворения карбонатов. Именно этой зоне соответствует максимальная интенсивность вариантов опыта без разбавления и с разбавлением песка до 50 %, при этом степень загрязнения влияния не оказывает. Интервал значений рН 5–6,2 относится к силикатной буферной зоне, где доминирующей буферной реакцией является растворение силикатов. Емкость этой зоны можно считать неограниченной ввиду большого количества силикатов в минералогическом составе почв. Данная зона присутствует для всех вариантов опыта. Интервал значений рН 4,2–5 соответствует катионно-обменной буферной зоне. Доминирующая реакция – вытеснение протоном обменных оснований из ППК. В условиях загрязнения данная зона имеет большую выраженность.

Также при взаимодействии с кислотой происходят реакции протонирования гидроксильных групп, находящихся на поверхности частиц боковых сколов глинистых кристаллитов, которые присутствуют в составе тонких фракций [Русакова и др., 2012].

При $\text{pH} < 4,2$ происходит вытеснение протоном в раствор алюминия, который в исходных образцах может быть представлен тонкодисперсными аморфными гидроксидами, комплексами Al с органическими лигандами, прослойками гидроксида Al в почвенных хлоритах, а также Al в кристаллических решетках других глинистых минералов [Соколова и др., 2012; Соколова и др., 2016; Савич и др., 2017]. Буферность в данном диапазоне рН сохраняется даже при максимальном разбавлении почвы кварцевым песком на 75 % и усиливается под воздействием загрязняющих веществ.

При взаимодействии с основанием происходит депротонирование зависимых от рН-зависимых обменных позиций. Для южного чернозема (контроль), характеризующегося высоким содержанием органического вещества, основной буферной реакцией при титровании основанием является депротонирование функциональных групп органических кислот, соответствующее их значениям рКа. В диапазоне рН до 7 титруются карбоксильные группы, а в диапазоне рН 7–8 – преимущественно группы NH_2 , тогда как при $\text{pH} > 9$ – фенольные гидроксилы [Русакова и др., 2012; Соколова и др., 2016]. Также до рН 8,6 действует карбонатная зона, где нейтрализация избытка гидроксид ионов происходит за счет образования карбоната кальция [Покатилова, 2008].

Кроме того, при титровании основанием суспензий органогенных горизонтов происходит буферная реакция увеличения основности и растворимости алюмоорганических и железо-органических комплексов. В вариантах опыта с добавлением 75 % песка и загрязнением буферная способность к основаниям оказывается выше, чем к кислотам. НТТ в этом случае составляет 5,30 единицы. Значения рН точки нулевого заряда гидроксидов железа и алюминия находятся в области > 7 [Русакова и др., 2012; Shabanov et al., 2024], поэтому при титровании до рН 10 эти группы демонстрируют выраженные буферные свойства по отношению к основаниям.



Заключение

Показатели кислотно-основной буферности определяют способность почв сохранять стабильный рН в изменяющихся экологических условиях, особенно антропогенного воздействия. Чернозем южный характеризуется высокой устойчивостью к подкислению, что объясняется его физико-химическими свойствами. Выявлено снижение рН при моно- и полиэлементном загрязнении почв Cd, Pb, As по сравнению с контролем. Особенно ярко этот эффект проявляется в условиях полиметалльного загрязнения и облегчения гранулометрического состава. С облегчением гранулометрического состава общая буферность по отношению к кислоте и щелочи уменьшается более чем 75 % по сравнению с исходным почвенным образцом. Влияние загрязнения тяжелыми металлами на кислотно-основную буферность заключается в смещении буферных зон в диапазон более низких значений рН, что становится особенно заметно с облегчением гранулометрического состава. Основными процессами устойчивости к подкислению в таких условиях являются растворение карбонатов и силикатов и вытеснение обменных оснований из ППК протоном. Увеличение кислотности снижает плодородие почв, увеличивается подвижность катионов щелочно-земельных металлов, что снижает их долю в почвенном поглощающем комплексе; также тяжелых металлов, что способствует загрязнению сопредельных сред. Выделение основных буферных зон рН отражает эколого-геохимический потенциал почв. Практическое применение анализа кислотно-основной буферности почв имеет важное значение для определения способности почвенной среды смягчать воздействие загрязнителей кислотной или щелочной природы и осуществить переход к оценке устойчивости ландшафтов на основании параметров компонентов экосистем. Рассмотрение экологического состояния через призму химических процессов, происходящих в почве, является необходимым шагом для разработки мер по ее защите и восстановлению.

Список литературы

- Безуглова О.С., Хырхырова М.М. 2008. Почвы Ростовской области. Ростов-на-Дону, Изд-во ЮФУ, 352 с.
- Белопухов С.Л., Савич В.И., Байбеков Р.Ф. 2020. Комплексообразование ионов металлов в почвенных растворах. *Агрофизика*, 1: 1–8. <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2020.01.01>
- Головатый С.Е., Хилимончик П.Р., Савченко С.В., Кузьмич А.Н., Дузинчук В.Д. 2021. Подходы к экологическому нормированию тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных земель. В кн.: Сахаровские чтения 2021 года: Экологические проблемы XXI века. Материалы 21-й международной научной конференции, Минск, 20–21 мая 2021. Минск, ИВФ Минфина: 162–166. <https://doi.org/10.46646/SAKH-2021-2-162-166>
- Гукалов В.В., Савич В.И. 2021. Оценка свойств, процессов и режимов кислотно-основного состояния дерново-подзолистых почв. *Агроэкоинфо*, 1(43): 15. <https://doi.org/10.51419/20211110>
- Гукалов В.В., Савич В.И., Поляков А.М. 2021. Интегральная оценка кислотно-основного и окислительно-восстановительного состояния системы почва-растение. В кн. Почвы – стратегический ресурс России. Доклады VIII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв, Сыктывкар, 22 апреля – 08 июня 2021. Москва – Сыктывкар, ИЮБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН: 78–87.
- Дмитраков Л.М., Дмитракова Л.К., Пинский Д.Л., Самсонова В.П. 2012. Буферность почв и нормирование в них тяжелых металлов. *Проблемы агрохимии и экологии*, 1: 53–56.
- Ковалев И.В., Ковалева Н.О. 2020. Экологические функции почв и вызовы современности. *Экологический вестник Северного Кавказа*, 16(2): 4–16.
- Козлова Н.В., Керимзаде В.В. 2020. Использование показателей кислотно-основной буферности в оценке состояния агрогенно-измененных бурых лесных почв Черноморского побережья Западного Кавказа. *Проблемы агрохимии и экологии*, 3: 44–50. <https://doi.org/10.26178/AE.2020.46.87.002>
- Медведев И.Ф., Деревягин С.С. 2017. Тяжелые металлы в экосистемах. Саратов, Ракурс, 178 с.

- Надточий П.П., Мыслыва Т.Н. 2014. Эталонные величины кислотно-основной буферности дерново-подзолистых почв для фонового мониторинга. *Агрохимия*, 3: 83–89.
- Покатилова А.Н. 2008. Кислотно-основная буферность черноземных почв Южного Зауралья и её изменение при антропогенном воздействии. Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Челябинск, 19 с.
- Понизовский А.А., Мироненко Е.В. 2001. Механизмы поглощения свинца (II) почвами. *Почвоведение*, 4: 418–429.
- Русакова Е.С., Ишкова И.В., Толпешта И.И., Соколова Т.А. 2012. Кислотно-основная буферность почв транзитных и транзитно-аккумулятивных позиций ненарушенных ландшафтов Южной тайги. *Почвоведение*, 5: 562–573.
- Савич В.И., Белопухов С.Л., Подволоцкая Г.Б., Бакланова А.А., Гукалов В.В. 2017. Влияние эффектов протонирования и гидратообразования на вытеснение марганца за счет комплексообразования на дерново-подзолистых почвах. *Бутлеровские сообщения*, 52(12): 46–51.
- Соколова Т.А., Толпешта И.И., Русаков Е.С. 2016. Вклад отдельных реакций в формирование кислотно-основной буферности почв пойм ручьев (Центрально-лесной государственный заповедник). *Почвоведение*, 4: 434–447. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16040134>
- Соколова Т.А., Толпешта И.И., Трофимов С.Я. 2012. Почвенная кислотность. Кислотно-основная буферность почв. Соединения алюминия в твердой фазе почвы и в почвенном растворе. Тула, Гриф и К, 124 с.
- Шабанов М.В., Маричев М.С. 2020. Адсорбция Zn, Cd, Pb, Cu в почвах, подверженных техногенной активности, на примере Красноуральского промузла. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 5(1): 79–89.
- Minkina T.M., Nevidomskaya D.G., Pol'shina T.N., Fedorov Y.A., Mandzhieva S.S., Chaplygin V.A., Bauer T.V., Burachevskaya M.V. 2017. Heavy Metals in the Soil-Plant System of the Don River Estuarine Region and the Taganrog Bay Coast. *Journal of Soils and Sediments*, 17(5): 1474–1491. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1381-x>
- Perelomov L., Atroshchenko Y., Mukhtorov L., Sarkar B., Pinsky D., Perelomova I., Mazur A. 2021. Trace Elements Adsorption by Natural and Chemically Modified Humic Acids. *Environmental Geochemistry and Health*. 43(1): 127–138. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00686-0>
- Pinskii D.L., Minkina T.M., Bauer T.V., Nevidomskaya D.G., Mandzhieva S.S., Burachevskaya M.V. 2018. Copper Adsorption by Chernozem Soils and Parent Rocks in Southern Russia. *Geochemistry International*, 56(3): 266–275. <https://doi.org/10.1134/S0016702918030072>
- Shabanov M.V., Marichev M.S., Minkina T.M., Sokolov A.A. 2024. Oxidation of Man-Made Mineral Formations with Acid Waste Water at Sulphide-Containing Waste Dumps: A Case-Study of Karabash agglomeration. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 4: 69–85. <https://doi.org/10.25018/0236149320244069>

References

- Bezuglova O.S., Hyrhyrova M.M. 2008. *Pochvy Rostovskoj oblasti [Soils of the Rostov Region]*. Rostov-na-Donu, Publ. JuFU, 352 p.
- Belopuhov S.L., Savich V.I., Baybekov R.F. 2020. Complex Formation of Metal Ions in Soil Solutions. *Agrophysica*, 1: 1–8 (in Russian). <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2020.01.01>
- Golovaty S.E., Khilimonchik P.R., Savchenko S.V., Kuzmich A.N., Duzinchuk V.D. 2021. Approaches to Ecological Rating of Heavy Metals in Agricultural Lands. In: *Sakharov Readings 2021: Environmental Problems of the 21st Century. Proceedings of the 21st International Scientific Conference*, Minsk, 20–21 May 2021. Minsk, Publ. IVF Minfina: 162–166 (in Russian). <https://doi.org/10.46646/SAKH-2021-2-162-166>
- Gukalov V.V., Savich V.I. 2021. Evaluation of Properties, Processes and Modes of Acid-Base Conditions on Sod-Podzolic Soils. *AgroEcoInfo*, 1(43): 15 (in Russian). <https://doi.org/10.51419/20211110>
- Gukalov V.V., Savich V.I., Poljakov A.M. 2021. Integral'naja ocenka kislotno-osnovnogo i oksislitel'no-vosstanovitel'nogo sostojaniya sistemy pochva-rastenie [Integral Assessment of Acid-Base and Oxidation-Reduction State of the Soil-Plant System]. In: *Pochvy – strategicheskij resurs Rossii [Soils are a Strategic Resource of Russia]*. Reports of the VIII Congress of the V.V. Dokuchaev Soil Science Society and the School of Young Scientists on Soil Morphology and Classification, Syktyvkar, 22 April – 08 June 2021. Moscow – Syktyvkar, Publ. IJuB FIC Komi NC UrO RAN: 78–87.



- Dmitrakov L.M., Dmitrakova L.K., Pinsky D.L., Samsonova V.P. 2012. Soil Buffer Capacity and the Establishment of Heavy Metals Marginal Levels in Soils. *Agrochemistry and Ecology Problems*, 1: 53–56 (in Russian).
- Kovalev I.V., Kovaleva N.O. 2020. Ecological Functions of Soils and New Challenges. *The North Caucasus Ecological Herald*, 16(2): 4–16 (in Russian).
- Kozlova N.V., Kerimzade V.V. 2020. The Use of Indicators of Acid-Basic Buffering Capacity in the Assessment of the State of Agrogen-Changed Brown Forest Soils on the Black Sea Coast of the West Caucasus. *Agrochemistry and Ecology Problems*, 3: 44–50 (in Russian). <https://doi.org/10.26178/AE.2020.46.87.002>.
- Medvedev I.F., Derevjagin S.S. 2017. Heavy Metals in Ecosystems. Saratov, Publ. Rakurs, 178 p. (in Russian).
- Nadtochy P.P., Myslyva T.N. 2014. Standard Values of Acid-Basic Buffering Capacity of Soddy-Podzolic Soils for Background Monitoring. *Agrohimiâ*, 3: 83–89 (in Russian).
- Pokatilova A.N. 2008. Kislотно-osnovnaja bufernost' chernozemnyh pochv Juzhnogo Zaural'ja i ejo izmenenie pri antropogennom vozdejstvii [Acid-Base Buffering Capacity of Chernozem Soils of the Southern Trans-Urals and Its Change Under Anthropogenic Impact]. Abstract. dis. ... cand. agric. sciences. Cheljabinsk, 19 p.
- Ponizovskiy A.A., Mironenko E.V. 2001. Mehanizmy pogloshhenija svinca (II) pochvami [Mechanisms of Lead(II) Absorption by Soils]. *Pochvovedenie*, 4: 418–429.
- Rusakova E.S., Ishkova I.V., Tolpeshta I.I., Sokolova T.A. 2012. Acid-Base Buffering of Soils in Transitional and Transitional-Accumulative Positions of Undisturbed Southern-Taiga Landscapes. *Eurasian Soil Science*, 45(5): 503–513. <https://doi.org/10.1134/S1064229312050110>
- Savich V.I., Belopukhov S.L., Podvolotskaya G.B., Baklanova A.A., Gukalov V.V. 2017. Effect of Protonation and Hydrate Formation on the Displacement of Manganese Due to Complexation from Sod-Podzolic Soils. *Butlerov Communications*, 52 (12): 46–51.
- Sokolova T.A., Tolpeshta I.I., Rusakov E.S. 2016. Contributions of Separate Reactions to the Acid-Base Buffering of Soils in Brook Floodplains (Central Forest State Reserve). *Eurasian Soil Science*, 49(4): 399–411. <https://doi.org/10.1134/S1064229316040128>
- Sokolova T.A., Tolpeshta I.I., Trofimov S.Ja. 2012. Pochvennaja kislотnost'. Kislотно-osnovnaja bufernost' pochv. Soedinenija aljuminija v tverdoj faze pochvy i v pochvennom rastvore [Soil Acidity. Acid-Base Buffering Capacity of Soils. Aluminum Compounds in the Solid Phase of Soil and in the Soil Solution]. Tula, Publ. Grif and K, 124 p.
- Shabanov M.V., Marichev M.S. 2020 Adsorption of Zn, Cd, Pb, Cu in Soils Affected by Anthropogenic Activity, Case Study of the Krasnouralskiy Industrial Hub. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 5(1): 79–89 (in Russian).
- Minkina T.M., Nevidomskaya D.G., Pol'shina T.N., Fedorov Y.A., Mandzhieva S.S., Chaplygin V.A., Bauer T.V., Burachevskaya M.V. 2017. Heavy Metals in the Soil-Plant System of the Don River Estuarine Region and the Taganrog Bay Coast. *Journal of Soils and Sediments*, 17(5): 1474–1491. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1381-x>
- Perelomov L., Atroshchenko Y., Mukhtorov L., Sarkar B., Pinsky D., Perelomova I., Mazur A. 2021. Trace Elements Adsorption by Natural and Chemically Modified Humic Acids. *Environmental Geochemistry and Health*. 43(1): 127–138. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00686-0>
- Pinskii D.L., Minkina T.M., Bauer T.V., Nevidomskaya D.G., Mandzhieva S.S., Burachevskaya M.V. 2018. Copper Adsorption by Chernozem Soils and Parent Rocks in Southern Russia. *Geochemistry International*, 56(3): 266–275. <https://doi.org/10.1134/S0016702918030072>
- Shabanov M.V., Marichev M.S., Minkina T.M., Sokolov A.A. 2024. Oxidation of Man-Made Mineral Formations with Acid Waste Water at Sulphide-Containing Waste Dumps: A Case-Study of Karabash agglomeration. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 4: 69–85. <https://doi.org/10.25018/0236149320244069>

*Поступила в редакцию 03.11.2024;
поступила после рецензирования 02.12.2024;
принята к публикации 06.12.2024*

*Received November 03, 2024;
Revised December 02, 2024;
Accepted December 06, 2024*

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

Замулина Инна Валерьевна, старший преподаватель кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Ларина Эльвира Вагифовна, магистрант кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Бурачевская Марина Викторовна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории мониторинга биосферы Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Лацынник Елизавета Сергеевна, магистрант кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Минкина Татьяна Михайловна, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Манджиева Сагара Сергеевна, кандидат биологических наук, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории мониторинга биосферы Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Inna V. Zamulina, Senior Lecturer of the Department of Soil Science and Land Resources Assessment, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Elvira V. Larina, Master's student of the Department of Soil Science and Land Resources Assessment, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Marina V. Burachevskaya, Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher of Research Laboratory for Biosphere Monitoring, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Elizaveta S. Lacynnik, Master's student of the Department of Soil Science and Land Resources Assessment, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Tatiana M. Minkina, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Soil Science and Land Resources Assessment, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Saglara S. Mandzhieva, Candidate of Biological Sciences, Chief Researcher of the Research Laboratory of Biosphere Monitoring, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia



УДК 628.386
DOI 10.52575/2712-7443-2024-48-4-628-636

К вопросу обезвреживания и утилизации илового осадка очистных сооружений молочного производства

¹Боровлев А.Э.,^{1,2} Кайдалова А.С., ¹ Киреева-Гененко И.А.

¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

²ООО «ЭКОЛОГ-ПРОЕКТ»,

Россия, 308027, г. Белгород, ул. Пирогова, 36

E-mail: borovlev@bsuedu.ru, me@kaidalova.ru, genenko@bsuedu.ru

Аннотация. В настоящее время в молочной промышленности проблемным вопросом является обезвреживание и утилизация таких многотоннажных отходов, как иловый осадок очистных сооружений молокозаводов, характеризующихся высокой влажностью (около 95 %). Это обусловлено тем, что специализированные полигоны, согласно действующим санитарным правилам, могут принимать только осадок с влажностью менее 85 %. Длительное нахождение осадка на иловых картах приводит к его загниванию с выделением зловонного запаха, что обуславливает актуальность проведения исследований с целью обоснования оптимальной технологии обезвреживания илового осадка очистных сооружений молочного производства. Для достижения поставленной цели нами проведено исследование обезвреживания иловых осадков очистных сооружений молочного комбината с использованием автономного замкнутого деструктора низкого давления ДНД-350 производства ЗАО «СДМ-Орел». Эксперименты показали, что процесс парогазовой деструкции протекает с высокой эффективностью (уменьшение массы иловых осадков – более чем на 75 %). Выполненные оценки и ориентировочные расчеты позволяют заключить, что в проектировании и технологической схеме функционирования деструктора были применены все возможные меры, направленные на снижение негативного влияния на окружающую среду и соответствие современным стандартам экологической безопасности и охраны природы.

Ключевые слова: деструктор, иловый осадок очистных сооружений, отходы, термическое обезвреживание, экологически безопасный способ утилизации

Для цитирования: Боровлев А.Э., Кайдалова А.С., Киреева-Гененко И.А. 2024. К вопросу обезвреживания и утилизации илового осадка очистных сооружений молочного производства. Региональные геосистемы, 48(4): 628–636. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-628-636

To the Issue of Neutralization and Disposal of Sludge from Dairy Wastewater Treatment Plants

¹Andrey E. Borovlev, ^{1,2}Aleksandra S. Kaidalova, ¹Irina A. Kireeva-Genenko

¹Belgorod State National Research University, Russia,

85 Pobeda St, Belgorod 308015, Russia

²ECOLOG-PROJECT LLC, Russia,

36 Pirogov St, Belgorod 308027, Russia

E-mail: borovlev@bsuedu.ru, me@kaidalova.ru, genenko@bsuedu.ru

Abstract. Currently, a problematic issue in the dairy industry is the neutralization and disposal of sludge from dairy wastewater treatment facilities, a multi-tonnage waste with a high moisture content (about 95 %). This is due to the fact that according to current sanitary rules, specialized landfills can only accept sediment with moisture less than 85 %. A prolonged presence of sediment on sludge sites leads to its rotting with the

release of a fetid odor. It determines the relevance of conducting research to substantiate the optimal technology for neutralizing sludge. For these purposes, we studied the neutralization of sludge from the wastewater treatment facilities of a dairy plant using a DND-350 autonomous closed low-pressure destructor manufactured by SDM-Orel CJSC. Experiments revealed a high efficiency of combined-cycle gas destruction process, with a reduction in the mass of sludge deposits by over 75 %. The assessments and approximate calculations allow us to conclude that all possible measures aimed at reducing the negative impact on the environment and compliance with modern standards of environmental safety and nature protection were applied in the design and technological scheme of the destructor.

Keywords: destructor, sludge of wastewater treatment plants, waste, thermal neutralization, environmentally safe method of disposal

For citation: Borovlev A.E., Kaidalova A.S., Kireeva-Genenko I.A. 2024. To the Issue of Neutralization and Disposal of Sludge from Dairy Wastewater Treatment Plants. *Regional geosystems*, 48(4): 628–636. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-628-636

Введение

Молочная промышленность представляет собой сектор, в котором необходимо внедрение комплекса технических мероприятий для повышения экологической безопасности, направленных на поддержание баланса между биосферой и антропогенными воздействиями.

Молочные комбинаты, несмотря на то что они относятся к пищевой промышленности, играют большую роль в загрязнении окружающей среды. Так их очистные сооружения, используя эффективные технологии водоочистки, генерируют при этом отходы, которые сами по себе представляют угрозу еще большего загрязнения окружающей среды. Они образуются в результате смешения осадка биологических очистных сооружений и осадка механической очистки хозяйственно-бытовых и смешанных сточных вод. Осадок биологических очистных сооружений представляет собой сложную совокупность организованных организмов, неживой основы и связанных между собой метаболическими и трофическими процессами [Хенце и др., 2006].

В России осадки образуются в больших количествах (около 100 млн т. при начальной влажности до 98 %) и относятся к отходам IV класса опасности [Исхакова, Нургалиев, 2024].

Длительное нахождение осадка на иловых картах приводит к его загниванию с выделением зловонного запаха [Xia et al., 2022]. При этом процессе существенно снижается водоотдача осадка [Дремичева, 2021].

Проблема по обезвреживанию и утилизации илового осадка с исходной влажностью около 95 %, характерна для всех предприятий молочной промышленности, так как специализированные полигоны в соответствии с санитарными требованиями [СанПиН 1322-03, 2003] могут принимать только осадок с влажностью менее 85 %.

Цель данной работы – исследование и обоснование оптимальной технологии обезвреживания илового осадка очистных сооружений молочного производства с учетом экономических и геоэкологических аспектов проблемы утилизации многотоннажных отходов на предприятии.

Объекты и методы исследования

Анализ методов обработки иловых осадков основывался на комплексном подходе, включающем изучение как фондовых, так и опубликованных материалов, а также результаты экспериментальных исследований.

В настоящее время решение проблемы иловых осадков на предприятиях осуществляется преимущественно следующими методами:



- депонирование на иловых картах (складирование осадков на иловых картах для сушки в естественных условиях);
- компостирование иловых осадков;
- биологическая переработка илов очистных сооружений анаэробными микроорганизмами в метантенках;
- термическая обработка (технологическое сжигание или пиролиз илов) [Солодкова и др., 2012; Моран и др., 2017].

Депонирование на иловых картах и компостирование являются наиболее доступными способами утилизации иловых осадков. Однако складирование иловых осадков на картах для сушки в естественных условиях требует использования больших площадей, также это долгий по времени процесс (ил разлагается в течение 11–12 месяцев и более), что приводит к изменению фонового загрязнения атмосферного воздуха, распространению неприятных запахов, а также к бактериальному загрязнению почв [Воронов, Яковлев, 2006]. Таким образом, депонирование на иловых картах не является привлекательным ни экономически, ни экологически.

Компостирование – лучший способ добиться свойств, необходимых для выполнения требований, предъявляемых к осадку сточных вод при использовании его в качестве удобрения [ГОСТ 17.4.3.07-2001, 2001, Сюняев и др., 2005].

Иловый осадок полностью пригоден для компостирования и может использоваться в качестве удобрения (при наличии соответствующих сертификатов) [Зайнуллин, Галаяудинов, 2016].

Однако использование компостирования только для уменьшения объема осадка слишком дорого и неэффективно [Бегенджов, 2023]. Поэтому указанный метод является эффективным способом только при изготовлении из илового осадка полноценного удобрения. Серьезным недостатком рассматриваемого метода является сложность реализации процесса, особенно в холодное время года (с ноября по март).

Биологическая обработка осадка сточных вод анаэробными микроорганизмами в метантенках – это двухступенчатый процесс, в ходе которого органические примеси биохимически преобразуются в метан и углекислый газ [Латыпова, Севостьянова, 2015].

Для использования на предприятиях молочной промышленности указанный процесс имеет ряд сложностей, так как продуктом переработки ила является нативный биогаз и его использование в качестве топлива без предварительной очистки не представляется возможным так же, как и его сжигание в факеле [Кузнецов, Градова, 2006]. Наличие жиров в осадке обуславливает необходимость строительства метанреакторов значительных объемов, поскольку время их распада составляет от 20 до 30 суток. В связи с этим эффективность применения данного метода оказывается крайне низкой из-за высоких затрат на оборудование и эксплуатацию энергоносителей.

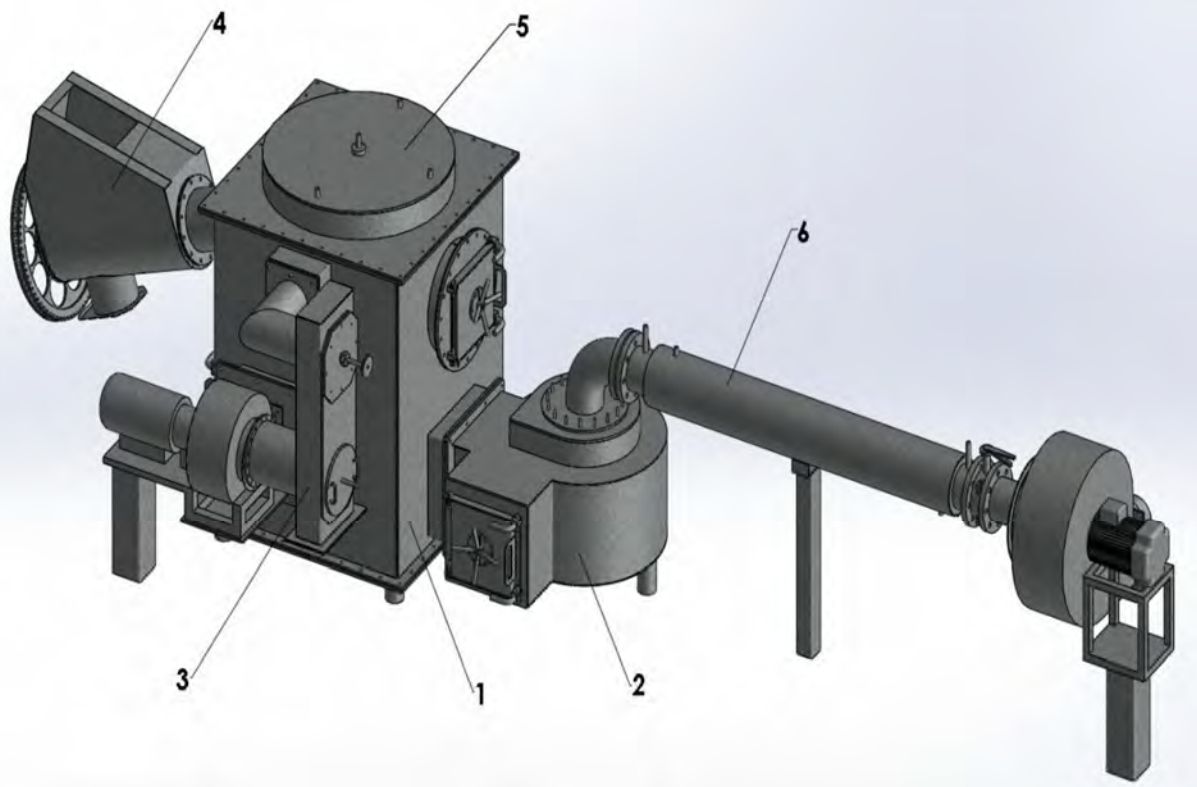
Термическая обработка является предпочтительной при переработке многотонного объема отходов. Основными преимуществами термической обработки осадка сточных вод являются уменьшение объема отходов (более чем на 70 %), значительное сокращение объема (более чем на 90 %) и возможность получения тепловой и электрической энергии, выделяемой при сжигании [Ручкинова, Зверева, 2020].

Таким образом, технологическое сжигание илов является наилучшим вариантом из всех проанализированных методов, так как значительно сокращает первоначальные объемы иловых осадков. В указанных целях нами рассмотрен один из перспективных способов утилизации иловых осадков очистных сооружений – метод парогазовой деструкции с противотоком, который вследствие своей низкзатратности и низкой чувствительности к составу топлива, может рассматриваться как один из возможных путей решения проблемы отходов [Моран и др., 2017].

Следует отметить, что до 2020 года в России исследований в части обезвреживания иловых осадков очистных сооружений на основе технологии парогазовой деструкции не

проводилось, и поэтому информация об указанной технологии не представлена в справочнике [ИТС-9-2020, 2020]. До настоящего времени работ по применению в России технологии парогазовой деструкции для обезвреживания илового осадка очистных сооружений молочного производства также не проводилось.

Исследование обезвреживания иловых осадков очистных сооружений молочного производства выполнено с использованием работы автономного замкнутого деструктора низкого давления ДНД-350 (далее – деструктор) производства ЗАО «СДМ-Орел» при сжигании осадков с иловых карт очистных сооружений молочного комбината г. Саранска на производственной площадке ООО «ЭКОЛОГ-ПРОЕКТ». Деструктор предназначен для предварительного разложения углеродосодержащего сырья большой влажности до 100 % на молекулярном уровне с последующим проведением термохимической конверсии, при которой выделяется тепловая энергия, и дальнейшей утилизацией этой тепловой энергии в топке водогрейного котла. Система вакуумирования обеспечивает постоянный вывод легких фракций парогазовой смеси и подачу ее в водогрейный теплообменник. Основные технологические узлы деструктора ДНД-350 представлены на рис. 1.



1 – реактор, 2 – камера дожига, 3 – система рециркуляции парогазовой смеси,
4 – загрузочная камера, 5 – сборник газов, 6 – система вакуумирования

Рис. 1. Основные технологические узлы деструктора ДНД-350
Fig. 1. The main technological nodes of the DND-350 destructor

Сырье, подлежащее обработке, подается в реактор сверху через загрузочную камеру. Воздух и пар подаются снизу. Продуктовый газ отводится в верхней части реактора, а зольный остаток выгружается в нижней части. Рабочая масса движется через реактор под собственным весом.



По высоте реактора расположено несколько характерных зон:

- сушки, где вновь поступившее сырье высушивается отфильтрованными продуктовыми газами при температуре 100–200 °С;
- термодеструкции (пиролиз и коксование органических веществ в бескислородной среде), где продуктовый газ обогащается летучими продуктами пиролиза [Bond et al., 2008];
- газификации, где коксовые остатки реагируют с кислородом, водяным паром и углекислым газом при температуре от 1000 до 1200 °С с образованием CO , CO_2 и H_2 . Тепло, выделяемое при сжигании, не отводится из реактора, а концентрируется в зоне газификации, что приводит к увеличению скорости химических реакций и позволяет проводить процесс с более высоким содержанием негорючих материалов (минералов) или влаги, что повышает химическую эффективность процесса;
- охлаждения, где твердый остаток окончательно охлаждается до температуры около 100 °С.

В качестве окислителя используется кислород, получаемый в процессе термической конверсии воды, содержащейся в отходах, воздействием разрядами статического электричества, накапливаемыми на внутренней поверхности загрузочной камеры.

Результаты и их обсуждение

При проведении эксперимента по сжиганию осадка с иловых карт очистных сооружений молочного комбината начальное содержание влаги в образцах составляло в среднем около 89 весовых процентов (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Физико-химические свойства илового осадка
Physical and chemical properties of sludge

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Осадок иловых карт
1.	Влажность объемная	масса, %	89
2.	Зольность (минеральная часть сухого вещества)	масса, %	60
3.	Химический состав минеральной части осадка	масса, %	32,0 13,6 9,3 7,2 6,9 5,6 4,8 3,6 0,005 0,003 0,003 0,003
4.	Органическая часть сухого вещества	масса, %	40
5.	Элементный состав органической части осадка	%	4,7 0,6 0,1 0,6 2,0

В табл. 2 представлены условия и результаты экспериментов по обезвреживанию илового осадка влажностью (W) от 85 до 95 % с использованием реактора диаметром (d) 626 мм при удельном расходе воздуха (A) 640 м³/час.

Таблица 2
Table 2Условия и результаты экспериментов с иловым осадком
Conditions and results of experiments with a sludge sediment

N	Влажность материала, W , масс. %	Плотность загрузки, ρ , кг/м ³	Максимальная температура в зоне горения, T_{max} , °C	Теплота сгорания, Q , кДж/м ³	Состав продукт-газа, об. %			
					CO ₂	CxHy	CO	H ₂
1	95	530	1170	3588	16,1	1,79	9,0	15,0
2	90	580	1160	3911	8,7	1,32	12,7	15,8
3	90	580	1010	3973	9,6	1,13	14,1	15,7
4	85	650	1070	4255	14,8	1,42	13,7	17,3
5	85	650	1070	3973	9,6	1,13	14,1	15,7

По результатам эксперимента образующийся твердый (зольный) остаток (шлак) составил около 25 % от общей массы иловых осадков. Состав шлака: SiO₂ – 53,5 %, Fe₂O₃ – 18,5 %, Al₂O₃ – 14,5 %, CaO – 8,5 %, Mg₂O – 4,98 %, NiO – 0,008 %, Cr₂O₃ – 0,004 %, CuO – 0,004 %, ZnO – 0,004 %. Согласно результатов расчетов по программе «Расчет класса опасности отходов» (версия 4.0), разработанной фирмой «ИНТЕГРАЛ» в соответствии с [Критерии отнесения отходов..., 2014], указанный шлак относится к IV классу опасности, что позволяет проводить его захоронение на полигонах.

Вид шлака после автономного замкнутого деструктора низкого давления представлен на рис. 2.

Рис. 2. Шлак после автономного замкнутого деструктора низкого давления
Fig. 2. Sludge after an autonomous closed low pressure destructor

Эксперименты продемонстрировали многообещающие результаты применения метода парогазовой деструкции для переработки илового осадка с влажностью от 85 до 95 %.



В процессе парогазовой деструкции основным источником выделения загрязняющих веществ (ЗВ) в окружающую среду является автономный замкнутый деструктор низкого давления. В атмосферный воздух посредством дымовой трубы деструктора будет выбрасываться 8 ЗВ, а именно: азота диоксид, аммиак, взвешенные вещества, сера диоксид, сероводород, углерод оксид, фенол, диоксины. Указанные ЗВ образуют согласно [СанПиН 1.2.3685-21, 2021] три группы суммации: 6003 (аммиак, сероводород), 6010 (азота диоксид, сера диоксид, углерод оксид, фенол), 6043 (сера диоксид и сероводород). Суммарный выброс указанных ЗВ при работе деструктора составит 0,268 г/с (8,3 т/г.).

По результатам расчетов рассеивания выбросов указанных ЗВ, выполненных в соответствии с [Методы расчетов рассеивания..., 2017] по унифицированной программе для ЭВМ – УПРЗА Эколог (версия 4.6), наибольшее значение расчетной максимальной приземной концентрации ЗВ наблюдается по группе суммации 6010 в 0,315 ПДК на расстоянии 45 м от источника выброса. Таким образом, на основании результатов проведенных расчетов рассеивания выбросов согласно [Методика разработки (расчета)..., 2020], выбросы ЗВ от деструктора могут быть приняты в качестве допустимых.

Заключение

Проведенные исследования процесса парогазовой деструкции иловых осадков очистных сооружений молочного комбината в автономном замкнутом деструкторе низкого давления ДНД-350 показали, что процесс деструкции протекает с высокой эффективностью (уменьшение массы иловых осадков – более чем на 75 %). Проведенные оценки и предварительные расчеты свидетельствуют о том, что в проектировании и технологической схеме функционирования деструктора были применены все возможные меры, направленные на снижение негативного влияния на окружающую среду и соответствие современным стандартам экологической безопасности и охраны природы.

Таким образом, рассмотренная технология парогазовой деструкции иловых осадков очистных сооружений молочного комбината является экологически безопасным способом обезвреживания и утилизации, что позволяет её использовать для разработки мероприятий по охране окружающей среды.

Список источников

- Воронов Ю.В., Яковлев С.В. 2006. Водоотведение и очистка сточных вод. М., Ассоциация строительных вузов, 704 с.
- ГОСТ Р 17.4.3.07–2001. 2001. Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений. Госстандарт России, Электронный ресурс. URL: <http://base.garant.ru/5369785> (дата обращения 02.09.2024).
- ИТС 9-2020. 2020. Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. М., Бюро НДТ, 200 с.
- Критерии отнесения отходов к I – V классу опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду: утв. приказом № 536 МПР России от 04.12.2014. Электронный ресурс. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71196500/> (дата обращения 02.09.2024).
- Кузнецов А.Е., Градова Н.Б. 2006. Научные основы экобиотехнологии. М., Мир, 504 с.
- Методы расчета рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе. 2017. Электронный ресурс. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456074826?ysclid=loond8flh406440570> (дата обращения 02.09.2024).
- Методика разработки (расчета) и установления нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. 2020. Электронный ресурс. URL: <https://base.garant.ru/400164922/?ysclid=m1e36wy5iz509000938> (дата обращения 02.09.2024).
- СанПин 1322-03. 2003. Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления. Электронный ресурс. URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения 05.09.2024).

- СанПиН 1.2.3685-21. 2021. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Электронный ресурс. URL: <https://base.garant.ru/406508041> (дата обращения 3.09.2024).
- Хенце М., Армоэс П., Ля-Кур-Янсен, И., Арван Э. 2006. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы. М., Мир, 480 с.

Список литературы

- Бегенджов Э.Ф. 2023. Детоксикация активного ила от тяжелых металлов и фосфатов. Тенденции развития науки и образования, 96: 135–138. <https://doi:10.1841/trnio-04-2023-547>
- Дремичева Е.С. 2021. Проблемы загрязнения водоемов нефтесодержащими сточными водами промышленных предприятий и варианты их решения. Химическая безопасность, 5(2): 66–77. <https://doi.org/10.25514/CHS.2021.2.20003>
- Зайнуллин Р.Р., Галаяудинов А.А. 2016. Производство удобрений из осадков сточных вод. Инновационная наука, 6–2: 77–79.
- Исхакова Р.Я., Нургалиев А.И. 2024. Обезвоживание и экологически безопасная термическая переработка избыточного активного ила. Безопасность техногенных и природных систем, 8(2): 26–36. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-26-36>
- Латыпова М., Севостьянова О. 2015. Исследование процессов биохимической очистки токсичных сточных вод. М., LAP Lambert Academic Publishing, 92 с.
- Моран Э., Плеханов А.В., Лобанов Ф.И. 2017. Термическая обработка – перспективное направление утилизации осадков сточных вод. Водоснабжение и санитарная техника, 6: 47–51.
- Ручкина О.И., Зверева А.Н. 2020. Методы утилизации осадков городских очистных сооружений. Современные технологии в строительстве. Теория и практика, 1: 192–196.
- Солодкова А.Б., Собгайда Н.А., Шайхиев И.Г. 2012. Разработка технологии изготовления и использования адсорбента на основе отработанного активного ила для очистки сточных вод. Вестник Казанского технологического университета, 15(20): 179–182.
- Сюняев Х.Х., Сюняева О.И., Устюжанина О.А. 2005. Исследование эффективности применения осадков сточных вод в сфере АПК Калужской области. В кн.: Естествознание и гуманизм. Томск, СибГМУ, 2 (3): 41–42.
- Bond T., Tse Q., Chambon C.L., Fennell P., Fowler G.D., Krueger B.C., Templeton M.R. 2008. The Feasibility of Char and Bio-Oil Production from Pyrolysis of Pit La-Trine Sludge. Environmental Science: Water Research & Technology, 2: 253–264.
- Xia J., Rao T., Ji J., He B., Liu A., Sun Y. 2022. Enhanced Dewatering of Activated Sludge by Skeleton-Assisted Flocculation Process. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(11): 6540. <https://doi.org/10.3390/ijerph19116540>

References

- Begenjov E.F. 2023. Detoxification of Activated Sludge from Heavy Metals and Phosphates. Trends in the development of science and education, 96: 135–138 (in Russian). <https://doi:10.1841/trnio-04-2023-547>
- Dremicheva E.S. 2021. Problems of Pollution Of Water Bodies with Oil-Containing Wastewater of Industrial Enterprises and Options for Their Solution. Chemical Safety, 5(2): 66–77 (in Russian). <https://doi.org/10.25514/CHS.2021.2.20003>
- Zainullin R.R., Galyautdinov A.A. 2016. Proizvodstvo udobreniy iz osadkov stochnykh vod [Production of Fertilizers from Sewage Sludge]. Innovatsionnaya nauka, 6–2: 77–79.
- Iskhakova R.Ya., Nurgaliev A.I. 2024. Dehydration and Environmentally Friendly Thermal Processing of Excess Activated Sludge. Safety of Technogenic and Natural Systems, 8(2): 26–36 (in Russian). <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-26-36>
- Latypova M., Sevostyanova O. 2015. Investigation of the Processes of Biochemical Purification of Toxic Wastewater. Moscow, Publ. LAP Lambert Academic, 92 p. (in Russian).
- Moran E., Plekhanov A.V., Lobanov F.I. 2017. Thermal Treatment – a Promising Trend in Wastewater Sludge Utilization. Water Supply and Sanitary Technique, 6: 47–51 (in Russian).



- Ruchkinova, O.I., Zvereva A.N. 2020. Methods Methods of Disposal of Sludge from Urban Wastewater Treatment Plants. Modern technologies in construction. Theory and Practice, 1: 192–196 (in Russian).
- Solodkova A.B., Sobgaida N.A., Shaikhiev I.G. 2012. Razrabotka tekhnologii izgotovleniya i ispolzovaniya adsorbenta na osnove otrabotannogo aktivnogo ila dlya ochestki stochnykh vod [Development of Technology for the Manufacture and Use of an Adsorbent Based on Spent Activated Sludge for Wastewater Treatment]. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta, 15(20): 179–182.
- Syunyaev, H.H., Syunyaeva, O.I., Ustyuzhanina, O.A. 2005. Issledovaniye effektivnosti primeneniya osadkov stochnykh vod v sfere APK Kaluzhskoy oblasti. [Investigation of the Effectiveness of Wastewater Sludge Application in the Agricultural Sector of the Kaluga Region]. In: Estestvoznaniye i gumanizm [Natural Science and Humanism]. Tomsk, Publ. SibSMU, 2(3): 41–42.
- Bond T., Tse Q., Chambon C.L., Fennell P., Fowler G.D., Krueger B.C., Templeton M.R. 2008. The Feasibility of Char and Bio-Oil Production from Pyrolysis of Pit La-Trine Sludge. Environmental Science: Water Research & Technology, 2: 253–264.
- Xia J., Rao T., Ji J., He B., Liu A., Sun Y. 2022. Enhanced Dewatering of Activated Sludge by Skeleton-Assisted Flocculation Process. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(11): 6540. <https://doi.org/10.3390/ijerph19116540>

*Поступила в редакцию 24.09.2024;
поступила после рецензирования 07.11.2024;
принята к публикации 20.11.2024*

*Received September 24, 2024;
Revised November 07, 2024;
Accepted November 20, 2024*

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Боровлев Андрей Эдуардович, кандидат географических наук, доцент кафедры географии, геоэкологии и безопасности жизнедеятельности Института наук о Земле, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Andrey E. Borovlev, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor of the Department of Geography, Geoecology and Life Safety, Institute of Earth Sciences, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Кайдалова Александра Сергеевна, эксперт центра валидации и верификации углеродных единиц Института наук о Земле, Белгородский государственный национальный исследовательский университет; директор ООО «ЭКОЛОГ-ПРОЕКТ», г. Белгород, Россия

Aleksandra S. Kaidalova, Expert of the Center for Validation and Verification of Carbon Units, Institute of Earth Sciences, Belgorod State National Research University; director ECOLOG-PROJECT LLC; Belgorod, Russia

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

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