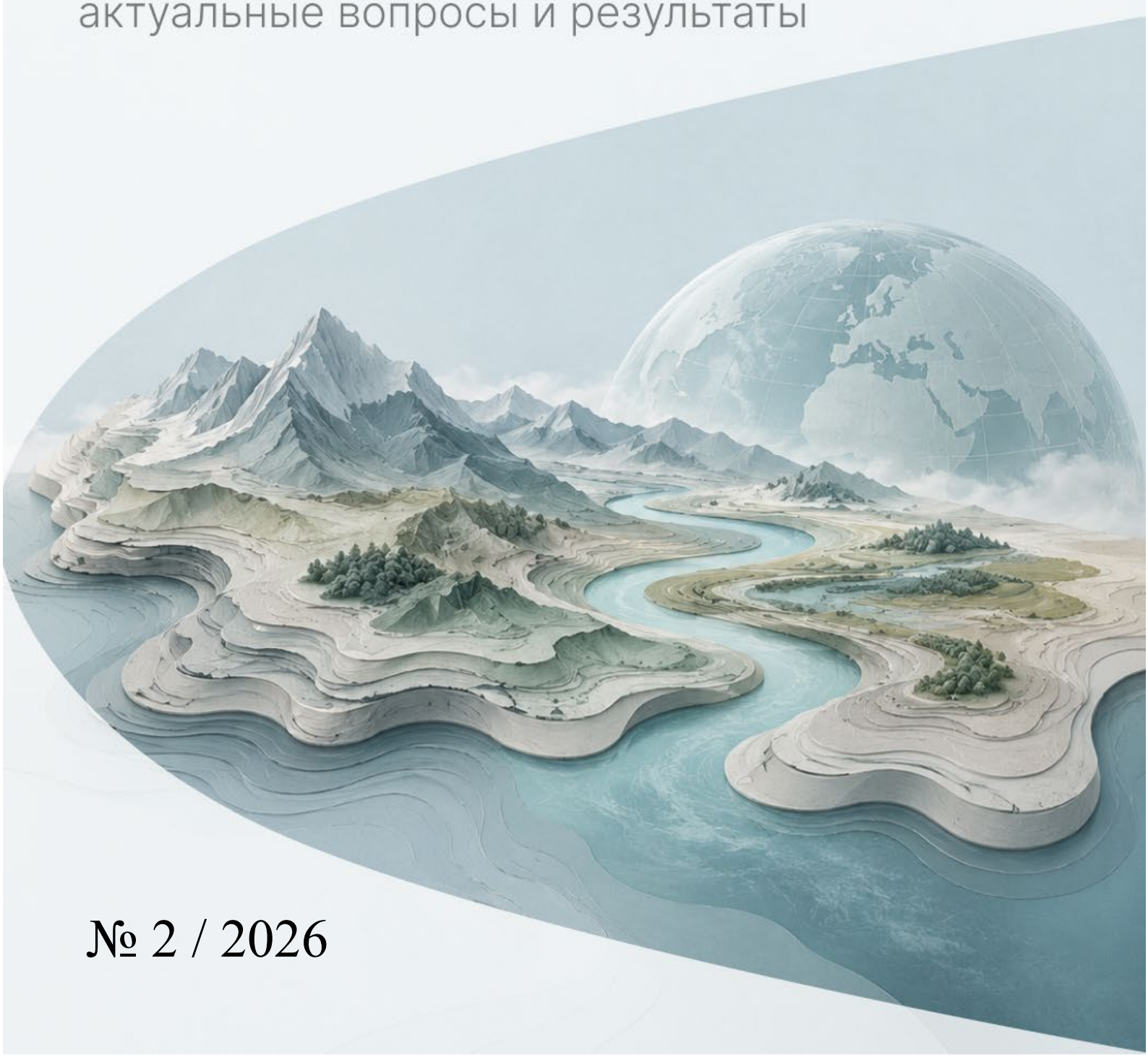
https://srcir.ru

ISSN: 3033-9847

Сетевой научный журнал

Scientific Research: Current Issues and Results

Научные исследования: актуальные вопросы и результаты



№ 2 / 2026

Главный редактор журнала:
Столбов Вячеслав Алексеевич, доктор георгафических наук, доцент кафедры социально-экономической географии, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия, Пермь.

Заместитель главного редактора: Куровская Наталья Анатольевна, генеральный директор ООО «Академия Науки и Образования», Донецк, Российская Федерация.

Члены редакционной коллегии:

Афонина Татьяна Евгеньевна, доктор георгафических наук, профессор кафедры землеустройства, Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, Россия, Иркутск.

Бакуменко Юлия Сергеевна, кандидат географических наук, кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности, Донбасский государственный технический университет, Россия, Алчевск.

Гдалин Арсений Дмитриевич, кандидат географических наук, кафедра экономической географии, Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Россия, Санкт-Петербург.

Гресь Роберт Андреевич, кандидат географических наук, научный сотрудник, Институт проблем региональной экономики РАН, Россия, Санкт-Петербург.

Дмитриев Руслан Васильевич, доктор георгафических наук, заместитель директора по научной работе, Институт Африки РАН, Россия, Москва.

Казмирук Василий Данилович, доктор георгафических наук, старший научный сотрудник, Институт водных проблем РАН, Россия, Москва.

Климанова Оксана Александровна, доктор георгафических наук, профессор, кафедра физической географии мира и геоэкологии, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, Москва.

Кроток Роман Николаевич, кандидат географических наук, младший научный сотрудник, Псковский государственный университет, Россия, Псков.

Литвиненко Тамара Витальевна, доктор георгафических наук, старший научный сотрудник отдела социально-экономической географии, Институт географии РАН, Россия, Москва.

Лопатников Дмитрий Леонидович, доктор георгафических наук, профессор, старший научный сотрудник, Институт географии РАН, Россия, Москва.

Луговской Александр Михайлович, доктор георгафических наук, доцент, профессор кафедры географии, Московский государственный университет геодезии и картографии, Россия, Москва.

Панкеева Татьяна Викторовна, доктор георгафических наук, старший научный сотрудник, ФИЦ "Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН", Россия, Севастополь.

Седова Евгения Юрьевна, кандидат географических наук, младший научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем СО РАН, Россия, Барнаул.

Сивохип Жанна Тарасовна, доктор георгафических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Оренбургский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Россия, Оренбург.

Соловьев Иван Алексеевич, доктор георгафических наук, доцент департамента географии и геоинформатики факультета международных отношений, Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, Ставрополь.

Фахретдинов Артур Венерович, кандидат географических наук, доцент кафедры Криологии Земли, Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр СО РАН, Россия, Тюмень.

Учредитель и издатель:

ООО «АКАДЕМИЯ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ»

Адрес учредителя: 283086, Донецкая Народная Республика, г. о. Донецк, г. Донецк, ул. Артема, д. 41, ком. 306в.

ИНН: 9303040432

КПП: 930301001

ОГРН: 1259300002103

Телефон: +7(909)679-60-04

Сайт: https://srcir.ru/

Регистрационный номер СМИ: Эл № ФС77-92139 выдан 25.08.2026 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

ISSN: 3033-9847

Издатель: Куровская Наталья Анатольевна, Генеральный директор ООО «АНО».

Адрес издателя: г. Москва

© Scientific Research: Current Issues and Results, 2026 г.

Периодичность 4 раза в год.

В ЖУРНАЛЕ ПУБЛИКУЮТСЯ СТАТЬИ ПО СЛЕДУЮЩИМ НАУЧНЫМ СПЕЦИАЛЬНОСТЯМ:

1.6.13. «Экономическая, социальная, политическая и рекреационная география (географические науки)»

1.6.21. «Геоэкология (географические науки)»

ПОРЯДОК РАССМОТРЕНИЯ СТАТЕЙ

Все представленные рукописи первоначально проверяются редакцией на соответствие тематике журнала и проводят проверку на оригинальность (с использованием соответствующих программно-аппаратных комплексов). Прошедшие этот этап статьи передаются на анонимное рецензирование членам редакционной коллегии или привлеченным внешним экспертам. При условии получения положительных рецензий без замечаний по

существу исследования статья принимается к публикации, включается в редакционный портфель и размещается в очередном номере журнала.

Научный журнал «Scientific Research: Current Issues and Results» занимается публикацией научно-практических исследований в соответствии с номенклатурой научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени.

Наш журнал стремится сделать процесс публикации максимально удобным для авторов, поэтому допускает различные варианты оформления библиографических ссылок и списка литературы.

Список источников оформляется по ГОСТ 7.0.5-2008 и приводится в конце статьи под заголовком «Список источников». При этом допускаются следующие форматы библиографических ссылок:

- Внутритекстовые ссылки (по стандарту APA)
- Подстрочные ссылки (по ГОСТ 7.0.5-2008)
- Затекстовые ссылки (по ГОСТ 7.0.5-2008)

Мы предоставляем авторам гибкость в оформлении, чтобы минимизировать бюрократические барьеры и сосредоточиться на содержании научного исследования. Главное — единообразие внутри самой статьи.

ПЛАТА ЗА ПУБЛИКАЦИЮ

Редакция не взимает с авторов плату за подготовку, размещение или печать материалов.

При использовании опубликованных материалов журнала ссылка на «Scientific Research: Current Issues and Results» обязательна.

Полная или частичная перепечатка материалов допускается только по письменному разрешению авторов статей или редакции.

Точка зрения редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов публикаций.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Chief Editor:
Stolbov Viacheslav Alekseevich, Doctor of Geography, Associate Professor of the Department of Socio-Economic Geography, Perm State University, Perm, Russia.

Deputy Chief Editor: Kurovskaya Natalia Anatolyevna, General Director of "Academy of Science and Education" LLC, Donetsk, Russian Federation.

Editorial Board:

Afonina Tatiana Evgenevna, Doctor of Geography, Professor of the Department of Land Management, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk, Russia.

Bakumenko Iuliia Sergeevna, PhD in Geography, Department of Ecology and Life Safety, Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia.

Gdalin Arsenii Dmitrievich, PhD in Geography, Department of Economic Geography, Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg, Russia.

Gres Robert Andreevich, PhD in Geography, Researcher, Institute for Regional Economic Studies of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia.

Dmitriev Ruslan Vasilevich, Doctor of Geography, Deputy Director for Research, Institute for African Studies of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Kazmiruk Vasilii Danilovich, Doctor of Geography, Senior Researcher, Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Klimanova Oksana Aleksandrovna, Doctor of Geography, Professor, Department of Physical Geography of the World and Geoecology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

Krotok Roman Nikolaevich, PhD in Geography, Junior Researcher, Pskov State University, Pskov, Russia.

Litvinenko Tamara Vitalevna, Doctor of Geography, Senior Researcher of the Department of Socio-Economic Geography, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Lopatnikov Dmitrii Leonidovich, Doctor of Geography, Professor, Senior Researcher, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Lugovskoi Aleksandr Mikhailovich, Doctor of Geography, Associate Professor, Professor of the Department of Geography, Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia.

Pankeeva Tatiana Viktorovna, Doctor of Geography, Senior Researcher, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia.

Sedova Evgeniia Iurevna, PhD in Geography, Junior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of RAS, Barnaul, Russia.

Sivokhip Zhanna Tarasovna, Doctor of Geography, Associate Professor, Leading Researcher, Orenburg Federal Research Center of the Ural Branch of RAS, Orenburg, Russia.

Solovev Ivan Alekseevich, Doctor of Geography, Associate Professor of the Department of Geography and Geoinformatics, Faculty of International Relations, North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia.

Fakhretdinov Artur Venerovich, PhD in Geography, Associate Professor of the Department of Earth Cryology, Federal Research Centre Tyumen Scientific Centre of the Siberian Branch of RAS, Tyumen, Russia.

Founder and publisher:
LLC "ACADEMY OF SCIENCE AND EDUCATION"
Founder's address: 41 Artem str., room 306b, Donetsk city, Donetsk People's Republic, 283086.
INN: 9303040432
KPP: 930301001
OGRN: 1259300002103
Phone: +7 (909)679-60-04
Website: https://srcir.ru/

Media registration number: El No. FS77-92139 issued on 25.08.2026 by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (Roskomnadzor)
ISSN: 3033-9847

Publisher: Kurovskaya Natalia Anatolyevna, CEO of ANO LLC.
Publisher's address: Moscow

© Scientific Research: Current Issues and Results, 2026 г.
The frequency is 4 times a year.

THE JOURNAL PUBLISHES ARTICLES ON THE FOLLOWING SCIENTIFIC SPECIALTIES:
1.6.13. "Economic, social, political and recreational Geography (geographical sciences)"
1.6.21. "Geoecology (geographical sciences)"

PROCEDURE FOR REVIEWING ARTICLES

All submitted manuscripts are initially checked by the editorial staff for compliance with the journal's subject matter and checked for originality (using appropriate software and hardware systems). Articles that have passed this stage are submitted for anonymous review to members of the editorial board or external experts involved. Subject to receiving positive reviews without comments on the research substance, the article is accepted for publication, included in the editorial portfolio and placed in the next issue of the journal.

The scientific journal "Scientific Research: Current Issues and Results" publishes scientific and practical research in accordance with the nomenclature of scientific specialties for which academic degrees are awarded.

Our journal strives to make the publication process as convenient as possible for authors, so it allows for various design options for bibliographic references and references.

The list of sources is drawn up in accordance with GOST 7.0.5-2008 and is given at the end of the article under the heading "List of sources". The following formats of bibliographic references are allowed:

- Intra-text links (according to the APA standard)
- Footnotes (according to GOST 7.0.5-2008)
- Non-text links (according to GOST 7.0.5-2008)

We provide authors with flexibility in design to minimize red tape and focus on the content of their research. The main thing is uniformity within the article itself.

PUBLICATION FEE

The editorial board does not charge authors a fee for the preparation, placement or printing of materials.

When using published journal materials, a link to "Scientific Research: Current Issues and Results".

Full or partial reprint of materials is allowed only with the written permission of the authors of the articles or the editorial board.

The editors 'point of view does not always coincide with the authors' point of view.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.6.13. Экономическая, социальная, политическая и рекреационная география . 9

Гакаев Р.А., Сташко А.В. МЕТОДИЧЕСКАЯ СХЕМА ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДОСТУПНОСТИ И СОЦИАЛЬНОЙ СПРАВЕДЛИВОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГОРОДСКИХ ЗЕЛЁНЫХ ЗОН ДЛЯ МОСКВЫ..... 9

Воронина Ю.С. БАРЬЕРНЫЕ И КОНТАКТНЫЕ ФУНКЦИИ РОССИЙСКО-КИТАЙСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГРАНИЦЫ: ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ТРАНСГРАНИЧНОЙ ИНТЕГРАЦИИ БЛАГОВЕЩЕНСКА И ХЭЙХЭ 39

Стрельцов М.А. МИГРАЦИОННЫЕ СЕТИ И УТЕЧКА ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО КАПИТАЛА ИЗ РОССИЙСКИХ РЕГИОНОВ 73

Гацаева Л.С., Татаринцев С.А. ДОСТУПНОСТЬ МЕДИЦИНСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПЕРИФЕРИЙНЫХ ТЕРРИТОРИЙ В КОНТЕКСТЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ СПРАВЕДЛИВОСТИ 91

1.6.21. Геоэкология 110

Прядилина А.В., Головань Е.В. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОСТПИРОГЕННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ СОСНОВЫХ ЛЕСОВ ТУНКИНСКОЙ КОТЛОВИНЫ ПО ОПУБЛИКОВАННЫМ СПУТНИКОВЫМ И ПОЛЕВЫМ ДАННЫМ 110

Хотяновская Ю.В. ДИФФУЗНЫЙ ВЫНОС БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ЭВТРОФИКАЦИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ РЕЧНОГО БАССЕЙНА..... 141

Седых В.А. ВЛИЯНИЕ КОТЛОВИННОГО РЕЛЬЕФА И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИНВЕРСИЙ НА НАКОПЛЕНИЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ КРАСНОЯРСКА 160

Топчая В.Ю. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕКРЕАЦИОННОЙ ДИГРЕССИИ ПРИБРЕЖНЫХ ЛАНДШАФТОВ ОСТРОВА ОЛЬХОН ПО ГРАДИЕНТУ ТУРИСТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ 188

1.6.13. Экономическая, социальная, политическая и рекреационная география

Научная статья

УДК 911.375.62:712.2

МЕТОДИЧЕСКАЯ СХЕМА ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДОСТУПНОСТИ И СОЦИАЛЬНОЙ СПРАВЕДЛИВОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГОРОДСКИХ ЗЕЛЁНЫХ ЗОН ДЛЯ МОСКВЫ

Гакаев Рустам Анурбекович, кандидат географических наук, научный сотрудник, Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова, Россия, Грозный, rustam.gakaev@yandex.ru;

Сташко Андрей Владимирович, кандидат географических наук, старший инженер, Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Россия, Калининград, stashko_a@mail.ru

Аннотация. В статье предлагается методическая схема оценки пространственной доступности общественных рекреационных зелёных зон и распределительной справедливости их размещения в городской среде. Территориальным контекстом выступает Москва. Цель исследования заключается в разработке воспроизводимого подхода, объединяющего характеристики общественной доступности зелёных объектов, пешеходной сети, качества рекреационной среды и пространственного распределения потенциальных пользователей. Методологическую основу составляют геоинформационный анализ, сетевое моделирование времени пешеходного доступа и метод двухшаговой плавающей зоны охвата (2SFCA). Предложено разграничивать площадь растительного покрова, площадь общественно доступных зелёных территорий и эффективный рекреационный ресурс с учётом качественных характеристик. Разработано правило нормирования качества зелёной зоны и рассмотрен расчёт его влияния на обеспеченность населения. Показано, что радиус геометрической близости к парку не заменяет расчёт маршрута до доступного входа. Полученные результаты характеризуют

методическую разработку и определяют направления её последующей количественной апробации для Москвы.

Ключевые слова: городские зелёные зоны; пространственная доступность; распределительная справедливость; пешеходная сеть; метод 2SFCA; Москва.

Original article

A METHODOLOGICAL FRAMEWORK FOR ASSESSING SPATIAL ACCESSIBILITY AND DISTRIBUTIVE JUSTICE OF URBAN GREEN SPACES IN MOSCOW

Gakaev Rustam Anurbekovich, Candidate of Geographical Sciences, Researcher, Kadyrov Chechen State University, Grozny, Russia, rustam.gakaev@yandex.ru;

Stashko Andrei Vladimirovich, Candidate of Geographical Sciences, Senior Engineer, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Kaliningrad, Russia, stashko_a@mail.ru

Annotation. This article proposes a methodological framework for assessing the spatial accessibility of public recreational green spaces and the distributive equity of their placement in the urban environment. Moscow serves as the territorial context. The aim of the study is to develop a replicable approach that integrates characteristics of public accessibility to green facilities, the pedestrian network, the quality of the recreational environment, and the spatial distribution of potential users. The methodological framework is based on geoinformation analysis, network modeling of pedestrian access times, and the two-step floating catchment area (2SFCA) method. It is proposed to differentiate the area of vegetation cover, the area of publicly accessible green spaces, and the effective recreational resource, taking into account qualitative characteristics. A rule for standardizing the quality of green space is developed, and a calculation of its impact on population availability is considered. It is shown that the radius of geometric proximity to a park does not replace the calculation of the route to

an accessible entrance. The obtained results characterize the methodological development and determine the directions for its subsequent quantitative testing for Moscow.

Keywords: urban green spaces; spatial accessibility; distributive justice; pedestrian network; two-step floating catchment area method; Moscow.

Введение. Зелёные территории крупного города выполняют несколько функций одновременно, однако в социальной и рекреационной географии наиболее существенен вопрос о том, насколько эти территории реально используются населением для повседневного отдыха. Наличие лесного массива, парка, бульвара или озеленённого участка ещё не означает, что жители соседних кварталов располагают сопоставимыми возможностями для кратковременного отдыха. Реальное использование рекреационного пространства зависит не только от наличия растительности, но и от режима доступа, положения входов, конфигурации улиц, наличия безопасных переходов, времени пути, площади территории, её благоустройства и способности принимать посетителей без чрезмерной рекреационной нагрузки. Именно поэтому традиционный показатель площади озеленения на одного жителя даёт важную, но неполную характеристику городской рекреационной среды.

Эта проблема особенно заметна в крупнейших агломерациях, где соседство жилой застройки с зелёным массивом может сочетаться с физической недоступностью последнего. Железнодорожная линия, многополосная магистраль, промышленная площадка, водоток с редкой сетью мостов или ограждённая территория способны превратить небольшое евклидово расстояние в значительно более продолжительный пешеходный маршрут. В другом случае парк расположен рядом с жилыми кварталами, но обладает недостаточной площадью относительно числа потенциальных посетителей. Формально оба района имеют зелёную территорию в непосредственной близости. С позиций пространственной организации рекреации эти ситуации различаются

принципиально.

Современные исследования всё заметнее смещают внимание от количества растительного покрова к пространственному распределению получаемых населением благ. В работе Y. Dvornikov с соавторами, посвящённой зелёной инфраструктуре Москвы, анализ проведён сразу для районов, кварталов и регулярной сетки. Авторы установили территориальную неоднородность обеспеченности регулирующими и культурными экосистемными услугами и показали, что различия проявляются не только между центральной и периферийной частями мегаполиса, но и на более дробном уровне городской ткани [1]. Тем самым вопрос доступности оказывается связан не просто с общегородским объёмом зелёной инфраструктуры, а с её положением относительно мест проживания и с набором функций конкретных пространств.

Для Москвы данная постановка имеет и актуальное нормативное основание. Закон города Москвы от 13 ноября 2024 г. № 27 связывает охрану и использование зелёного фонда не только с сохранением насаждений, природных систем и ландшафтов, но и с обеспечением доступности таких территорий для граждан [2]. Следовательно, доступность перестаёт быть второстепенной характеристикой благоустройства и приобретает значение самостоятельного критерия пространственного управления зелёным фондом.

При этом даже нормативное понятие зелёной территории нельзя механически отождествить с общедоступным рекреационным пространством. ГОСТ Р 71473-2024 разграничивает озеленённые территории общего и ограниченного пользования. Во вторую группу входят, в частности, озеленённые участки образовательных и медицинских организаций, научных учреждений, промышленных предприятий, жилых зданий и ряда иных объектов [10]. Их растительный покров существует физически и фиксируется дистанционными методами, однако режим пользования существенно отличается от городского парка или сквера. Это различие критично для географической оценки доступности.

Та же методическая проблема возникает при использовании спутниковых индексов. NDVI хорошо отражает спектральные характеристики растительности и позволяет обнаруживать участки с выраженным растительным покровом, прослеживать сезонные различия и сравнивать территории. Однако спутник не фиксирует правовой режим прохода через ограждение, наличие открытых ворот, время работы парка или возможность безопасно пересечь автомагистраль. Изображение с высокой долей растительности может соответствовать как общедоступному лесопарку, так и закрытому объекту. Следовательно, NDVI целесообразно использовать в качестве одной из характеристик состояния зелёного покрова, но не как замену данным о рекреационной доступности.

Показательно, что новейшие российские стандарты также разводят понятия озеленения и рекреационного использования. В ГОСТ Р 72175-2025, вступившем в действие 1 января 2026 г., предусмотрено раздельное представление городских зелёных зон по принадлежности и доступности; в тексте стандарта прямо отмечается, что понятие озеленённой территории шире понятия рекреационной зоны [4]. Для географического исследования это имеет непосредственное следствие: сначала необходимо определить множество объектов, которыми население действительно может пользоваться для отдыха, и только после этого измерять их пространственное распределение.

Вопрос о социальной справедливости ещё сложнее. Пространственная близость парка сама по себе не позволяет сделать вывод о справедливом распределении городской природы. В современной литературе различают распределительную справедливость, связанную с территориальным распределением благ и издержек, справедливость признания, касающуюся учёта потребностей и опыта разных социальных групп, и процедурную справедливость, отражающую участие населения в принятии решений [5]. Систематический обзор 2026 г. показывает, что именно распределительное измерение чаще других переводится в систему количественных пространственных показателей, тогда как две остальные составляющие требуют

качественных данных, анализа участия, восприятия и процедур управления.

Поэтому в настоящей работе термин «социальная справедливость» не используется как декларативная характеристика всей городской природоохранной политики. Количественной оценке подлежит её распределительное измерение: насколько рекреационный ресурс доступен населению разных частей города и совпадают ли участки с низкой доступностью с территориями, население которых особенно чувствительно к дефициту рекреационной инфраструктуры. Справедливость признания и процедурная справедливость остаются важной частью общей концепции, но их измерение требует самостоятельной программы опросов, интервью и анализа управленческих процедур.

Цель исследования состоит в разработке географически обоснованной методики оценки пространственной доступности и распределительной справедливости общественно доступных рекреационных зелёных зон Москвы. Для достижения цели решается комплекс взаимосвязанных задач: отделить наличие растительности от рекреационного предложения, связать зелёные территории с населением через реальную пешеходную сеть, учесть различия в площади и качестве объектов, измерить неравномерность доступности и установить, в каких частях города недостаточная обеспеченность рекреационными ресурсами сочетается с повышенной социальной нагрузкой.

Предполагается проверить, изменяется ли пространственное распределение обеспеченности при переходе от показателя площади озеленения к сетевой доступности, скорректированной с учётом объёма предложения, и связаны ли низкие значения этого показателя с социально-демографическими особенностями территории.

Обзор литературы. В исследованиях городских зелёных зон в последние годы отчётливо прослеживается переход от простых показателей обеспеченности к моделям, которые рассматривают рекреационный объект как ограниченный ресурс, распределённый между потенциальными пользователями.

Liang с соавторами предложили для Шанхая оценивать доступность вместе с потенциальным спросом, пропускной способностью и транспортным предложением. Такой подход позволяет различать ситуацию, когда зелёная зона физически находится рядом с большим числом жителей, и ситуацию, когда её размер позволяет удовлетворить соответствующий спрос [3]. Для крупнейшего города это различие принципиально: маленький сквер и крупный парк не должны давать одинаковый вклад только потому, что находятся на одинаковом расстоянии от жилого квартала.

Российская практика геоинформационного картографирования подтверждает полезность сочетания нескольких источников. С.А. Тесленок и А.С. Фролов при создании карты зелёных насаждений Ханты-Мансийска использовали геоинформационный подход, ориентированный на уточнение пространственного состава городской растительности [8]. В исследовании Д.К. Нгуена 2025 г. обеспеченность Ханоя зелёными насаждениями определялась с применением ГИС и дистанционного зондирования [6]. Эти работы прежде всего демонстрируют возможности современного картографического инструментария: спутниковые данные позволяют выявлять и характеризовать растительность, а ГИС — сопоставлять её с территориальной структурой города. Вместе с тем переход от картографирования растительного покрова к оценке рекреационных возможностей требует дополнительного слоя сведений о режиме пользования и о связи объекта с жилыми территориями.

Существенным шагом в этом направлении стало применение методов семейства Floating Catchment Area. Их достоинство состоит в том, что расстояние рассматривается не изолированно, а вместе с соотношением предложения и спроса. В исследовании Z. Chen, Q. Liu, M. Li и D. Xu для планирования парковой сети доступность, рассчитанная с помощью 2SFCA, объединена с оценкой распределительного равенства и последующей оптимизацией размещения новых объектов [14]. Такая схема анализа лучше соответствует задачам территориального планирования, чем карта кратчайших расстояний: он

позволяет увидеть, где новый парк способен изменить обеспеченность населения, а где проблема связана скорее с конфигурацией сети либо качеством уже существующего пространства.

Ещё строже вопрос об ограниченности ресурса поставлен в работе Y. Ye с соавторами. Исследователи модифицировали модель плавающих зон охвата, включив рекреационную вместимость зелёных пространств, и показали, что игнорирование этого параметра может скрывать неравенство доступа [9]. Идея имеет важное значение для Москвы: два парка одинаковой площади могут заметно различаться по внутренней структуре, площади, фактически пригодной для посещения, плотности дорожек, набору мест отдыха и способности принимать интенсивный поток. Поэтому площадь должна рассматриваться как исходная характеристика предложения, а не как его исчерпывающее выражение.

Другой методический сдвиг связан с отказом от круговых буферов. Hwang с соавторами в 2025 г. провели сетевую оценку пешеходной доступности городских лесов и зелёных пространств в Лондоне, Нью-Йорке, Париже, Токио, Сеуле и Пекине. Авторы использовали фактические маршруты и затем сравнивали города, в том числе посредством коэффициента Джини [7]. Результаты подтвердили значимость сетевой конфигурации: близость по прямой и возможность дойти пешком представляют разные географические характеристики.

Для Москвы такой переход особенно оправдан морфологией городской территории. Радиальные железнодорожные направления, вылетные магистрали, крупные развязки, Москва-река и её притоки, промышленные территории, большие кварталы с ограниченным числом проходов создают выраженные локальные разрывы. Поэтому изохрона, построенная по пешеходной сети от реального входа в парк, обладает большей содержательностью, чем геометрический радиус вокруг его границы. Если жителю необходимо пройти вдоль ограждения несколько сотен метров до ворот либо воспользоваться единственным переходом через железнодорожные пути, именно этот путь

характеризует рекреационную доступность.

Исследование J. Zhao и соавторов, выполненное на материале Хельсинки и опубликованное в 2026 г., идёт ещё дальше. Авторы учитывают не только длину маршрута, но и качество среды по пути к зелёной территории. Полученные результаты показывают, что физическая близость не гарантирует благоприятной пешеходной связи, в частности из-за шумового воздействия и иных характеристик маршрута [15].

Не менее существенна внутренняя неоднородность самих парков. Анализ 122 988 городских парков США, выполненный R.L. Winkler и коллегами, показал, что территориальное неравенство касается не только наличия парка в десятиминутной пешеходной зоне, но также древесного покрова и других социальных, экологических и оздоровительных характеристик [11]. Следовательно, равное расстояние до двух зелёных территорий ещё не означает равный доступ к одинаковому набору рекреационных благ.

Применительно к Москве значение функционального наполнения подтверждает исследование D. Dushkova с соавторами, посвящённое Парку Горького. Авторы анализировали связь культурных экосистемных услуг с инфраструктурой территории и потребностями посетителей [12]. Крупный благоустроенный парк оказывается не просто участком растительности, а сложной системой рекреационных возможностей. Отсюда следует, что при общегородском моделировании целесообразно хотя бы в упрощённом виде учитывать функциональное качество — иначе большой лесной массив без сопоставимого благоустройства и насыщенный объектами повседневной рекреации парк получают близкие оценки только вследствие сходства площади.

Отдельная линия исследований связана с вопросом, кому именно доступны зелёные пространства. Rahman с соавторами различают пешеходную доступность зелёных территорий и визуальное воздействие зелени на пути к ним, сопоставляя обе характеристики с социальными параметрами городской территории [13]. Анализ демонстрирует важное обстоятельство: разные способы

измерения контакта человека с городской природой выявляют разные виды территориального неравенства. Поэтому социальную справедливость нельзя свести к одному универсальному индикатору.

Работа C. Fang с соавторами 2025 г. также подчёркивает необходимость выбирать единицу анализа, которая лучше отражает реальные условия проживания. Предложенная авторами модификация 2SFCA учитывает поведение при перемещениях и позволяет исследовать неодинаковую доступность на более детальном пространственном уровне [16]. Такой подход одновременно напоминает об ограничениях районной статистики. Среднее значение дохода, возраста или иной характеристики административного района не описывает каждого проживающего в нём человека. Следовательно, выводы о социальных группах должны формулироваться как свойства территорий с определённым составом населения.

Таким образом, современная литература даёт основание для пяти методических положений. Растительность и общественно доступная рекреационная территория не тождественны. Кратчайшее расстояние по прямой уступает сетевой пешеходной модели. Площадь объекта должна соотноситься с потенциальным числом пользователей. Качество рекреационной территории способно изменить оценку её полезного предложения. Наконец, измерение социальной справедливости требует пространственного сопоставления доступности и населения, но не допускает автоматического перехода от статистики территориальной единицы к характеристике конкретного человека. В совокупности эти положения и определяют конструкцию настоящего исследования.

Материалы и методы исследования. В работе разрабатывается геоинформационная методическая схема оценки доступности общественных рекреационных зелёных зон для населения Москвы. Предлагаемый подход объединяет сведения о границах зелёных территорий, режиме их общественного использования, расположении входов, пешеходной сети и пространственном

распределении жителей. Для характеристики растительности предусматривается использование NDVI по данным Sentinel-2; для описания транспортно-пешеходной связности — сети улиц, проходов и пересечений. Доступность определяется по времени перемещения от населённой ячейки до фактического входа в зелёную территорию, а не по кратчайшему расстоянию до границы её полигона. При оценке предложения учитываются общественно доступная площадь объекта и поправка на его рекреационное качество. Основным результатом является воспроизводимая схема расчёта с использованием метода двухшаговой плавающей зоны охвата (2SFCA).

Принципиальное значение имеет определение исследуемого объекта. Под рекреационной зелёной зоной в работе понимается территория с растительным покровом, предназначенная либо фактически используемая для отдыха населения и имеющая законный общественный доступ. Из анализа исключаются участки, где наличие растительности не сопровождается общедоступной рекреационной функцией: закрытые ведомственные владения, территории ограниченного пользования, кладбища как самостоятельная категория, санитарно-защитные зоны предприятий, закрытые спортивные объекты и иные участки, попадание которых в класс зелени обусловлено спектральными характеристиками поверхности, а не возможностью повседневного отдыха.

Именно здесь спутниковый анализ выполняет вспомогательную функцию. По летнему композиту Sentinel-2 рассчитывается NDVI, позволяющий охарактеризовать выраженность растительного покрова внутри уже идентифицированной рекреационной территории и вокруг неё. Не предполагается выделять парк по одному только пороговому значению индекса. Российские исследования дистанционного картографирования показывают применимость Sentinel-2 для выявления изменений плотности городской растительности, одновременно указывая на зависимость результата от выбранного порога и состояния растительного покрова [6, 8]. Поэтому итоговый слой рекреационных объектов строится путём сопоставления дистанционных,

картографических и нормативных сведений, а не автоматической классификацией одного изображения.

Таблица 1 — Информационные слои и их назначение в модели доступности

Информационный слой	Основные показатели	Роль в исследовании
Sentinel-2	NDVI, доля поверхности с выраженным растительным покровом	Характеристика растительности внутри рекреационной территории; контроль пространственной целостности объектов
OpenStreetMap	парки, лесопарки, скверы, дорожки, улицы, пешеходные переходы, входы	Исходная геометрия зелёных объектов и построение пешеходной сети
Официальные московские сведения о зелёном фонде	назначение территории, режим использования, границы	Проверка общественной доступности и функционального статуса
Улично-дорожная сеть	пешеходные сегменты, переходы, мосты, тоннели	Расчёт реального времени подхода
Пространственные барьеры	железные дороги, магистрали, реки, ограждённые территории	Исключение невозможных прямых связей
Демографические данные	численность, плотность, доля детей, доля старших возрастов	Оценка спроса и социально-территориальной дифференциации
Данные о внутреннем оснащении зелёной территории	дорожки, спортивные и детские объекты, водные элементы, зоны отдыха	Поправка на рекреационное качество
Административная сетка и регулярные ячейки	район, квартал, расчётная ячейка	Агрегирование и картографирование результатов

Источники: составлено авторами на основе [1–16].

Следующий этап состоит в проверке полигонов. OSM удобен полнотой и открытостью, но пользовательская карта не должна рассматриваться как безусловный источник юридического статуса территории. Геометрия объекта сопоставляется с официальными сведениями и актуальным спутниковым изображением. Особое внимание уделяется границам крупных лесных и природных участков, где линия полигона нередко проходит рядом с жилой застройкой, хотя вход организован в другой части территории.

Для сетевого анализа формируется отдельный слой входов. Картографически зафиксированные ворота, проходы, пешеходные дорожки и

места примыкания открытой парковой сети к улице рассматриваются как точки доступа. Если один полигон имеет несколько входов, каждый из них участвует в расчёте. Такой порядок устраняет типичную ошибку, при которой алгоритм определяет расстояние до ближайшей точки границы парка, хотя фактически пересечь эту границу невозможно.

Пешеходный граф включает улицы, внутриквартальные проходы, мосты, подземные и наземные переходы, парковые дорожки в той мере, в какой они влияют на подход к объекту. Сегменты, непригодные для движения пешеходов, исключаются. Железная дорога, река или скоростная магистраль не трактуются как абсолютный барьер, если имеется переход; пересечение возможно только в узлах, где оно действительно предусмотрено. Благодаря этому модель воспроизводит топологию города значительно точнее кругового буфера.

Расчёт выполняется для нескольких временных интервалов. Базовыми целесообразно принять 10-, 15- и 20-минутную пешеходную доступность, не утверждая один норматив как универсальный. Сравнение сценариев необходимо по двум причинам. Во-первых, небольшие пространства повседневной рекреации и крупные городские парки обслуживают неодинаковые потребности. Во-вторых, выбор единственной границы зоны охвата способен сам по себе изменить вывод о территориальной обеспеченности. Проверка нескольких порогов позволяет отделить устойчивый пространственный рисунок от результата произвольно выбранного интервала.

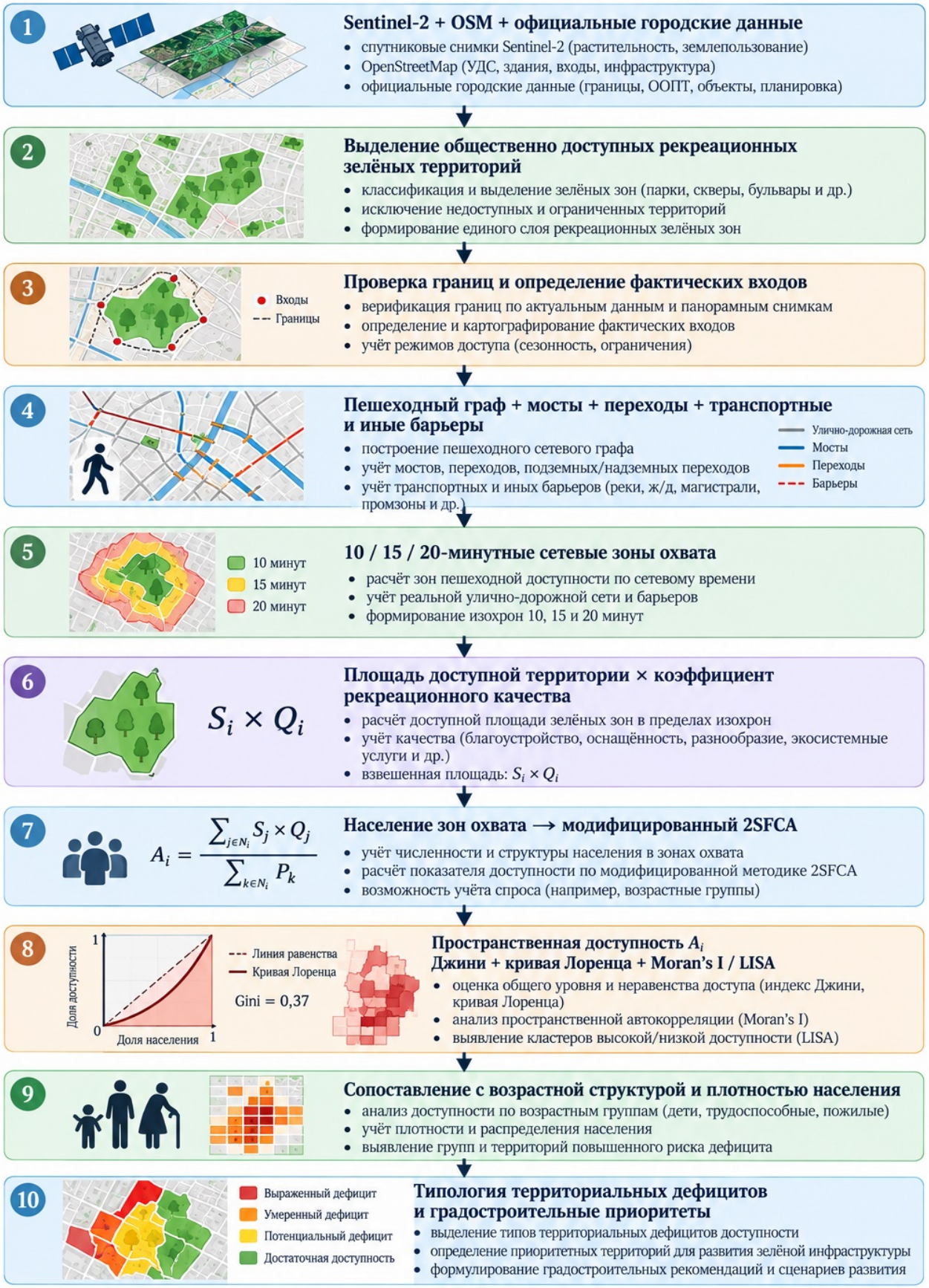


Рисунок 1 — Логика пространственной оценки доступности рекреационных зелёных зон (источник: разработано авторами)

Спутниковый снимок отвечает на вопрос о растительности. Официальные и картографические сведения — о характере территории и возможности её посещения. Пешеходная сеть определяет реальный пространственный контакт. 2SFCA связывает предложение со спросом. Статистика населения позволяет исследовать распределительную сторону вопроса.

Результаты исследования и их обсуждение. Методический анализ показывает, что нельзя считать взаимозаменяемыми три показателя: площадь растительности, площадь общедоступной зелёной территории и объём доступного населению рекреационного ресурса. Они описывают разные свойства городского пространства. Первое относится к характеру земной поверхности, второе — к функциональному и правовому режиму территории, третье — к пространственному отношению между объектом и пользователями.

Именно поэтому высокий NDVI не может считаться достаточным признаком благоприятной рекреационной обеспеченности. Дистанционные методы хорошо обнаруживают растительность на территории учреждения, закрытого жилого комплекса, промышленной площадки либо кладбища. С точки зрения спектрального сигнала такие участки могут мало отличаться от городского сквера. С точки зрения повседневного отдыха различие фундаментально. Российская система терминов дополнительно подтверждает это разграничение: ГОСТ Р 71473-2024 отдельно определяет территории общего и ограниченного пользования [10].

Отсюда следует и более общий вывод относительно индикаторов городского озеленения. Валовой показатель гектаров зелёных территорий на определённое количество жителей необходим для межгородских сопоставлений, но недостаточен для внутригородской социальной географии. Новый ГОСТ Р 72175-2025 предусматривает раздельный учёт зелёных участков в зависимости от принадлежности и открытости, фактически создавая нормативную основу для более дифференцированной статистики [4]. Методика настоящей работы развивает эту логику: даже открытая территория ещё должна быть связана с

населением через сеть реальных маршрутов.

Второй результат связан с масштабом территориальной единицы. Районная статистика удобна для итогового представления, но способна скрывать внутримуниципальные различия. Один район может включать крупный парк в одной части и плотные жилые кварталы в другой. Средняя обеспеченность окажется относительно высокой, хотя жители удалённой части района ежедневно сталкиваются с дефицитом зелёных пространств. Именно поэтому работа Dvornikov и соавторов для Москвы выполнена на нескольких уровнях, включая кварталы и регулярную сетку [1]. В рассматриваемой методике основным расчётным уровнем также должна служить мелкая ячейка, тогда как административный район используется для последующего агрегирования и управленческой интерпретации.

Третий вывод касается геометрии доступа. Круговой буфер систематически упрощает городскую морфологию. Он предполагает одинаковую проницаемость пространства во всех направлениях и поэтому не учитывает элементы, определяющие фактический маршрут пешехода. Для Москвы это ограничение особенно существенно. Железнодорожные линии, крупные автомобильные дороги, реки и территории с ограниченным числом проходов формируют локальные зоны, в которых путь до геометрически близкого парка требует значительно больше времени.

Международные данные позволяют считать это общей закономерностью крупных городов. Сравнительное исследование шести мегаполисов 2025 г. выявило существенные различия именно при сетевой оценке пешеходного доступа [7]. Более новая работа по Хельсинки показала, что даже сетевого расстояния иногда недостаточно: путь до зелёной зоны может проходить через шумную или иным образом неблагоприятную среду [15]. Значит, логика дальнейшего развития московской модели состоит не в возвращении к более простому радиусу, а в последовательном уточнении свойства маршрута.

Четвёртый результат относится к соотношению спроса и предложения.

Карта ближайшего парка показывает, куда можно дойти, но не отражает, сколько жителей являются потенциальными пользователями того же объекта. При равном времени подхода рекреационная обеспеченность квартала рядом с небольшим сквером и квартала возле крупного парка различается. Это различие особенно существенно при высокой плотности населения.

Исследования 2024 г., использующие многошаговые варианты FCA, показывают, что включение вместимости, спроса и предложения меняет оценку доступности и позволяет перейти от формального покрытия территории к анализу эффективности размещения зелёных объектов [3, 9, 14]. Поэтому для Москвы целесообразно использовать модифицированную модель 2SFCA, а при наличии достоверных данных о посещаемости и вместимости — переходить к моделям, в которых рекреационная ёмкость определяется не только площадью.

Пятый результат состоит в том, что качество рекреационного пространства необходимо включать в анализ, но нельзя смешивать его с доступностью. Это два связанных, но разных измерения. Житель может быстро дойти до небольшого озеленённого участка с ограниченным набором мест отдыха либо затратить больше времени на посещение крупного многофункционального парка. Если свести оба случая к минутам ходьбы, пространственная модель потеряет значимую часть различий.

Работа Winkler с соавторами убедительно демонстрирует, что неравенство может проявляться в распределении не только парков, но и конкретных удобств, древесного покрова и иных характеристик качества [11]. Московское исследование Парка Горького показывает значимость инфраструктуры и структуры культурных экосистемных услуг для реального использования пространства [12].

Такой подход позволяет различить по меньшей мере четыре ситуации, которые при расчёте площади зелени на душу населения могут выглядеть одинаково. В первом случае зелёных территорий действительно мало. Во втором их площадь достаточна, но входы и пешеходные связи организованы неудачно.

В третьем случае парк территориально доступен, однако его площадь недостаточна по отношению к числу потенциальных пользователей. В четвёртом площадь и расстояние приемлемы, но рекреационное качество ограничивает фактические возможности использования. Для городской политики способы исправления этих ситуаций различаются.

Таблица 2 — Различия между упрощённой и предлагаемой моделью оценки

Элемент оценки	Упрощённый подход	Предлагаемый подход	Возможное изменение интерпретации
Наличие зелени	NDVI либо площадь зелёного полигона	проверенная общественно доступная рекреационная территория	закрытые и нерекреационные участки не увеличивают обеспеченность
Расстояние	прямая линия или круговой буфер	кратчайший путь по пешеходной сети	обнаруживаются барьеры и непрямые маршруты
Точка назначения	ближайшая граница полигона	реальный доступный вход	исключается фиктивный доступ через ограждение
Предложение	факт наличия парка	площадь доступной части, скорректированная по качеству	крупные и малые объекты перестают считаться равноценными
Спрос	не учитывается	население в пересекающихся зонах охвата	фиксируется конкуренция за один объект
Неравенство	различия площади озеленения	различия рассчитанной доступности	измеряется распределение фактически доступного ресурса
Социальный анализ	среднее по району	мелкая расчётная сетка с последующим агрегированием	уменьшается потеря внутригородских различий
Статистическая модель	обычная регрессия	диагностика Moran’s I и, при необходимости, пространственная модель	учитывается зависимость соседних территорий

Источник: разработано авторами с учётом [3, 7, 9, 11, 14–16].

Шестой результат связан с трактовкой справедливости. Коэффициент Джини позволяет представить неравномерность распределения одним показателем, однако сам по себе не отражает пространственную структуру неравенства. Два города могут иметь одинаковое значение Джини, хотя в одном дефицит распределён мозаично, а в другом образует крупную непрерывную

периферийную зону. Поэтому Джини должен сопровождаться картой (A_i), локальной пространственной статистикой и демографическим анализом.

Более того, низкий общегородской Джини сам по себе ещё не означает социально справедливой системы. Если небольшая группа территорий с низкой доступностью одновременно отличается высокой концентрацией населения, нуждающегося в повседневной рекреационной инфраструктуре, средний показатель способен скрыть значимую проблему. И наоборот, высокий статистический разброс может быть связан с малонаселёнными территориями, где практическая социальная нагрузка невелика. Отсюда возникает необходимость учитывать численность населения непосредственно при измерении неравенства.

Социально-демографическая интерпретация должна опираться на ясно интерпретируемые связи между показателями. Для детей локальная доступность важна в силу меньшей самостоятельной мобильности и высокой частоты повседневного использования близлежащих общественных пространств. Для жителей старших возрастов длина и сложность пешеходного пути также имеют повышенное значение. Высокая плотность населения увеличивает потенциальную нагрузку на один и тот же рекреационный ресурс. Эти характеристики дают возможность исследовать территориальные приоритеты без искусственного конструирования единого «индекса уязвимости», смысл которого часто оказывается менее прозрачен, чем исходные показатели.

Предлагаемая методика позволяет перейти от общего нормативного утверждения о справедливости к последовательной проверке пространственных различий. Вначале устанавливается, где доступность мала. Затем выясняется, образуют ли низкие значения пространственно устойчивые скопления. Только после этого изучается социально-демографический профиль соответствующих территорий. Такая последовательность не предопределяет результат и не предполагает, что районы с высокой долей пожилых или детей обязательно находятся в худшем положении.

Современная теория экологической справедливости дополнительно предостерегает от сведения проблемы к распределению квадратных метров. Villanova, Puga и Collier по результатам систематического обзора 2026 г. показывают, что исследования городских природно-ориентированных решений по-прежнему сильнее разработаны в части биофизических и распределительных показателей, чем в части признания различных групп и участия населения [5]. В рамках настоящей статьи это ограничение признаётся прямо. Карта доступности способна установить территориальное распределение рекреационного ресурса; она не показывает, считает ли население парк безопасным, культурно приемлемым, удобным или соответствующим собственным потребностям.

Поэтому термин «распределительная справедливость» является для количественного блока более строгим, чем широкое понятие экологической справедливости. Для исследования справедливости признания потребуется дополнить пространственные данные опросами разных возрастных и социальных групп, анализом повседневных практик и субъективного восприятия. Для процедурного измерения необходимо изучать механизмы общественного участия в проектировании и реконструкции зелёных территорий. Такое расширение не отменяет 2SFCA-модель, а помещает её в более широкий исследовательский контекст.

Московский материал уже даёт основания считать такой переход перспективным. Работа Dvornikov с соавторами выявила неодинаковое предложение экосистемных услуг зелёной инфраструктуры на разных пространственных уровнях города [1]. Исследование Парка Горького, в свою очередь, демонстрирует, что фактическое использование связано с конкретным функциональным наполнением пространства [12]. Вместе эти результаты показывают: общая площадь зелёного фонда не раскрывает полностью ни географию получаемых жителями благ, ни характер повседневного использования.

С учётом этого итоговая картографическая интерпретация должна

строиться не как простое деление Москвы на «хорошие» и «плохие» районы. Более продуктивно выделять типы территориального дефицита. Один и тот же низкий показатель доступности может иметь разные причины и, следовательно, требовать разных решений.

Таблица 3 — Типология территориальных ситуаций для планирования рекреационной зелёной инфраструктуры

Тип территории	Пространственная характеристика	Основная причина ограничения	Приоритетное направление решения
I. Ресурсный дефицит	низкая доступность, мало общественно доступной зелёной площади	недостаточное предложение	создание новых небольших парков, скверов, озеленённых общественных пространств
II. Барьерная доступность	зелёные территории расположены близко, но сетевое время велико	магистрали, железные дороги, реки, ограждения, недостаток входов	новые входы, переходы, пешеходные связи, устранение разрывов маршрутов
III. Дефицит вместимости	хорошая близость, но низкое отношение площади к числу потенциальных пользователей	высокая плотность населения и небольшой размер объектов	расширение существующих территорий, распределение нагрузки между несколькими объектами
IV. Качественный дефицит	расстояние невелико, площадь достаточна, (Q_j) низок	слабое благоустройство или ограниченный набор рекреационных функций	улучшение дорожек, мест отдыха, древесного покрова и функционального наполнения
V. Социально чувствительный дефицит	низкая доступность сочетается с высокой долей детей, старшего населения или высокой плотностью	наложение пространственного и демографического факторов	первоочередное вмешательство с учётом локальных потребностей населения
VI. Устойчиво обеспеченная территория	доступность высока при разных временных порогах, отсутствует выраженная перегрузка	сбалансированное предложение и связность	сохранение существующего режима и предотвращение утраты связности

Источник: разработано авторами.

Такая типология имеет прямое градостроительное значение. Если проблема обусловлена барьером, строительство нового парка рядом с существующим не обязательно даст наибольший эффект. Иногда более

результативным окажется дополнительный пешеходный переход или новый вход. При дефиците вместимости, напротив, повышение проницаемости сети не создаст дополнительного рекреационного ресурса. В районе с низким качеством пространства задача состоит уже не в сокращении времени подхода, а в изменении внутренних характеристик территории.

Принцип имеет важное экономико-географическое следствие. Земля в сложившемся мегаполисе ограничена, а возможности создания крупных новых парков неодинаковы. Пространственная диагностика позволяет выбирать меры с учётом конкретной причины дефицита. Благодаря этому политика развития зелёной инфраструктуры включает управление связностью, качеством и распределением существующих ресурсов.

Особое значение получает масштаб небольших зелёных пространств. Крупные парки формируют каркас городской рекреации и способны притягивать население из удалённых районов. Однако повседневный отдых детей, пожилых жителей и людей с ограниченным временным бюджетом во многом зависит от более мелких объектов, доступных пешком. Поэтому модель должна различать хотя бы несколько функциональных классов зелёных зон. Единая пятнадцатиминутная зона доступности для всех объектов сглаживает различия между локальным сквером и крупным городским парком.

Можно предположить двухуровневую систему. Для территорий повседневного пользования оценивается короткий пешеходный доступ, тогда как крупные парки анализируются в более широкой зоне и при необходимости с учётом общественного транспорта. Такое расширение не меняет общей логики исследования: предложение по-прежнему сопоставляется со спросом, а расстояние измеряется по реальной транспортной сети. Меняется только пространственный масштаб предоставляемой услуги.

Ещё одно направление связано с сезонностью. Москва характеризуется значительными сезонными изменениями условий движения и характера использования открытых пространств. Летняя спутниковая характеристика

растительности описывает состояние зелёного покрова, но не охватывает зимнюю рекреацию. Часть парков сохраняет или даже расширяет функциональное значение благодаря лыжным маршрутам, каткам и зимнему благоустройству, тогда как другие пространства становятся менее удобными. Следовательно, всесезонная модель в перспективе должна использовать отдельные коэффициенты качества для тёплого и холодного периодов.

Вместе с тем чрезмерное усложнение исходной модели на первом этапе нежелательно. Если одновременно включить сезонность, субъективное восприятие, качество маршрута, безопасность, шум, инфраструктуру, топографию и множество социальных характеристик, итоговый индекс станет труден для проверки. Более надёжная исследовательская стратегия состоит в последовательном наращивании сложности: общественный статус территории, реальные входы и сеть, спрос и предложение, затем качество, а после проверки устойчивости — дополнительные характеристики пути и восприятия.

Сопоставление источников 2024–2026 гг. позволяет заключить, что именно такой переход сейчас происходит в международной географии городских зелёных пространств. Исследования отходят от вопроса о том, имеется ли зелень возле места жительства, и всё чаще ставят вопрос, каким объёмом и качеством рекреационного ресурса реально располагает человек при существующей структуре города [3, 7, 9, 11, 13–16]. Для российской городской географии данное направление особенно перспективно благодаря сочетанию открытых геоданных, спутниковых наблюдений и постепенно уточняющейся нормативной классификации зелёных территорий.

Научная новизна предлагаемого подхода применительно к Москве определяется не использованием каждого метода по отдельности, а их согласованием в единой пространственной модели. Общественная доступность задаётся до расчёта площади. Маршрут строится до реального входа. Предложение соотносится с населением зоны охвата. Качество корректирует ресурс, но не подменяет расстояние. Коэффициент Джини рассчитывается для

доступности населения, а не для физической площади зелени. Социальные характеристики рассматриваются на территориальном уровне с учётом риска экологической ошибки.

Выводы. Исследование пространственной доступности городских рекреационных зелёных зон требует чёткого различения растительного покрова, формальной площади озеленения и реально доступного населению рекреационного ресурса. Использование только NDVI либо общей площади зелени не позволяет установить, может ли человек войти на территорию, каким маршрутом он до неё доберётся и сколько других жителей пользуются тем же объектом. Для социальной и рекреационной географии эти различия имеют определяющее значение.

На примере Москвы предложена методическая схема, в которой первоначально формируется слой общественно доступных рекреационных зелёных территорий, проверенный по официальным данным и спутниковым изображениям. После этого фиксируются фактические входы и строится пешеходная сеть с учётом магистралей, железных дорог, рек, переходов и иных пространственных ограничений. Такой порядок позволяет отказаться от геометрических буферов, способных существенно переоценивать доступность в сложной городской среде.

Для измерения обеспеченности целесообразно использовать модифицированную 2SFCA-модель. Она связывает площадь и качество зелёного пространства с численностью потенциальных пользователей, а потому отражает не только близость объекта, но и обеспеченность ограниченным рекреационным ресурсом. Величина предложения при этом определяется площадью общественно доступной части территории с поправкой на её функциональное качество.

Распределительная справедливость оценивается по полученной доступности, а не по доле зелёной поверхности административной единицы. Населённо-взвешенный коэффициент Джини характеризует общую

неравномерность, тогда как локальная пространственная статистика показывает географию устойчивых территориальных скоплений низких и высоких значений. В совокупности эти показатели позволяют избежать ситуации, когда один общегородской коэффициент скрывает локальный дефицит.

Социальная интерпретация требует особенно осторожного обращения с агрегированной статистикой. Доля детей, жителей старших возрастов и плотность населения дают возможность определить территории с повышенной чувствительностью к дефициту повседневной рекреационной инфраструктуры, но не позволяют автоматически приписывать свойства района каждому человеку. Поэтому выводы должны относиться к пространственным единицам и их демографическому составу.

Теоретически справедливость городского озеленения шире количественного распределения. Она включает признание различных потребностей и участие населения в принятии решений. Пространственная модель не заменяет эти направления исследования. Напротив, она даёт основание для их адресного продолжения: опросы и процедуры участия особенно нужны там, где карта выявляет устойчивое сочетание низкой доступности и высокой социальной нагрузки.

Практический результат предложенного подхода состоит в переходе от единой категории «недостаток зелени» к нескольким территориально различным причинам дефицита. В одном случае городу требуется новая рекреационная территория, в другом — пешеходная связь, в третьем — увеличение вместимости, в четвёртом — изменение качества уже существующего пространства. Для мегаполиса с высокой стоимостью земли такое различение непосредственно влияет на обоснованность планировочных решений.

Для применения подобного подхода в Москве существуют нормативные предпосылки: городской закон 2024 г. прямо связывает развитие зелёного фонда с доступностью для граждан [2], а национальные стандарты последних лет всё точнее разграничивают категории озеленённых территорий и режимы их

использования [4, 10]. Научная задача состоит в том, чтобы выразить эти положения через измеримые географические показатели.

Список литературы

1. Dvornikov Y., Grigorieva V., Vasenev V., Varentsov M., Romzaykina O., Maximova O., Konstantinova A., Matasov V., Kozlova E. Urban green infrastructure index: Assessing supply of regulating and cultural ecosystem services at a megacity scale // Ecological Indicators. 2025. Vol. 170. Art. 113014. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.113014.

2. Закон города Москвы от 13 ноября 2024 г. № 27 «Об охране и использовании зеленого фонда в городе Москве» // СПС КонсультантПлюс.

3. Liang H., Yan Q., Yan Y., Zhang Q. Exploring the provision, efficiency and improvements of urban green spaces on accessibility at the metropolitan scale // Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 352. Art. 120118. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120118.

4. ГОСТ Р 72175-2025 (ИСО 37125:2024). Устойчивые города и сообщества. Экологические, социальные и управленческие (ЭСУ) показатели для городов. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2025.

5. Villanova L.B., Puga B.P., Collier M.J. Justice in urban nature-based solutions: A systematic review of distributive, recognition, and procedural dimensions // Nature-Based Solutions. 2026. Vol. 9. Art. 100335. DOI: 10.1016/j.nbsj.2026.100335.

6. Нгуен Динь Куан. Применение геоинформационных систем и данных дистанционного зондирования Земли для оценки обеспеченности города Ханоя зелеными насаждениями // Пространственные данные: наука и технологии. 2025. Т. 16. № 4. С. 23–39. DOI: 10.30533/scidata-2025-16-16.

7. Hwang B., Ko C., Im D., Kang W. Network-based assessment of urban forest and green space accessibility in six major cities: London, New York, Paris, Tokyo, Seoul, and Beijing // Urban Forestry & Urban Greening. 2025. Vol. 107. Art. 128781. DOI: 10.1016/j.ufug.2025.128781.

8. Тесленок С.А., Фролов А.С. Особенности создания карты зеленых

насаждений города Ханты-Мансийска в среде ГИС NextGIS // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле. 2024. № 4. С. 120–137. DOI: 10.25587/2587-8751-2024-4-120-137.

9. Ye Y., Xiang Y., Qiu H., Li X. Revealing urban greenspace accessibility inequity using the carrying capacity-based 3SFCA method and location big data // Sustainable Cities and Society. 2024. Vol. 108. Art. 105513. DOI: 10.1016/j.scs.2024.105513.

10. ГОСТ Р 71473-2024. Ландшафтная архитектура территорий городских и сельских поселений. Термины и определения. Утв. приказом Росстандарта от 29.07.2024 № 975-ст; введён в действие 01.01.2025.

11. Winkler R.L., Clark J.A.G., Locke D.H., Kremer P., Aronson M.F.J., Hoover F.-A., Joo H.E., La Rosa D., Lee K.J., Lerman S.B., Pearsall H., Vargo T.L.V., Nilon C.H., Lepczyk C.A. Unequal access to social, environmental and health amenities in US urban parks // Nature Cities. 2024. Vol. 1. P. 861–870. DOI: 10.1038/s44284-024-00153-2.

12. Dushkova D., Taherkhani M., Konstantinova A., Vasenev V.I., Dovletyarova E.A. Understanding Factors Affecting the Use of Urban Parks Through the Lens of Ecosystem Services and Blue–Green Infrastructure: The Case of Gorky Park, Moscow, Russia // Land. 2025. Vol. 14. No. 2. Art. 237. DOI: 10.3390/land14020237.

13. Rahman M.S., Meenar M., Labib S.M., Howell T., Adlakha D., Woodward B. Unveiling environmental justice in two US cities through greenspace accessibility and visible greenness exposure // Urban Forestry & Urban Greening. 2024. Vol. 101. Art. 128493. DOI: 10.1016/j.ufug.2024.128493.

14. Chen Z., Liu Q., Li M., Xu D. A New Strategy for Planning Urban Park Green Spaces by Considering Their Spatial Accessibility and Distributional Equity // Forests. 2024. Vol. 15. No. 3. Art. 570. DOI: 10.3390/f15030570.

15. Zhao J., Willberg E., Korpilo S., Hämäläinen J.A., Lehvävirta S. Rethinking the accessibility of urban green space through route environment quality // Urban Forestry & Urban Greening. 2026. Vol. 122. Art. 129541. DOI: 10.1016/j.ufug.2026.129541.

16. Fang C., Kwan M.P., Zhou L., Chen R., Liu X., Ge S. Quasi-individual-level

analysis of urban green space accessibility: Disparities, determinants, and equity across neighborhoods // Urban Forestry & Urban Greening. 2025. Vol. 114. Art. 129164. DOI: 10.1016/j.ufug.2025.129164.

References

1. Dvornikov Y., Grigorieva V., Vasenev V., Varentsov M., Romzaykina O., Maximova O., Konstantinova A., Matasov V., Kozlova E. Urban green infrastructure index: Assessing supply of regulating and cultural ecosystem services at a megacity scale // Ecological Indicators. 2025. Vol. 170. Art. 113014. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.113014.

2. Zakon goroda Moskvy` ot 13 noyabrya 2024 g. № 27 «Ob oxrane i ispol`zovanii zelenogo fonda v gorode Moskve» // SPS Konsul`tantPlyus.

3. Liang H., Yan Q., Yan Y., Zhang Q. Exploring the provision, efficiency and improvements of urban green spaces on accessibility at the metropolitan scale // Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 352. Art. 120118. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120118.

4. GOST R 72175-2025 (ISO 37125:2024). Ustojchivy`e goroda i soobshhestva. E`kologicheskie, social`ny`e i upravlencheskie (E`SU) pokazateli dlya gorodov. M.: FGBU «Institut standartizacii», 2025.

5. Villanova L.B., Puga B.P., Collier M.J. Justice in urban nature-based solutions: A systematic review of distributive, recognition, and procedural dimensions // Nature-Based Solutions. 2026. Vol. 9. Art. 100335. DOI: 10.1016/j.nbsj.2026.100335.

6. Nguen Din` Kuan. Primenenie geoinformacionny`x sistem i danny`x distancionnogo zondirovaniya Zemli dlya ocenki obespechennosti goroda Xanoya zeleny`mi nasazhdeniyami // Prostranstvenny`e danny`e: nauka i texnologii. 2025. T. 16. № 4. S. 23–39. DOI: 10.30533/scidata-2025-16-16.

7. Hwang B., Ko C., Im D., Kang W. Network-based assessment of urban forest and green space accessibility in six major cities: London, New York, Paris, Tokyo, Seoul, and Beijing // Urban Forestry & Urban Greening. 2025. Vol. 107. Art. 128781. DOI: 10.1016/j.ufug.2025.128781.

8. Teslenok S.A., Frolov A.S. Osobennosti sozdaniya karty` zeleny`x nasazhdenij goroda Xanty`-Mansijska v srede GIS NextGIS // Vestnik Severo-Vostochnogo federal`nogo universiteta im. M.K. Ammosova. Seriya: Nauki o Zemle. 2024. № 4. S. 120–137. DOI: 10.25587/2587-8751-2024-4-120-137.

9. Ye Y., Xiang Y., Qiu H., Li X. Revealing urban greenspace accessibility inequity using the carrying capacity-based 3SFCA method and location big data // Sustainable Cities and Society. 2024. Vol. 108. Art. 105513. DOI: 10.1016/j.scs.2024.105513.

10. GOST R 71473-2024. Landshaftnaya arxitektura territorij gorodskix i sel`skix poselenij. Terminy` i opredeleniya. Utv. prikazom Rosstandarta ot 29.07.2024 № 975-st; vvedyon v dejstvie 01.01.2025.

11. Winkler R.L., Clark J.A.G., Locke D.H., Kremer P., Aronson M.F.J., Hoover F.-A., Joo H.E., La Rosa D., Lee K.J., Lerman S.B., Pearsall H., Vargo T.L.V., Nilon C.H., Lepczyk C.A. Unequal access to social, environmental and health amenities in US urban parks // Nature Cities. 2024. Vol. 1. P. 861–870. DOI: 10.1038/s44284-024-00153-2.

12. Dushkova D., Taherkhani M., Konstantinova A., Vasenev V.I., Dovletyarova E.A. Understanding Factors Affecting the Use of Urban Parks Through the Lens of Ecosystem Services and Blue–Green Infrastructure: The Case of Gorky Park, Moscow, Russia // Land. 2025. Vol. 14. No. 2. Art. 237. DOI: 10.3390/land14020237.

13. Rahman M.S., Meenar M., Labib S.M., Howell T., Adlakha D., Woodward B. Unveiling environmental justice in two US cities through greenspace accessibility and visible greenness exposure // Urban Forestry & Urban Greening. 2024. Vol. 101. Art. 128493. DOI: 10.1016/j.ufug.2024.128493.

14. Chen Z., Liu Q., Li M., Xu D. A New Strategy for Planning Urban Park Green Spaces by Considering Their Spatial Accessibility and Distributional Equity // Forests. 2024. Vol. 15. No. 3. Art. 570. DOI: 10.3390/f15030570.

15. Zhao J., Willberg E., Korpilo S., Hämäläinen J.A., Lehvävirta S. Rethinking the accessibility of urban green space through route environment quality // Urban Forestry & Urban Greening. 2026. Vol. 122. Art. 129541. DOI: 10.1016/j.ufug.2026.129541.

16. Fang C., Kwan M.P., Zhou L., Chen R., Liu X., Ge S. Quasi-individual-level analysis of urban green space accessibility: Disparities, determinants, and equity across neighborhoods // Urban Forestry & Urban Greening. 2025. Vol. 114. Art. 129164. DOI: 10.1016/j.ufug.2025.129164.

Статья поступила в редакцию 02.07.2026; одобрена после рецензирования 13.08.2026; принята к публикации 12.10.2026.

The article was submitted 02.07.2026; approved after peer review 13.08.2026; accepted for publication 12.10.2026.

Научная статья

УДК 911.3:339.92(470+510)

БАРЬЕРНЫЕ И КОНТАКТНЫЕ ФУНКЦИИ РОССИЙСКО-КИТАЙСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГРАНИЦЫ: ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ТРАНСГРАНИЧНОЙ ИНТЕГРАЦИИ БЛАГОВЕЩЕНСКА И ХЭЙХЭ

Воронина Юлия Сергеевна, кандидат географических наук, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Россия, Улан-Удэ, voronina_iuliia@yandex.ru

Аннотация. Современная государственная граница одновременно разделяет национальные юрисдикции и организует потоки между сопредельными территориями, поэтому степень ее контактности не может быть достоверно установлена по одному показателю товарооборота, пассажиропотока либо физической пропускной способности пункта пропуска. Цель исследования состоит в выявлении изменений барьерных и контактных функций российско-китайской границы на примере трансграничной городской пары Благовещенск — Хэйхэ в 2024–2026 гг. Объектом исследования выступает приграничный узел, включающий города Благовещенск и Хэйхэ, международный автомобильный мост через Амур, смешанный пункт пропуска Благовещенск, автомобильный пункт пропуска Кани-Курган, формирующуюся мультимодальную инфраструктуру Амурского транспортно-логистического коридора и связанные с ними пассажирские, туристские и хозяйственные перемещения. Методика основана на раздельной оценке торгово-экономической, грузотранспортной, пассажирской, социально-гуманитарной и институциональной функций границы. Использованы научные публикации, материалы таможенных и транспортных органов, данные оператора пограничной инфраструктуры, сведения органов власти России и Китая, а также открытая статистика за 2024–2026 гг. Установлено, что развитие автомобильного перехода и терминальной инфраструктуры заметно усилило контактную функцию границы в сфере

грузовых перевозок: к началу августа 2026 г. через Кани-Курган прошло свыше 92 тыс. транспортных средств международной перевозки, а объем перевезенных грузов достиг 987,7 тыс. т, более чем вдвое превысив сопоставимый показатель предыдущего года. В пассажирском сегменте изменение носило иной характер. Рост числа пересечений сочетался с сохранением пограничного контроля и различиями в режимах пересечения и системах статистического учета; вместе с тем запуск регулярных автобусов по автомобильному мосту, изменение визовых условий и дальнейшее развитие транспортных связей сократили функциональную дистанцию между соседними городами. За первое полугодие 2026 г. российская сторона зарегистрировала 391,2 тыс. пассажиров, почти вдвое больше уровня аналогичного периода 2025 г.; китайская статистика фиксировала один миллион въездов и выездов через Хэйхэ уже к середине сентября 2026 г. Показано, что социальная контактность формируется избирательно - прежде всего через туризм, потребительские поездки, медицинские услуги, образовательное и научное сотрудничество. Научная новизна работы состоит в отказе от недифференцированной характеристики государственной границы как «открытой» или «закрытой» и в построении функциональной типологии, согласно которой к 2026 г. грузотранспортная и торговая функции имеют преимущественно контактный характер, пассажирская функция характеризуется выраженным усилением контактности, социальная остается селективно контактной, а институциональная совмещает облегчение перемещений с сохранением режимного контроля. Результаты показывают, что развитие приграничной инфраструктуры изменяет характер воздействия на экономику и население сопредельных территорий.

Ключевые слова: государственная граница; трансграничная интеграция; Благовещенск; Хэйхэ; барьерные функции; транспортная связность.

Original article

BARRIER AND CONTACT FUNCTIONS OF THE RUSSIAN–CHINESE STATE BORDER: A SPATIAL ASSESSMENT OF CROSS-BORDER INTEGRATION BETWEEN BLAGOVESHCHENSK AND HEIHE

Voronina Iuliia Sergeevna, Candidate of Geographical Sciences, East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia, voronina_iuliia@yandex.ru

Abstract. A contemporary state border simultaneously separates national jurisdictions and organizes flows between adjacent territories. Its contact function therefore cannot be adequately assessed through a single indicator of trade turnover, passenger traffic or the physical capacity of a border crossing. This study examines changes in the barrier and contact functions of the Russian–Chinese border using the cross-border urban pair of Blagoveshchensk and Heihe in 2024–2026. The research area comprises the two neighboring cities, the international road bridge across the Amur River, the Blagoveshchensk mixed checkpoint, the Kanikurgan road checkpoint, the emerging multimodal infrastructure of the Amur logistics corridor, and the passenger, tourism and economic flows associated with them. The methodology differentiates trade-economic, freight transport, passenger mobility, socio-humanitarian and institutional dimensions instead of reducing border permeability to a single composite indicator. The empirical base combines recent academic publications with customs and transport statistics, materials from Russian and Chinese public authorities and operators of cross-border infrastructure. The findings show a pronounced strengthening of the contact function in freight transport. By early August 2026, more than 92,000 international freight vehicles had crossed the Kanikurgan checkpoint since the beginning of the year and cargo turnover reached 987.7 thousand tonnes, more than twice the comparable level of 2025. Passenger interaction followed a different trajectory. Rising flows coexisted with border controls, differences in operating regimes and non-identical statistical accounting systems. Nevertheless,

regular bus services across the bridge, changes in visa regulations and expanding cross-border transport facilities substantially reduced the functional distance between the two cities. In the first half of 2026, the Russian side recorded 391.2 thousand passenger crossings, almost twice as many as in the corresponding period of 2025, while Chinese statistics reported one million inbound and outbound passenger trips through Heihe Port by mid-September 2026. Social connectivity remains selective and is concentrated in tourism, consumer mobility, medical services, education and research contacts. The article proposes a functional typology of the border: by 2026, trade and freight transport are predominantly contact-oriented; passenger mobility is shifting toward stronger contact; socio-humanitarian relations remain selectively contact-oriented; and institutional arrangements combine facilitation with sovereign control. The evidence demonstrates that infrastructural convergence does not eliminate the border but changes the spatial mechanism through which it structures economic activity and population mobility in neighboring territories.

Keywords: state border; cross-border integration; Blagoveshchensk; Heihe; barrier functions; transport connectivity.

Введение. Государственная граница в экономической и политической географии представляет собой не только юридически установленную линию разграничения территориального суверенитета. Для прилегающих районов она действует как пространственный регулятор: меняет стоимость перемещения, задает направления транспортных связей, концентрирует хозяйственную активность около пунктов пропуска, влияет на частоту поездок населения и формирует особую конфигурацию сервисных функций. Поэтому увеличение числа пересечений само по себе еще не означает исчезновения барьерного эффекта. Аналогичным образом наличие пограничного контроля не исключает интенсивной интеграции в отдельных видах деятельности. Именно сочетание этих двух свойств — разделения и соединения — составляет исходную проблему исследования приграничных территорий.

Такой подход особенно значим применительно к Благовещенску и Хэйхэ. Благовещенск и Хэйхэ расположены в непосредственной географической близости: их разделяет русло Амура, тогда как функциональное расстояние между ними определяется режимом пересечения государственной границы, доступными видами транспорта, продолжительностью оформления, визовыми правилами, стоимостью поездки и пропускной способностью инфраструктуры. В пространственно-географическом отношении это редкая ситуация: два городских хозяйства непосредственно соседствуют, но относятся к разным институциональным, валютным, таможенным и административным системам. Физическая близость поэтому может сочетаться как с высокой интенсивностью контактов, так и с заметными трансакционными издержками.

В 2024–2026 гг. эта территория пережила несколько изменений, существенно повлиявших на функции границы. Международный автомобильный мост, первоначально ориентированный прежде всего на грузовое движение, с 10 декабря 2024 г. стал использоваться регулярными пассажирскими автобусами. Российский и китайский перевозчики на начальном этапе получили по четыре ежедневных рейса; тем самым круглогодичный сухопутный канал пассажирского сообщения дополнил речные и сезонно зависимые способы пересечения Амура. В сентябре 2025 г. Китай ввел пробный безвизовый въезд для российских граждан с обычными заграничными паспортами на срок до 30 дней для ряда целей, а в мае 2026 г. китайская сторона продлила этот режим до конца 2027 г. В мае 2026 г. в Амурской области начал работу нулевой этап «Сухого порта Благовещенск», связавший автомобильный переход с железнодорожной инфраструктурой и тем самым изменивший транспортно-географическое положение пограничного узла.

Перечисленные события не следует механически трактовать как последовательное «стирание» границы. Пограничный режим продолжает определять доступность маршрута; увеличение грузовой мощности не тождественно росту ежедневной мобильности населения; упрощение въезда не

упраздняет таможенные и контрольные процедуры. Более того, эффект одной и той же инфраструктуры различается для разных потоков. Автомобильный мост может значительно улучшить условия перевозки грузов и одновременно оставлять пассажирскую мобильность зависимой от расписания автобусов и режима работы пунктов пропуска. Именно поэтому измерять пространственное взаимодействие одним коэффициентом открытости методологически недостаточно.

Современные исследования трансграничных территорий поддерживают многомерное понимание интеграции. A. Setti предлагает рассматривать экономическое, социальное и политико-институциональное измерения отдельно, поскольку высокий уровень взаимодействия в одной сфере не гарантирует аналогичного положения в другой [1]. Исследование Y. Zhao, L. Lyu и S. Grimes на другом пространственном материале также показывает, что непосредственная географическая близость не создает интеграцию автоматически: значение имеют характер связей, институциональная среда, взаимодополняемость хозяйственных функций и наличие общих целей [2]. Для российско-китайского приграничья этот вывод приобретает практический смысл, поскольку Благовещенск и Хэйхэ физически расположены ближе друг к другу, чем многие районы одного крупного города, но интенсивность их взаимодействия меняется вместе с работой пограничной инфраструктуры и правовыми условиями пересечения.

Российские исследования последних лет обращают внимание на возрастание значения сухопутных переходов в системе связей с КНР. А. Б. Бардаль рассматривает изменения автомобильного и железнодорожного сообщения после снятия пандемийных ограничений и показывает, что функционирование границы определяется одновременно состоянием инфраструктуры и более широкими сдвигами внешнеэкономических потоков [3]. Л. Ван, И. С. Карабулатова и Ц. Цзоу изучают российско-китайские трансграничные территории как систему взаимосвязанных социально-

экономических и демографических процессов, подчеркивая необходимость учитывать транспортные связи вместе с особенностями территориального развития приграничья [4]. На уровне Дальнего Востока воздействие новой географии внешних связей проявляется в изменении нагрузки на транспортную систему и повышении значения прямых выходов к сухопутной границе [5–7].

Вместе с тем эмпирически остается недостаточно разработанным вопрос о том, как разные функции одной государственной границы изменяются одновременно. Если грузовой поток растет, пассажирский режим упрощается, а хозяйственные связи приобретают круглогодичный характер, соблазнительно сделать общий вывод об усилении контактности. Подобное обобщение скрывает внутренние различия. Для экономической географии существенно не только установить увеличение обмена, но и понять, какие виды взаимодействия распространяются за пределы локальной зоны, где возникают новые узлы концентрации и каким образом пограничная инфраструктура перестраивает связи города с его тыловой территорией.

Цель настоящего исследования состоит в определении характера изменений барьерных и контактных функций российско-китайской государственной границы в пределах трансграничного узла Благовещенск — Хэйхэ в 2024–2026 гг. Основное внимание сосредоточено на наблюдаемой пространственной динамике грузовых и пассажирских потоков, инфраструктуры и условий пересечения. Проверяется предположение, согласно которому усиление контактности происходит не синхронно: грузотранспортная, пассажирская, социальная и институциональная функции меняются с разной скоростью и сохраняют различные формы барьерного воздействия.

Обзор литературы. За последние годы исследовательский интерес к государственным границам заметно сместился от простого противопоставления барьера и контакта к анализу различий в выраженности отдельных функций границы. В работе A. Setti [1] трансграничная интеграция трактуется как многомерный процесс. Хотя эмпирическим материалом автора служат

европейские регионы, методологически важен сам принцип: экономическая интенсивность, социальные связи и институциональное взаимодействие должны рассматриваться как самостоятельные составляющие. Полученный для одной функции результат нельзя автоматически переносить на остальные. Именно эта позиция используется в настоящей работе, однако без построения итогового агрегированного индекса, поскольку для Благовещенска и Хэйхэ доступные показатели имеют неодинаковый статистический охват.

Y. Zhao, L. Lyu и S. Grimes [2] подвергают сомнению объяснение трансграничной интеграции одной пространственной близостью. На материале региона Шэньчжэнь — Гонконг исследователи показывают, что обмен определяется сочетанием отношений между участниками, функциональной взаимодополняемости, институциональной среды и согласованности целей развития. Для Благовещенска и Хэйхэ эта постановка вопроса особенно продуктивна. Расстояние между городами мало и практически неизменно; напротив, режимы движения, устройство пункта пропуска и логистическая инфраструктура за исследуемые три года менялись заметно. Следовательно, динамика контактов дает возможность отделить эффект собственно соседства от эффекта институционально-инфраструктурной доступности.

Работы А. Б. Бардаль последовательно раскрывают транспортное измерение российско-китайского приграничья. В статье 2024 г. [3] автор показывает, как сухопутное сообщение реагировало на ограничения 2020–2022 гг. и их последующее снятие. В исследовании транспортного комплекса Дальнего Востока [6] изменения рассматриваются в более широком пространственном контексте: транспорт южной зоны макрорегиона обслуживает не только собственный региональный спрос, но и крупные транзитные потоки, поэтому развитие пограничной инфраструктуры меняет положение отдельных территорий внутри общероссийской сети. Наконец, работа 2026 г. [7] непосредственно анализирует прямые трансграничные связи РФ и КНР и показывает возрастающую роль автомобильных переходов.

И. Н. Золотухин и Ц. Сун [9] рассматривают автомобильное сообщение российско-китайского приграничья после пандемии и связывают его дальнейшие перспективы с развитием транспортно-логистической инфраструктуры. А. Б. Бардаль в другой работе 2024 г., включенной в материалы российско-китайской конференции, отдельно обращается к трансграничной транспортной инфраструктуре [9]. Эти исследования важны тем, что связывают движение через государственную границу не только с внешней торговлей, но и с географией конкретных пунктов пропуска. Библиографические сведения о работах представлены в публикации по итогам конференции, состоявшейся непосредственно на двух площадках — в Благовещенске и Хэйхэ.

Более широкий российско-китайский контекст раскрыт в докладе «Российско-китайский диалог: модель 2024» [10]. Авторы фиксируют одновременно расширение экономического сотрудничества и наличие транспортно-логистических ограничений, что важно для интерпретации региональной ситуации: высокий двусторонний товарооборот на уровне государств не означает равномерной нагрузки на все пространственные направления. S. Fortescue [5], анализируя изменение международных торговых коридоров России, также отмечает повышение значения восточного направления, включая сухопутную границу с Китаем. Его выводы дают макрогеографический фон, однако локальные эффекты этого сдвига требуют самостоятельного исследования, поскольку национальная переориентация потоков может как усиливать приграничные центры, так и превращать их прежде всего в транзитные узлы.

Методика CAREC Corridor Performance Measurement and Monitoring [8] предлагает оценивать пограничные переходы через фактические коммерческие перевозки, продолжительность и стоимость прохождения границы, транспортные расходы и скорость движения по коридору. Отчет 2026 г. основан на данных реальных трансграничных отправок и показывает преимущество такого подхода перед формальной оценкой наличия дороги либо пункта

пропуска. Полностью перенести набор показателей на Благовещенск — Хэйхэ пока невозможно: в открытом доступе отсутствует единый ряд индивидуального времени и стоимости оформления сопоставимых партий грузов за 2024–2026 гг. По этой причине в настоящем исследовании применяются доступные показатели физического потока, проектной и фактической пропускной способности, режима работы переходов и структурных изменений инфраструктуры. Отсутствующие параметры не заменяются расчетными предположениями.

Социальное измерение приграничной интеграции в опубликованной литературе представлено слабее транспортного. Тем не менее проведение в мае — июне 2024 г. международной конференции одновременно в Благовещенске и Хэйхэ показывает существование устойчивого научно-образовательного канала взаимодействия [11]. Авторы обзора конференции фиксируют участие российских и китайских исследователей и обсуждение политических, экономических, транспортных и гуманитарных вопросов. Этот материал не может служить количественной мерой социальной интеграции, однако подтверждает, что социальный контакт не сводится к торговым и туристским перемещениям.

Таким образом, современная литература дает достаточно оснований отказаться от характеристики приграничья через единственную шкалу «барьер — контакт». В научных публикациях хорошо разработаны общая теория многомерной интеграции, транспортная инфраструктура и макрогеография внешнеэкономических потоков, но слабее изучено их совместное проявление в конкретном российско-китайском городском узле после резкого восстановления пассажирской мобильности и расширения автомобильной инфраструктуры. Именно этот пробел определяет дальнейшую логику исследования.

Методологическая и теоретическая база исследования. Территориальные границы работы заданы так, чтобы не смешивать процессы разного пространственного уровня. Ядро исследования образуют Благовещенск и Хэйхэ, непосредственно связанные через Амур. Для анализа транспортной

функции учитываются автомобильный мост и МАПП Кани-Курган, смешанный пункт пропуска Благовещенск, речное сообщение и новая терминальная инфраструктура на российской стороне. Данные по Амурской области и провинции Хэйлунцзян привлекаются лишь тогда, когда они характеризуют более широкий хозяйственный фон. Например, товарооборот Хэйлунцзяна с Россией нельзя считать товарооборотом Хэйхэ с Благовещенском; в работе он используется только как показатель внешнеэкономической среды китайского приграничья.

В 2024 г. уже восстановилось активное движение населения после предшествующих ограничений, а в декабре начал работать регулярный пассажирский автобусный маршрут по автомобильному мосту. В сентябре 2025 г. изменилась визовая доступность Китая для российских граждан. На рубеже 2025–2026 гг. увеличилась пропускная способность Кани-Кургана, в мае 2026 г. начал работу первый этап сухого порта. Благодаря такой последовательности можно рассматривать не разовое состояние границы, а изменение способов ее функционирования.

Единицей наблюдения выступает отдельная функция. При таком подходе один и тот же пункт пропуска может демонстрировать выраженный контактный эффект в грузовом сообщении, более умеренный — в пассажирском, и одновременно сохранять сильную институциональную селективность. Многомерный принцип заимствован из современных исследований трансграничной интеграции [1, 2], однако адаптирован к российско-китайской статистике.

Таблица 1 — Система показателей для оценки функций границы в узле Благовещенск — Хэйхэ

Функция границы	Наблюдаемые показатели	Пространственный смысл	Ограничение интерпретации
Торгово-экономическая	объем и динамика грузов, товарная структура экспорта и импорта, региональный внешнеторговый фон	интенсивность хозяйственного обмена и специализация приграничного коридора	региональный товарооборот нельзя приравнивать к обороту городской пары
Грузотранспортная	число транспортных средств, тоннаж, пропускная способность КПП, режим работы, ввод терминалов	способность границы обслуживать устойчивые межрегиональные и межгосударственные потоки	физический рост потока не показывает продолжительность каждой процедуры
Пассажирская	число пересечений, темп изменения, доступные виды транспорта, регулярность сообщения	функциональная доступность соседнего города для населения	пересечение границы не тождественно миграции или маятниковой поездке
Социально-гуманитарная	туристские, медицинские, научные и образовательные поездки	устойчивость повседневных и специализированных контактов	открытая статистика охватывает лишь часть видов взаимодействия
Институциональная	визовый режим, регистрация маршрутов, режим и мощность КПП	нормативные условия, увеличивающие либо сокращающие издержки пересечения	изменение правила само по себе не доказывает причинный эффект без динамики потоков

Источник: разработано автором на основе [1–11].

Отдельное методическое решение касается интерпретации пассажирских данных. Число пересечений не используется как показатель маятниковой миграции. Открытые источники не позволяют с достаточной для статистического анализа точностью разделить пассажиропоток на лиц, регулярно пересекающих границу с трудовыми целями, туристов, покупателей, студентов.

Для оценки направленной асимметрии автомобильного грузового потока

дополнительно используется коэффициент:

$$K_d = \frac{N_{imp} - N_{exp}}{N_{imp} + N_{exp}} \quad (1)$$

где

N_{imp} - число транспортных средств в импортном направлении с позиции российской стороны;

N_{exp} - число машин в экспортном направлении.

Коэффициент нужен только для ответа на более узкий вопрос: одинаков ли поток по двум направлениям. По сведениям, опубликованным на 1 июня 2025 г., с момента запуска автомобильного перехода было зарегистрировано 102 020 транспортных средств в импортном и 59 093 в экспортном направлении; отсюда $K_d = 0{,}266$. Импортный поток машин превышал экспортный примерно в 1,73 раза.

Для сравнительной классификации функций государственной границы используются три группы признаков: изменение фактического потока, развитие инфраструктурной доступности и состояние институциональных условий пересечения границы. Контактной считается функция, по которой имеются согласованные признаки расширения взаимодействия, выраженные в увеличении соответствующего потока либо доступности при сохранении организационной возможности его реализации. Барьерной признаётся функция, для которой нормативные, инфраструктурные или организационные ограничения существенно препятствуют перемещению. Если положительные изменения одной характеристики сопровождаются сохранением ограничений по другой, функция определяется как смешанная с обязательным указанием доминирующего направления.

При формировании сравнительной базы использованы опубликованные статистические сведения о функционировании трансграничного узла Благовещенск — Хэйхэ, включая показатели пассажирского и грузового сообщения за 2024–2026 гг. При расхождениях российских и китайских данных

значения не усреднялись. Напротив, различие рассматривается как самостоятельная методическая проблема. Пограничная статистика зависит от территории учета, вида пункта пропуска, определения пассажира и временного интервала; формально близкие показатели могут описывать разные совокупности.

Результаты исследования и их обсуждение. Пространственная трансформация узла Благовещенск — Хэйхэ в исследуемый период наиболее отчетливо проявилась в изменении роли автомобильного перехода. Еще в июне 2024 г., когда с запуска грузового движения прошло два года, совокупный грузооборот моста превысил 900 тыс. т, а число прошедших транспортных средств достигло 86 тыс.; стоимость перевезенных грузов китайская сторона оценивала примерно в 25 млрд юаней. Эти цифры относятся не к одному календарному году и потому не могут использоваться как показатель годового потока. Их значение иное: за сравнительно короткий срок автомобильный мост стал постоянно используемым звеном трансграничной логистики.

К 2026 г. масштаб автомобильных перевозок заметно изменился. За первые семь месяцев через участок границы Благовещенск — Хэйхэ прошло более 92 тыс. транспортных средств международной перевозки, а грузооборот достиг 987,7 тыс. т. Оба показателя более чем вдвое превысили соответствующий уровень предыдущего года. Российская таможенная статистика одновременно раскрывает товарную специализацию: экспортное направление формировали, в частности, соевые бобы, соевое масло, изделия из древесины и продовольствие, тогда как в импорте заметное место занимали плодоовощная продукция, напитки, автомобильные запчасти и товары массового потребления.

Последняя структура важна для географической интерпретации. Контактная функция моста усиливается, однако взаимодействующие территории не становятся хозяйственно однородными. Напротив, движение опирается на различия в специализации: российская сторона выступает поставщиком части сельскохозяйственного сырья, продуктов его переработки и древесной

продукции; встречный поток содержит больше потребительских и отдельных промышленных товаров. Такая взаимодополняемость поддерживает грузообмен, но одновременно воспроизводит функциональную асимметрию. Поэтому увеличение тоннажа корректнее трактовать как усиление связанности экономических пространств, а не как выравнивание их структуры.

Общий российско-китайский контекст этому не противоречит. Переориентация части внешнеторговых потоков России на восток повысила нагрузку на транспортную систему Дальнего Востока и значимость сухопутных переходов [5–7]. Однако локальный узел развивается по собственной траектории. Его преимущество связано не только с объемом двусторонней торговли стран, но и с географическим положением: автомобильный переход способен связать приграничный участок Китая с Благовещенском, а далее — с сетью Дальнего Востока. То, насколько этот потенциал реализуется, зависит от соединения пограничного моста с внутренней железнодорожной и складской инфраструктурой.

Именно поэтому ввод нулевого этапа «Сухого порта Благовещенск» 21 мая 2026 г. имеет большее пространственное значение, чем простое появление еще одного склада. Стартовая мощность комплекса составляет 520 тыс. т в год; он может одновременно хранить 750 TEU и принимать до двух контейнерных поездов в сутки. Объект соединяет автомобильный мост Благовещенск — Хэйхэ с железнодорожной инфраструктурой станции Березовский-Восточный и входит в проект «Амурский коридор». Тем самым пограничный переход постепенно перестает быть только местом перевалки непосредственно у линии границы. Его функция распространяется вглубь территории за счет образования связки «мост — таможенно-логистический терминал — сухой порт — железная дорога».



Рисунок 1 - Изменение функциональной организации трансграничного узла Благовещенск — Хэйхэ в 2024–2026 гг.

Источник: составлено автором по [12–20].

Графическая схема показывает принципиальное изменение масштаба контактной функции. Если рассматривать только две набережные, трансграничное взаимодействие выглядит локальным обменом между соседними городами. После включения автомобильного моста в мультимодальную цепочку масштаб взаимодействия расширяется: Благовещенск начинает выполнять посредническую функцию между китайским приграничьем и более обширной российской территорией. Контактность государственной границы в таком случае выражается не только в облегчении перехода через Амур, но и в изменении направления внутренних транспортных связей.

При этом пропускная способность остается самостоятельным ограничителем. Рост грузового трафика в первом квартале 2026 г. был связан в том числе с вводом новых полос движения на Кани-Кургане в конце 2025 г. По

опубликованным данным, за первые три месяца 2026 г. через терминал прошло свыше 33 тыс. большегрузов — примерно вдвое больше, чем за тот же период предыдущего года; после реконструкции на пункте действовало 16 полос, а расчетная пропускная способность выросла до 862 транспортных средств в сутки. Фактически это свидетельствует о смене характера барьера. Сначала ограничение имело преимущественно физико-инфраструктурную форму — недостаточная мощность оформления сдерживала потенциальный поток. После расширения перехода ограничения все в большей степени связаны с режимом работы, организацией движения, таможенными процедурами и сопряжением с последующими звеньями логистической цепи.

Пассажирская функция развивалась иначе. В 2024 г. российская статистика зарегистрировала более 762 тыс. пересечений в направлении Благовещенск — Хэйхэ, почти в 2,5 раза больше, чем в 2023 г. В отдельные дни летней навигации поток превышал 5 тыс. человек. Китайские пограничные органы приводили для Хэйхэ несколько иное значение — 850 180 пересечений за 2024 г., что соответствовало росту на 127 % год к году. Эти цифры близки по порядку, но различаются более чем на 88 тыс. пересечений.

Само наличие расхождения представляет содержательный результат. Для исследования государственной границы статистический барьер возникает там, где две национальные системы по-разному описывают фактически связанный поток. Если не разделять пункты пропуска, виды транспорта и границы отчетной совокупности, можно получить ложное представление о синхронности процессов по обе стороны Амура. По этой причине в таблице 2 российские и китайские значения сохранены раздельно.

Таблица 2 — Основные показатели трансграничного взаимодействия в узле Благовещенск — Хэйхэ, 2024–2026 гг.

Период	Показатель	Зафиксированное значение	Пространственная интерпретация
2024	Пассажиропоток, российский контур учета	более 762 тыс. пересечений; почти в 2,5 раза больше 2023 г.	быстрое восстановление непосредственной мобильности между берегами Амура

2024	Пересечения через Хэйхэ, китайский контур	850 180; +127 % год к году	подтверждает рост, но статистически не идентичен российскому показателю
на 10.06.2024	Накопленный грузооборот автомоста с момента открытия	более 900 тыс. т; 86 тыс. транспортных средств	автомобильный переход закрепился как постоянный грузовой канал
10.12.2024	Регулярное пассажирское сообщение по мосту	по 4 ежедневных рейса перевозчиков каждой стороны на начальном этапе	снижение сезонной зависимости пассажирской доступности
2024	Торговля провинции Хэйлунцзян с Россией	234,12 млрд юаней; +11,2 %	широкий региональный фон; не является оборотом пары Хэйхэ — Благовещенск
2024	Туристский поток в Хэйхэ	число приграничных туристов +128 %, расходы +125 %	рост сервисной специализации китайского приграничного города
с 15.09.2025	Безвизовый въезд граждан РФ в КНР по обычным паспортам	до 30 суток для предусмотренных целей	снижение институциональных издержек поездки
на 01.06.2025	Накопленное число машин по мосту	161 113, из них 59 093 в экспортном и 102 020 в импортном направлении	устойчивая направленная асимметрия автомобильного потока
21.05.2026	«Сухой порт Благовещенск»	стартовая мощность 520 тыс. т/год	соединение пограничного перехода с внутритерриториальной железнодорожной сетью
январь–июль 2026	Грузовые транспортные средства	более 92 тыс.	примерно двукратный рост относительно сопоставимого периода 2025 г.
январь–июль 2026	Грузооборот Кани-Кургана	987,7 тыс. т	более чем двукратный рост; усиление роли прямого автомобильного коридора
I полугодие 2026	Пассажиропоток по российскому контуру	391 192 человека	почти двукратный рост к I полугодию 2025 г.
на 14.09.2026	Пассажиропоток через Хэйхэ с начала года	1 млн пересечений; +56,18 %	сохраняющееся ускорение трансграничной мобильности

Источник: составлено автором по данным [12–20, 22, 23].

Перенос регулярного автобусного сообщения на автомобильный мост в декабре 2024 г. изменил условия пассажирских перевозок. До этого физическая близость городов во многом зависела от гидрологического режима Амура и применявшегося в конкретный сезон способа перевозки. Автомобильный маршрут создал круглогодичную альтернативу, хотя на первом этапе российский

пункт пропуска работал в реверсивном режиме. Следовательно, техническая возможность круглогодичного движения появилась раньше, чем исчезли организационные ограничения. Такой временной разрыв хорошо показывает, почему инфраструктурный объект и фактическая проницаемость границы не должны отождествляться.

В 2025–2026 гг. транспортные изменения дополнились институциональными. С 15 сентября 2025 г. Китай предоставил обладателям российских обычных заграничных паспортов возможность находиться в стране без визы до 30 дней для туризма, бизнеса, посещения родственников и друзей, обменных визитов и транзита. В мае 2026 г. действие режима было продлено до 31 декабря 2027 г. Воздействие этого решения на поток нельзя изолировать от влияния транспорта, сезонности, обменного курса и туристского спроса, поэтому причинная оценка в настоящей работе не производится. По времени упрощение условий поездок совпало с ускорением роста пассажирской мобильности.

За первое полугодие 2026 г. российские таможенные органы зарегистрировали 391 192 человека, пересекших границу через пункт Благовещенск — Хэйхэ, что почти вдвое превысило уровень первой половины 2025 г. За тот же период было оформлено 10 828 грузовых автомобилей и пассажирских автобусов, в полтора раза больше год к году. На китайской стороне через Хэйхэ за первое полугодие прошло свыше 568 тыс. пассажиров, более чем на 60 % больше предыдущего года. К 14 сентября китайская статистика зафиксировала миллионное пересечение с начала года и рост на 56,18 %. Различие абсолютных российских и китайских величин вновь подтверждает необходимость анализировать каждый статистический ряд в соответствии с используемой системой учета.

Не менее показательно изменение направления туристских потоков. В первом квартале 2026 г. Благовещенск принял 36 052 туриста из Китая против 31 536 годом ранее; прирост составил около 14 %. Муниципальные власти связывали развитие туризма с увеличением оборота торговли и общественного

питания, а поступления туристического налога за три квартала 2025 г. оценивали в 20 млн руб. Эти значения важны потому, что показывают появление экономического эффекта не у оператора пограничного перехода, а внутри городской экономики.

На стороне Хэйхэ сервисная составляющая выражена еще нагляднее. По сведениям городского туристского ведомства, которые приводились китайскими источниками, число приграничных туристов в 2024 г. увеличилось на 128 %, а их суммарные расходы — на 125 %. Около 600 российских пациентов за год получили услуги в больнице традиционной китайской медицины Хэйхэ. Масштаб медицинского потока невелик по сравнению с общим числом пересечений, однако он свидетельствует о расширении форм трансграничного взаимодействия. Граница пересекается уже не только ради перевозки товара или краткой покупки, но и для получения специализированной услуги в соседнем городе.

Образовательные и научные связи образуют еще один устойчивый канал взаимодействия, менее значительный по объему. Международная конференция «Россия и Китай: история и перспективы сотрудничества» в 2024 г. проходила на площадках Благовещенского государственного педагогического университета и Хэйхэского университета. Ее программа охватывала экономические, исторические, политические и транспортные вопросы, а сам двусторонний формат показывает существование институционализированного взаимодействия между организациями соседних городов [11]. В отличие от туристского потока такое сотрудничество не измеряется ежедневным числом пересечений, но создает долгосрочные связи, менее чувствительные к сезонности.

На этом материале становится заметна еще одна особенность трансграничного пространства. Контактная функция распределяется по территории неравномерно. Хэйхэ получает непосредственный эффект от российской потребительской и медицинской мобильности, тогда как Благовещенск усиливает роль транспортно-логистического узла и одновременно

развивает въездной туризм. Экономическая выгода в результате не обязана иметь одинаковую отраслевую структуру по обе стороны границы. В этом случае асимметрия не устраняется, поскольку различия между сторонами сами служат одним из мотивов пересечения границы.

Сходный вывод применим к грузовому сектору. Коэффициент направленности, рассчитанный по накопленному числу автомобилей к июню 2025 г., равен 0,266 в пользу импортного направления на российскую сторону. Однако в 2026 г. перечень перевозимых товаров показывает двустороннюю специализацию: из России через Кани-Курган шли аграрные и древесные грузы, из Китая — потребительская продукция и отдельные промышленные товары. Наличие асимметрии поэтому нельзя интерпретировать как одностороннюю зависимость без анализа стоимости, веса и добавленной стоимости товарных потоков.

Важный сдвиг наблюдается и в соотношении локальной и транзитной функций. Чем сильнее автомобильный переход соединяется с железнодорожной инфраструктурой и терминальными мощностями, тем меньше его экономическое значение ограничивается двумя соседними городами. «Сухой порт Благовещенск» может принимать контейнерные поезда и формировать дальнейшую автомобильную доставку по Амурской области. Возникает многоуровневая система: межгородской контакт Благовещенск — Хэйхэ становится частью более протяженного коридора. Для Благовещенска это означает потенциальное усиление узловой функции, но одновременно возрастает риск ситуации, при которой значительная часть грузового потока проходит транзитом и оставляет ограниченный мультипликативный эффект в городской экономике. Ответ на вопрос о фактическом размере такого эффекта потребует отдельного анализа занятости, налоговых поступлений, складских услуг и локализации сопутствующего бизнеса.

К осени 2026 г. дальнейшее развитие транспортной сети еще не завершилось. Китайская сторона сообщала о завершении основной конструкции

трансграничной канатной дороги; проектная односторонняя мощность оценивается в 2,6 млн пассажиров в год, а пересечение реки после ввода сооружения должно занимать несколько минут. На момент подготовки настоящего исследования объект еще не представлял собой действующий канал, поэтому его проектные параметры не включены в фактические показатели контактности. Такое разграничение особенно важно в исследованиях инфраструктуры: заявленная будущая мощность не должна подменять реально наблюдаемый поток.

Аналогичным образом планы испытания беспилотных грузовых автомобилей и создания «дронового моста» между Благовещенском и Хэйхэ характеризуют направление технологического развития. В августе 2026 г. сообщалось о подготовке соответствующих пилотных проектов, причем испытания беспилотных грузовиков намечались на последующий период. Их значение состоит в другом: пограничный узел постепенно становится испытательной площадкой для новых форм логистики, что может дополнительно изменить пространственное распределение транспортных издержек и сроки доставки.

Совокупность выявленных изменений дает основание говорить не о переходе государственной границы из барьерного состояния в контактное, а о функциональной дифференциации. Линия границы сохраняется, контроль не исчезает, а движение подчинено национальному праву. Одновременно инфраструктурные и институциональные изменения сделали определенные виды взаимодействия значительно менее зависимыми от прежних ограничений. Это принципиально разные процессы, и именно их сочетание определяет современное состояние трансграничной городской пары.

Таблица 3 — Типология барьерных и контактных функций границы Благовещенск — Хэйхэ по состоянию на 2026 г.

Функция	Эмпирически наблюдаемое изменение	Сохраняющийся барьер	Итоговый тип
Торгово-экономическая	рост автомобильного грузооборота, расширение номенклатуры, развитие терминальной инфраструктуры	различия национальных рынков, таможенное оформление, направленная и товарная асимметрия	преимущественно контактная
Грузотранспортная	двукратный рост ряда показателей 2026 г.; ввод 16 полос и сухого порта	режим работы КПП, пределы пропускной способности, необходимость согласования звеньев логистической цепи	контактная, чувствительная к мощности инфраструктуры
Пассажирская	восстановление и дальнейший рост потока, регулярные автобусы, снижение визового барьера	паспортный и пограничный контроль, расписания, неодинаковые режимы отдельных переходов	смешанная с выраженным усилением контактности
Социально-гуманитарная	рост туризма, медицинских поездок, научных и образовательных контактов	выборочность потоков; отсутствие общего трансграничного рынка труда и сопоставимой статистики ежедневной мобильности	селективно контактная
Институциональная	упрощение въезда, расширение пунктов пропуска, регистрация новых маршрутов	государственная граница остается режимно регулируемой и юридически дискретной	регулирующе-контактная

Источник: разработано автором.

Предлагаемая типология не ранжирует функции от «лучшей» к «худшей». Ее назначение состоит в описании различий. Торговая контактность выражается в движении товара; пассажирская — в доступности соседнего города; социальная — в устойчивости конкретных связей; институциональная — в том, насколько действующие правила облегчают взаимодействие, не отменяя государственного контроля. Благодаря такой декомпозиции исчезает

противоречие, которое возникает при попытке одновременно назвать границу и барьерной, и контактной. Она действительно обладает обоими свойствами, но проявляются они в разных сферах и с неодинаковой интенсивностью.

Полученный результат в определенной мере подтверждает подход A. Setti [1], согласно которому трансграничная интеграция имеет неоднородное внутреннее строение. Однако материал Благовещенска и Хэйхэ вносит существенное уточнение. В европейских случаях политическая и социальная интеграция может опираться на длительно действующие наднациональные институты; на российско-китайской границе контакт развивается при сохранении полноценного межгосударственного режима. Следовательно, высокая интенсивность экономических и человеческих потоков не требует исчезновения институциональной границы и может сохраняться при ее регулируемом пересечении.

Сопоставление с подходом Y. Zhao, L. Lyu и S. Grimes [2] также показывает, что одной географической близости недостаточно. Благовещенск и Хэйхэ находились напротив друг друга задолго до 2024 г.; геометрия не изменилась. Изменились мост, пункты пропуска, автобусный маршрут, визовые условия, терминальные мощности. Именно эти изменения сократили функциональное расстояние. Географическая близость выступила необходимой предпосылкой, но превращение ее в устойчивое взаимодействие зависело от институтов и инфраструктуры.

С точки зрения пространственной организации экономики наиболее существенным результатом можно считать переход от простой приграничной связанности к формированию узлового коридора. Рост числа транспортных средств и объема перевозимых грузов важен не сам по себе. Более значимо то, что новый транспортный каркас соединяет иностранный рынок с внутренней железнодорожной сетью и терминальной инфраструктурой Амурской области. Государственная граница при этом меняет экономико-географическую функцию: из места, где поток задерживается и переоформляется, она постепенно

превращается также в место его перераспределения между видами транспорта и территориальными уровнями.

Для пассажирского пространства процесс имеет другое содержание. Здесь главным результатом становится сокращение неопределенности поездки. Круглогодичный автобусный маршрут, упрощение визового режима и развитие инфраструктуры пунктов пропуска делают соседний иностранный город более доступным для получения услуг, отдыха и кратких деловых поездок. Именно в этом проявляется снижение функциональной дистанции. Оно не отменяет политическую границу, но меняет повседневную географию выбора.

Такой вывод особенно хорошо иллюстрирует медицинский туризм Хэйхэ. Шестьсот российских пациентов в одной больнице — величина небольшая на фоне сотен тысяч пересечений, однако тип поездки принципиально иной. Человек пересекает границу ради услуги, которую считает доступной или предпочтительной на другом берегу. Пространство повседневной деятельности тем самым выходит за пределы национальной городской системы. Аналогичную роль играют покупки, рестораны, культурные мероприятия и образовательные контакты, хотя их полный количественный учет остается проблематичным.

Вместе с тем нельзя утверждать, что сформировался единый трансграничный городской рынок. Для такого вывода не хватает сопоставимых данных о занятости, регулярных трудовых поездках, жилищных связях, использовании социальных услуг и долгосрочной мобильности. Публичная статистика пассажиров фиксирует факт пересечения границы, но не позволяет определить цели и частоту поездок отдельных лиц. Поэтому понятие «трансграничная агломерация», если оно применяется к Благовещенску и Хэйхэ, должно использоваться осторожно: морфологическая близость и интенсивные обмены еще не означают функционального единства всех городских подсистем.

Существует и статистическое ограничение при оценке социально-экономической асимметрии. Благовещенск, Амурская область, Хэйхэ и провинция Хэйлунцзян относятся к различным уровням административно-

территориальной и статистической иерархии; национальные системы не публикуют весь набор показателей доходов, инвестиций, занятости и отраслевой структуры в полностью сопоставимых определениях. Механическое нормирование таких рядов могло бы создать математически аккуратную, но содержательно ненадежную оценку. Поэтому в настоящей статье асимметрия определяется по реально сопоставимым трансграничным потокам и их структуре, а комплексное сравнение социально-экономического положения оставлено для исследования, основанного на специально гармонизированной базе.

Еще одно ограничение связано с тем, что наблюдаемый период короток. 2024–2026 гг. характеризуются быстрым вводом инфраструктуры и изменениями режимов поездок; высокий темп роста частично отражает эффект низкой базы и восстановление связей. Делать из трехлетней динамики вывод о необратимости тенденции преждевременно. Более надежным подтверждением структурного изменения станет сохранение потоков после выхода транспортной системы на стабильный режим, а также появление устойчивой местной экономической специализации, связанной не только с транзитом, но и с обслуживанием трансграничных функций.

Тем не менее уже имеющиеся сведения позволяют отвергнуть исходное предположение о едином направлении изменения государственной границы. В исследуемом узле не произошло ни превращения границы в жесткий барьер, ни ее равномерного перехода к свободному контакту. Сформировалась более сложная конфигурация: грузовой коридор стал значительно проницаемее; пассажирское пространство расширилось, но остается институционально регулируемым; социальные связи усилились избирательно; национальные различия продолжают создавать как ограничения, так и мотивы для обмена.

Выводы. Исследование трансграничного узла Благовещенск — Хэйхэ показывает, что государственная граница в современном приграничном регионе действует не через единственную функцию. Ее воздействие распределяется

между несколькими каналами, причем изменения в них не совпадают ни по времени, ни по масштабу. По этой причине формулировка «граница стала более открытой» недостаточна для экономико-географического анализа: она скрывает различия между движением груза, поездкой человека, доступом к услуге и институциональными условиями пересечения.

Наиболее выраженное усиление контактной функции в 2024–2026 гг. произошло в грузотранспортной сфере. Автомобильный мост превратился в устойчиво растущий канал: к началу августа 2026 г. грузооборот через Кани-Курган достиг 987,7 тыс. т с начала года, а число транспортных средств международной перевозки превысило 92 тыс. Сопоставимый рост стал возможен не только из-за увеличения спроса на перевозки, но и вследствие расширения физической мощности пункта пропуска. Ввод сухого порта придал процессу новое пространственное качество. Мост теперь соединяется с железной дорогой и терминальной сетью, что превращает пограничный узел из локального перехода в элемент более протяженного транспортного коридора.

Торгово-экономическая функция также имеет преимущественно контактный характер, однако ее развитие основано на структурной неодинаковости двух сторон. Состав грузов указывает на взаимодополняемость товарных потоков, но не на сближение хозяйственных структур. Более того, соотношение транспортных средств по направлениям к июню 2025 г. было заметно смещено в сторону импорта на российскую территорию.

Пассажирская функция за исследуемый период прошла наиболее заметную институциональную трансформацию. Регулярные автобусы по автомобильному мосту уменьшили сезонную зависимость сообщения, а визовое облегчение со стороны Китая сократило часть издержек поездки российских граждан. В первой половине 2026 г. российская статистика фиксировала почти двукратное увеличение пассажиропотока; к середине сентября китайская сторона сообщила о миллионном пересечении через Хэйхэ с начала года. Вместе с тем сохранение паспортного, таможенного и пограничного контроля означает, что речь идет не

о безграничном пространстве, а о более проницаемой и предсказуемо работающей границе.

Социальная контактность носит избирательный характер. Туристские, медицинские, образовательные и научные поездки уже формируют заметные связи между городами. Рост туристских расходов в Хэйхэ, увеличение китайского турпотока в Благовещенск и использование российскими гражданами медицинских услуг на китайской стороне показывают, что соседний иностранный город постепенно входит в пространство практического выбора части населения. Однако доступные данные не подтверждают существование общего рынка труда или массовой маятниковой миграции, поэтому расширять вывод за пределы наблюдаемых форм мобильности оснований нет.

Институциональная функция границы изменилась в сторону управляемого облегчения контактов. Государства сохранили контроль над пересечением, одновременно увеличив число способов перемещения и снизив отдельные административные препятствия. В этом состоит принципиальное отличие между ослаблением барьерной функции и устранением государственной границы. Благовещенск и Хэйхэ остаются частями разных национальных территориальных систем, но стоимость пространственного взаимодействия между ними по ряду направлений снижается.

Научный результат работы состоит в предложенной типологии, где торговая и грузотранспортная функции определяются как преимущественно контактные, пассажирская — как смешанная с быстрым усилением контактности, социальная — как селективно контактная, институциональная — как регулирующе-контактная. Такая схема точнее описывает фактическую территориальную ситуацию, чем единый показатель барьерности. Она также объясняет, почему статистически наблюдаемый рост трансграничных перевозок может сосуществовать с жестко оформленной государственной границей.

Для пространственного развития Амурской области наибольшее значение имеет не само увеличение потока, а способность территории преобразовать

транзит в локальные хозяйственные эффекты. Если новая логистика ограничится проездом грузов через Кани-Курган, влияние на местную экономику останется ниже потенциального. Если же вокруг сухого порта, терминалов и трансграничной инфраструктуры будут развиваться хранение, переработка, распределительные услуги, ремонт транспорта, деловой сервис и связанная занятость, контактная функция границы станет фактором более глубокого изменения территориальной структуры. Именно этот вопрос представляется наиболее содержательным продолжением исследования.

Дальнейшая работа требует гармонизации российской и китайской статистики на уровне конкретных пунктов пропуска, раздельного учета целей поездок, формирования сопоставимых рядов времени и стоимости пересечения границы и оценки местных экономических эффектов новых транспортных объектов. Особенно значимым будет сопоставление фактической загрузки сухого порта и Кани-Кургана после выхода инфраструктуры на устойчивый режим, а также анализ пассажирской мобильности после ввода новых видов сообщения. Только более длительный временной ряд позволит отличить краткосрочный восстановительный рост от устойчивого изменения пространственной организации российско-китайского приграничья.

Список литературы

1. Setti A. No Fences, Good Neighbors: Measuring and Explaining Integration in European Cross-Border Regions // Journal of European Integration. 2025. Vol. 47, No. 5. P. 753–774. DOI: 10.1080/07036337.2024.2418293.

2. Бардаль А. Б. Россия и Китай: взаимодействия в сфере наземного транспорта на современном этапе // Регионалистика. 2024. Т. 11. № 2. С. 59–73. DOI: 10.14530/reg.2024.2.59.

3. Zhao Y., Lyu L., Grimes S. An Analytical Framework for Cross-Border Regional Innovation Ecosystems: The Case of Shenzhen–Hong Kong Cross-Border Region // Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie. 2024. Vol. 115, No. 3. P. 402–417. DOI: 10.1111/tesg.12617.

4. Ван Л., Карабулатова И. С., Цзоу Ц. Моделирование социально-экономического и демографического развития трансграничных регионов (на примере российско-китайского приграничья) // ДЕМИС. Демографические исследования. 2024. Т. 4. № 4. С. 26–51. DOI: 10.19181/demis.2024.4.4.2.

5. Fortescue S. The Reorientation of Russia's Trade Corridors Since the Invasion of Ukraine // Post-Communist Economies. 2024. Vol. 36, No. 4. P. 405–431. DOI: 10.1080/14631377.2024.2324223.

6. Бардаль А. Б. Транспортный комплекс Дальнего Востока: структурные изменения на фоне общеэкономической динамики и геополитических шоков // Пространственная экономика. 2025. Т. 21. № 2. С. 78–113. DOI: 10.14530/se.2025.2.078-113.

7. Bardal A. B. Cross-Border Transport Interactions between the Russian Federation and China in New Geopolitical Conditions // ЭКО. 2026. Т. 56. № 1. С. 178–194. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2026-1-178-194.

8. CAREC Institute. CAREC Corridor Performance Measurement and Monitoring Annual Report 2024. CAREC Program, 2026.

9. Золотухин И. Н., Сун Ц. Автомобильное сообщение в транспортно-логистической инфраструктуре российско-китайского приграничья в постпандемийный период: состояние и перспективы // Россия и Китай: история и перспективы сотрудничества. 2024. № 14. С. 451–458.

10. Российско-китайский диалог: модель 2024: доклад № 94 / К. В. Бабаев, Ли Цзяньминь, Ю. Ю. Мельникова и др.; под ред. С. М. Гавриловой и др. М.: Российский совет по международным делам, 2024. 98 с. ISBN 978-5-6051642-2-7.

11. Oleynikov I. V., Nechaeva V. S. The Results of the 14th International Scientific and Practical Conference "Russia and China: The History and Prospects of Cooperation" (Blagoveshchensk — Heihe, May 30 — June 2, 2024) // Russian and Chinese Studies. 2024. Vol. 8, No. 4. P. 356–364. DOI: 10.17150/2587-7445.2024.8(4).356-364.

12. Ассоциация международных автомобильных перевозчиков. Открыт регулярный пассажирский маршрут Благовещенск — Хэйхэ, проходящий по автомобильному мосту через реку Амур.

13. Дальневосточное таможенное управление. В 2,5 раза вырос пассажиропоток в пункте пропуска Благовещенск — Хэйхэ в 2024 году // Альта-Софт. 15.01.2025.

14. Xinhua. China–Russia Border Cities Thrive on Trade, Tourism // State Council Information Office of the People's Republic of China. 2025.

15. Ministry of Foreign Affairs of the People's Republic of China. Foreign Ministry Spokesperson Guo Jiakun's Regular Press Conference on September 2, 2025. Visa-Free Policy for Ordinary Passport Holders from Russia. 2025.

16. Министерство транспорта Российской Федерации. Один из крупнейших на Дальнем Востоке логистических терминалов — «Сухой порт Благовещенск» — введен в работу на ТОР «Амурская». 21.05.2026.

17. Ministry of Foreign Affairs of the People's Republic of China. Foreign Ministry Spokesperson Guo Jiakun's Regular Press Conference on May 20, 2026: Extension of Visa-Free Policy for Russian Citizens to December 31, 2027. 2026.

18. Хабаровская таможня. Количество транспортных средств на границе Благовещенск — Хэйхэ выросло вдвое до 92 тысяч с начала года // Альта-Софт. 03.08.2026.

19. Xinhua. Cross-Border Passenger Trips through Heihe Port Hit 1M Since Beginning of 2026. 15.09.2026.

20. Дальневосточное таможенное управление. Пассажиропоток в пункте пропуска Благовещенск увеличился в два раза // РБК Приморье. 26.07.2026.

21. Reuters. Russia's Far East to Test Drones and Unmanned Trucks for Trade with China. 17.08.2026.

22. Грузооборот моста Благовещенск — Хэйхэ составил 900 тыс. т за два года // РБК Приморье. 14.06.2024.

23. Василий Орлов: «Благовещенск станет центром сотрудничества России и

Китая» // Аргументы и факты — Хабаровск. 2025.

References

1. Setti A. No Fences, Good Neighbors: Measuring and Explaining Integration in European Cross-Border Regions // Journal of European Integration. 2025. Vol. 47, No. 5. P. 753–774. DOI: 10.1080/07036337.2024.2418293.

2. Bardal` A. B. Rossiya i Kitaj: vzaimodejstviya v sfere nazemnogo transporta na sovremennom e`tape // Regionalistika. 2024. T. 11. № 2. S. 59–73. DOI: 10.14530/reg.2024.2.59.

3. Zhao Y., Lyu L., Grimes S. An Analytical Framework for Cross-Border Regional Innovation Ecosystems: The Case of Shenzhen–Hong Kong Cross-Border Region // Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie. 2024. Vol. 115, No. 3. P. 402–417. DOI: 10.1111/tesg.12617.

4. Van L., Karabulatova I. S., Czzou Cz. Modelirovanie social`no-e`konomicheskogo i demograficheskogo razvitiya transgranichny`x regionov (na primere rossijsko-kitajskogo prigranich`ya) // DEMIS. Demograficheskie issledovaniya. 2024. T. 4. № 4. S. 26–51. DOI: 10.19181/demis.2024.4.4.2.

5. Fortescue S. The Reorientation of Russia’s Trade Corridors Since the Invasion of Ukraine // Post-Communist Economies. 2024. Vol. 36, No. 4. P. 405–431. DOI: 10.1080/14631377.2024.2324223.

6. Bardal` A. B. Transportny`j kompleks Dal`nego Vostoka: strukturny`e izmeneniya na fone obshhee`konomicheskoj dinamiki i geopoliticheskix shokov // Prostranstvennaya e`konomika. 2025. T. 21. № 2. S. 78–113. DOI: 10.14530/se.2025.2.078-113.

7. Bardal A. B. Cross-Border Transport Interactions between the Russian Federation and China in New Geopolitical Conditions // ЭКО. 2026. Т. 56. № 1. С. 178–194. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2026-1-178-194.

8. CAREC Institute. CAREC Corridor Performance Measurement and Monitoring Annual Report 2024. CAREC Program, 2026.

9. Zolotuxin I. N., Sun Cz. Avtomobil`noe soobshhenie v transportno-logisticheskoj

infrastrukture rossijsko-kitajskogo prigranich`ya v postpandemijny`j period: sostoyanie i perspektivy` // Rossiya i Kitaj: istoriya i perspektivy` sotrudnichestva. 2024. № 14. S. 451–458.

10. Rossijsko-kitajskij dialog: model` 2024: doklad № 94 / K. V. Babaev, Li Czzyan`min`, Yu. Yu. Mel`nikova i dr.; pod red. S. M. Gavrilovoj i dr. M.: Rossijskij sovet po mezhdunarodny`m delam, 2024. 98 s. ISBN 978-5-6051642-2-7.

11. Oleynikov I. V., Nechaeva V. S. The Results of the 14th International Scientific and Practical Conference “Russia and China: The History and Prospects of Cooperation” (Blagoveshchensk — Heihe, May 30 — June 2, 2024) // Russian and Chinese Studies. 2024. Vol. 8, No. 4. P. 356–364. DOI: 10.17150/2587-7445.2024.8(4).356-364.

12. Associaciya mezhdunarodny`x avtomobil`ny`x perevozchikov. Otkry`t regulyarny`j passazhirskij marshrut Blagoveshhensk — Xe`jxe`, proxodyashhij po avtomobil`nomu mostu cherez reku Amur.

13. Dal`nevostochnoe tamozhennoe upravlenie. V 2,5 raza vy`ros passazhiropotok v punkte propuska Blagoveshhensk — Xe`jxe` v 2024 godu // Al`ta-Soft. 15.01.2025.

14. Xinhua. China–Russia Border Cities Thrive on Trade, Tourism // State Council Information Office of the People’s Republic of China. 2025.

15. Ministry of Foreign Affairs of the People’s Republic of China. Foreign Ministry Spokesperson Guo Jiakun’s Regular Press Conference on September 2, 2025. Visa-Free Policy for Ordinary Passport Holders from Russia. 2025.

16. Ministerstvo transporta Rossijskoj Federacii. Odin iz krupnejshix na Dal`nem Vostoke logisticheskix terminalov — «Suxoj port Blagoveshhensk» — vveden v rabotu na TOR «Amurskaya». 21.05.2026.

17. Ministry of Foreign Affairs of the People’s Republic of China. Foreign Ministry Spokesperson Guo Jiakun’s Regular Press Conference on May 20, 2026: Extension of Visa-Free Policy for Russian Citizens to December 31, 2027. 2026.

18. Xabarovskaya tamozhnya. Kolichestvo transportny`x sredstv na granice Blagoveshhensk — Xe`jxe` vy`roslo vdvoe do 92 ty`syach s nachala goda // Al`ta-Soft.

03.08.2026.

19. Xinhua. Cross-Border Passenger Trips through Heihe Port Hit 1M Since Beginning of 2026. 15.09.2026.

20. Dal`nevostochnoe tamozhennoe upravlenie. Passazhiropotok v punkte propuska Blagoveshhensk uvelichilsya v dva raza // RBK Primor`e. 26.07.2026.

21. Reuters. Russia's Far East to Test Drones and Unmanned Trucks for Trade with China. 17.08.2026.

22. Gruzooborot mosta Blagoveshhensk — Xe`jxe` sostavil 900 ty`s. t za dva goda // RBK Primor`e. 14.06.2024.

23. Vasilij Orlov: «Blagoveshhensk stanet centrom sotrudnichestva Rossii i Kitaya» // Argumenty` i fakty` — Xabarovsk. 2025.

Статья поступила в редакцию 19.05.2026; одобрена после рецензирования 25.07.2026; принята к публикации 12.10.2026.

The article was submitted 19.05.2026; approved after peer review 25.07.2026; accepted for publication 12.10.2026.

Научная статья
УДК 911.3:314.7

МИГРАЦИОННЫЕ СЕТИ И УТЕЧКА ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО КАПИТАЛА ИЗ РОССИЙСКИХ РЕГИОНОВ

Стрельцов Михаил Александрович, кандидат географических наук, Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Россия, Санкт-Петербург, herzen.mikhail@yandex.ru

Аннотация. В статье исследуется пространственная организация внутренней миграции в России через призму сетевых взаимодействий и селективного перераспределения человеческого капитала. Эмпирическую базу составили деагрегированные данные Росстата о направлениях перемещений, возрасте и образовательном уровне мигрантов за 2011-2020 гг. С применением методов анализа социальных сетей и модифицированных гравитационных моделей рассчитаны показатели центральности узлов, а также оценена дистанционная чувствительность различных когорт переселенцев. В работе разграничен общий миграционный отток и целенаправленная убыль квалифицированных кадров, для чего введен специальный показатель квалификации. Установлено, что миграционная система страны характеризуется жесткой центро-периферийной асимметрией: два десятка главных макроузлов концентрируют основной приток, тогда как обширные периферийные территории выступают чистыми донорами. Выявлено, что высококвалифицированные мигранты демонстрируют существенно меньшую чувствительность к фактору расстояния, что провоцирует усиленный отток образованной молодежи из депрессивных и северных регионов в столичные агломерации. К пространственным последствиям такой сетевой конфигурации относятся кумулятивное демографическое старение удалённых районов и чрезмерная концентрация человеческого капитала в центрах экономического роста. Сделан вывод о необходимости корректировки региональной политики с

учетом сетевой природы расселения. Полученные результаты уточняют представления о механизмах пространственной сортировки населения и могут быть использованы при разработке схем территориального планирования.

Ключевые слова: внутренняя миграция; человеческий капитал; миграционные сети; межрегиональные потоки; сетевая центральность; гравитационная модель.

Original article

MIGRATION NETWORKS AND HUMAN CAPITAL DRAIN FROM RUSSIAN REGIONS

Streltsov Mikhail Aleksandrovich, Candidate of Geographical Sciences, Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg, Russia, herzen.mikhail@yandex.ru

Abstract. This article examines the spatial organization of internal migration in Russia through the lens of network interactions and the selective redistribution of human capital. The empirical base is comprised of disaggregated Rosstat data on migration directions, age, and educational attainment of migrants for 2011–2020. Using social network analysis and modified gravity models, node centrality indicators are calculated and the distance sensitivity of different migrant cohorts is assessed. The paper distinguishes between general migration outflow and targeted attrition of skilled personnel, introducing a special qualification indicator. It is established that the country's migration system is characterized by a strong center-periphery asymmetry: two dozen major macro-nodes concentrate the bulk of the influx, while vast peripheral territories act as net donors. It was found that highly skilled migrants exhibit significantly less sensitivity to the distance factor, which triggers an increased outflow of educated youth from depressed and northern regions to metropolitan agglomerations. The spatial consequences of this network configuration include cumulative demographic aging in remote areas and an exaggerated concentration of

intellectual resources in growth areas. It is concluded that regional policy needs to be adjusted to account for the network nature of settlement. The obtained results clarify understanding of the mechanisms of spatial population sorting and can be used in the development of territorial planning schemes.

Keywords: internal migration; human capital; migration networks; interregional flows; network centrality; gravity model.

Введение. Пространственное перераспределение населения является одним из важнейших механизмов адаптации социально-экономической системы к меняющимся внешним и внутренним условиям. В географической науке миграционные процессы традиционно анализируются в рамках теорий пространственного взаимодействия, согласно которым перемещения людей обусловлены не только классическими факторами притяжения и выталкивания, но и ограничениями, связанными с расстоянием [1]. Как показывают фундаментальные работы, интенсивность контактов между территориями зависит от их комплементарности и наличия промежуточных возможностей, что смещает фокус исследований с жестких гравитационных аналогий в сторону поведенческих моделей и теорий конкурирующих дестинаций [2-4].

Применительно к современной России этот теоретический аппарат позволяет раскрыть суть миграции как избирательного оттока человеческого капитала из периферийных зон в узлы экономического роста. Формирование жесткой центро-периферийной иерархии определяет векторы внутренних перемещений: население стягивается в крупные города и формирующиеся вокруг них пригороды, фактически игнорируя формальные административные границы. При этом миграционная привлекательность территории зависит не столько от ее абсолютного размера, сколько от макрогеографического положения и соседства с более мощными полюсами развития [5]. Возникает эффект, при котором одни агломерации аккумулируют ресурсы обширных прилегающих территорий, тогда как другие, даже располагая значительным

демографическим потенциалом, испытывают хроническую убыль из-за доминирования внешних центров притяжения.

Несмотря на большое число демографических исследований, пространственная картина этих процессов зачастую остается фрагментарной. Традиционный региональный анализ, оперирующий усредненными показателями по субъектам Российской Федерации, маскирует глубинные внутрирегиональные контрасты [6]. Огромные территории, такие как Красноярский край или Иркутская область, обладают колоссальной внутренней неоднородностью, где локальные центры конкурируют за человеческий капитал с общероссийскими узлами, подобными Москве и Санкт-Петербургу. Более того, фокус на межрегиональных обменах оставляет в тени феномен межпериферийных связей и роль статистического автовозврата. Последний, существенно искажая абсолютные масштабы миграционного прироста или убыли, парадоксальным образом почти не меняет саму географию и направление потоков между центрами и периферией [7].

Таким образом, миграция человеческого капитала в России представляет собой многомерную сетевую структуру. В этой структуре периферия выступает специфическим пространством, испытывающим двойное давление: со стороны собственных локальных центров и со стороны общероссийских магистральных узлов [8]. Понимание механизмов такой пространственной сортировки требует отказа от упрощенных бинарных моделей в пользу детального анализа потоков на уровне муниципальных образований и городских округов, что и обуславливает актуальность и научную новизну настоящего исследования.

Обзор литературы. Гравитационные модели пространственного взаимодействия зародились из эмпирических наблюдений за закономерностями перемещения населения между территориями. Ещё Равенштейн обратил внимание на то, что интенсивность миграционных связей убывает по мере увеличения расстояния и возрастает при росте численности пунктов отправления и назначения. О'Келли [9] подробно проследил развитие этих представлений от

грубых ньютоновских аналогий к строгим вероятностным спецификациям, в которых ожидаемый поток между узлами i и j описывается как функция потенциала территории отправления V_i, притягательности территории назначения W_j и затухающего влияния дистанции d_{ij}, возведённого в степень β. Калибровка этого параметра, контролирующего чувствительность миграционного поведения к пространственному трению, до сих пор остаётся одной из ключевых задач в региональной науке, поскольку именно от его величины зависят прогнозные оценки перераспределения населения.

Существенный теоретический сдвиг произошёл, когда стало ясно, что выбор мигрантом конкретного направления определяется не только характеристиками конкретной пары территорий отправления и назначения, но и наличием альтернативных пунктов назначения поблизости. Фотерингем [10] выдвинул теорию конкурирующих дестинаций, согласно которой притягательность данного центра снижается, если поблизости расположены сопоставимые по возможностям города, перехватывающие часть потока. Несколькими годами ранее Уилсон [11] построил семейство моделей с ограничениями по производству и притяжению, продемонстрировав, что балансирующие множители A_i и B_j позволяют воспроизводить наблюдаемые маргинальные итоги матриц «отправление-назначение» с высокой точностью. Эти исследования заложили основу сетевого подхода к миграции, в рамках которого каждый населённый пункт рассматривается как узел общей системы пространственных связей.

Применительно к России центро-периферийная асимметрия миграционных потоков получила детальное эмпирическое обоснование в исследовании Мкртчяна [12]. Опираясь на деагрегированные данные Росстата за 2011-2020 гг., он разделил территорию страны на 137 центров, городов с населением свыше 100 тыс. человек вместе с их пригородами, и 82 периферийных зоны. Главный вывод этой работы состоит в том, что лишь 21 крупный узел концентрирует основные межрегиональные миграционные

потоки, тогда как почти половина центров испытывает миграционную убыль, не компенсируемую даже притоком из собственной периферии. Ранее Зубаревич [13] объясняла подобную поляризацию рентой столичного статуса, а Нефёдова и Трейвиш [14] документировали сжатие освоенных пространств в центральной части страны, сопровождающееся усилением оттока из глубинных районов.

Количественная сторона миграционного обмена, однако, не раскрывает качественной структуры потоков, хотя именно состав перемещающегося населения по возрасту и уровню образования определяет, насколько территория теряет или приобретает человеческий капитал. Григоричев [15] на примере Иркутской агломерации показал, что субурбанизированные зоны притягивают преимущественно молодые семьи, тогда как Кашницкий [16] зафиксировал избирательный отток молодёжи из периферийных районов Центральной России в направлении крупнейших городов. Эти наблюдения указывают на необходимость разграничивать общий миграционный оборот и избирательное перемещение образованных групп. Такое разграничение до настоящего времени не получило систематического освещения в отечественной географической литературе и составляет предмет настоящего исследования.

Материалы и методы исследования. Эмпирическую основу составляют агрегированные сведения о межрегиональной миграции населения России за 2011–2020 гг. Единицей анализа является направленный миграционный поток между территорией выбытия и территорией прибытия. Для сетевого представления каждый регион рассматривается как узел, а число зарегистрированных перемещений между регионами — как вес направленного ребра. Сравнимость панельной совокупности требует приведения региональных границ и состава административных единиц к единой территориальной классификации.

Показатель квалификационной структуры миграционного оттока определяется выражением $Q = М_{высш}/М_{общ} \times 100\ \%$, где $М_{высш}$ — число выбывших лиц с высшим и незаконченным высшим образованием, $М_{общ}$ —

общее число выбывших лиц в той же возрастной и территориальной совокупности за соответствующий период.

Сетевая структура миграционных потоков исследовалась методами анализа социальных сетей (SNA). Каждый субъект Российской Федерации выступал в роли узла, а взвешенные направленные рёбра отражали интенсивность обмена между парами регионов. Рассчитывались три меры центральности: in-degree, характеризующая суммарный приток и позволяющая идентифицировать реципиентные макроузлы; out-degree, указывающая на донорские территории; betweenness, выявляющая регионы, через которые проходят транзитные потоки, соединяющие отдалённые части страны с основными центрами притяжения.

Наряду с сетевым анализом применялась модифицированная гравитационная модель, в которой стандартная спецификация $M_{ij} = kV_iW_j\ f(c_{ij})$ дополнена переменной квалификации. Функция затухания $f(c_{ij})$ задана как отрицательная степенная зависимость от расстояния между административными центрами субъектов, а параметр β оценивался методом максимального правдоподобия отдельно для общего потока и для потока высококвалифицированных мигрантов [17]. Такое разделение даёт возможность проверить предположение о том, что образованные мигранты менее чувствительны к дистанции и чаще преодолевают значительные расстояния ради переезда в крупные агломерации.

Результаты исследования и их обсуждение. Построенные матрицы межрегиональных потоков подтверждают крайне неравномерное распределение миграционных связей по территории страны. Из 85 субъектов Федерации устойчивый положительный баланс во внутрироссийской миграции на протяжении всего десятилетия демонстрировали не более 15 регионов, тогда как остальные выступали чистыми донорами. На рисунке 1 представлена схема сетевой структуры, в которой толщина рёбер пропорциональна объёму потока, а размер узлов соответствует показателю in-degree. Визуально отчётливо

выделяются три макрорегиональных кластера притяжения (Московский, Санкт-Петербургский и Южный), стягивающие население как из ближайшего окружения, так и из отдалённых восточных и северных территорий. При этом Московский узел принимает потоки практически из всех макрорегионов, тогда как Южный кластер ориентирован на европейскую часть страны и Северный Кавказ.

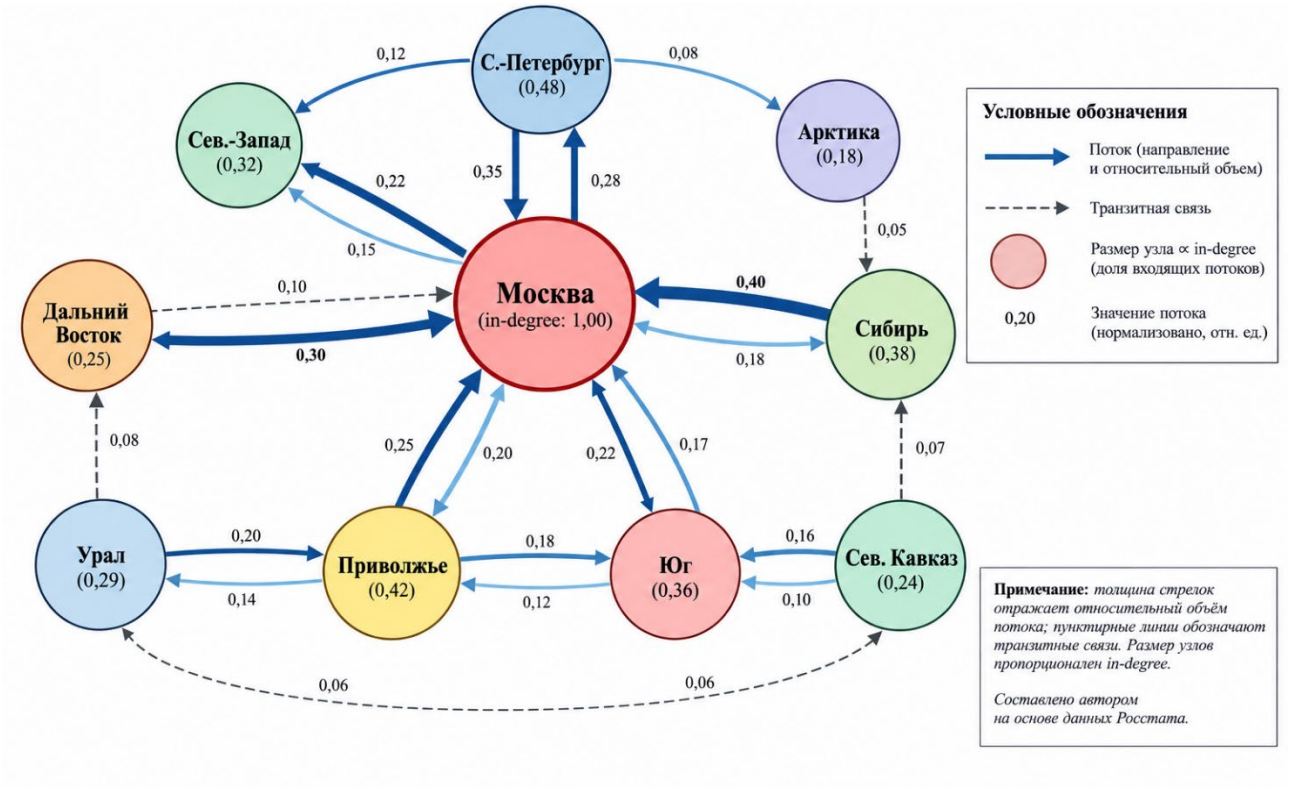


Рисунок 1 - Сетевая структура межрегиональных миграционных потоков России, 2011-2020 гг. (источник: разработано автором)

Таблица 1 детализирует структуру потоков между укрупнёнными макрорегионами и позволяет сопоставить общий отток с его квалифицированной составляющей. Обращает на себя внимание разрыв между долей высококвалифицированных мигрантов в потоках из Арктической зоны и Дальнего Востока и аналогичным показателем для депрессивных областей Центральной России. Если из регионов Европейского Севера и Сибири уезжают преимущественно лица со средним профессиональным образованием, чьи перемещения связаны с вахтовой занятостью и ротационными схемами, то в оттоке из Костромской, Ивановской и Смоленской областей доля лиц с высшим

образованием достигает 35–40%, что заметно превышает среднероссийский уровень. Периферия ЦФО, таким образом, теряет наиболее мобильную и образованную часть населения.

Таблица 1 - Матрица межрегиональных миграционных потоков и доля высококвалифицированных мигрантов (Q) в оттоке из макрорегионов России, 2011-2020 гг.

Макрорегион отправления → Макрорегион назначения	Центр	Сев.-Запад	Юг	Приволжье	Урал	Сибирь	Д. Восток	Итого отток, тыс. чел.	Q оттока, %
Центр (без Москвы)	-	48,2	97,4	62,1	18,7	14,3	5,8	246,5	37,2
Сев.-Запад (без СПб)	112,6	-	23,1	19,4	8,2	11,7	4,1	179,1	31,5
Юг и Сев. Кавказ	187,3	34,5	-	41,8	12,6	9,4	3,2	288,8	26,8
Приволжье	214,7	42,1	68,3	-	37,5	28,6	6,4	397,6	29,4
Урал	89,4	18,7	31,2	44,6	-	52,3	7,8	244,0	27,1
Сибирь	198,5	37,8	74,6	53,2	41,7	-	18,4	424,2	24,6
Д. Восток	142,3	28,4	56,1	22,7	14,8	31,2	-	295,5	23,8
Арктическая зона*	76,8	19,2	28,4	15,3	11,6	24,7	8,3	184,3	21,3

Источник: разработано автором.

Примечание: Q - доля лиц с высшим и незаконченным высшим образованием в потоке выбывших. Среднероссийский уровень Q для внутренних мигрантов трудоспособного возраста ≈ 28%. Арктическая зона выделена как совокупность северных территорий Мурманской обл., Ненецкого АО, Ямало-Ненецкого АО, Чукотского АО и северных районов Республики Коми.

Расчёт показателей центральности (табл. 2) количественно фиксирует иерархию узлов в миграционной сети. Результаты сетевого анализа показывают высокую структурную значимость Москвы и Московской области в системе межрегиональных миграционных связей. Показатели входящей взвешенной степени характеризуют концентрацию направленных потоков, тогда как центральность посредничества отражает положение узла в топологической структуре сети относительно кратчайших либо иных заданных маршрутов между узлами. Северная столица занимает вторую позицию по притоку, однако её посредническая функция значительно слабее - потоки из Северо-Запада

направляются туда напрямую, минуя промежуточные узлы. Краснодарский край выделяется высоким показателем близости, что объясняется географическим положением на пересечении маршрутов из европейской части страны и Северного Кавказа, а также природно-климатической привлекательностью, действующей как дополнительный фактор притяжения [18].

Таблица 2 - Показатели центральности макроузлов в сети внутренней миграции России, 2011-2020 гг.

Макроузел	In-degree (норм.)	Out-degree (норм.)	Betweenness	Closeness	Тип узла
Москва и МО	0,94	0,31	0,78	0,89	Реципиент-хаб
Санкт-Петербург и ЛО	0,72	0,28	0,22	0,74	Реципиент
Краснодарский край	0,61	0,34	0,41	0,82	Реципиент-транзит
Тюменская обл. (с АО)	0,48	0,39	0,35	0,61	Реципиент локальный
Новосибирская обл.	0,44	0,37	0,29	0,58	Реципиент локальный
Свердловская обл.	0,38	0,42	0,18	0,53	Балансированный
Республика Татарстан	0,35	0,41	0,15	0,51	Балансированный
Омская обл.	0,22	0,56	0,07	0,38	Донор
Волгоградская обл.	0,19	0,58	0,05	0,35	Донор
Республика Коми	0,11	0,67	0,03	0,28	Донор периферийный
Магаданская обл.	0,08	0,71	0,01	0,22	Донор периферийный

Источник: разработано автором.

Применение гравитационной модели позволяет оценивать статистическую зависимость межрегиональных миграционных потоков от расстояния и характеристик территорий отправления и назначения. В рассматриваемых спецификациях получены различные значения параметра дистанционного затухания β для общего и квалифицированного миграционного потока. Этот результат согласуется с выводами Мкртчяна [12] о том, что значительную часть притока в мегаполисы составляют жители крупных городов удалённых регионов, располагающие достаточными ресурсами для преодоления ценового барьера на столичном рынке жилья.

Пространственные последствия выявленной сетевой конфигурации носят кумулятивный характер. Донорские макрорегионы сталкиваются с двойным давлением: общий отток населения усугубляется избирательной потерей молодых специалистов, что ускоряет демографическое старение и сужает базу для воспроизводства человеческого капитала на местах. Периферийные территории, по данным Мкртчяна [12], за десятилетие потеряли 3,65 млн человек с учётом автовозврата и 5,67 млн без его учёта, причём интенсивность убыли в наиболее пострадавших районах Республики Коми достигала 2,3% в год. Столичные агломерации, напротив, наращивают концентрацию квалифицированных кадров, что усиливает их конкурентное преимущество и замыкает петлю положительной обратной связи, описанную в теориях кумулятивного роста.

Полученные результаты показывают, что сетевая структура миграции влияет на пространственную организацию социально-экономических процессов в стране. Выявленная избирательность оттока означает, что стандартные меры региональной политики, ориентированные на сохранение численности населения, могут оказаться недостаточными: территория может сохранять общую численность жителей, но при этом терять квалифицированные кадры [18]. Дальнейшие исследования, по-видимому, должны сосредоточиться на динамике сетевых связей в условиях изменяющейся экономической конъюнктуры и на оценке пороговых значений оттока, после которых периферийный регион утрачивает потенциал самостоятельного развития.

Выводы. Проведённый анализ межрегиональных потоков показывает, что внутренняя мобильность населения России сформировалась как асимметричная сетевая структура. Вместо линейного перетекания трудовых ресурсов из депрессивных зон в точки роста наблюдается сложная система пространственного взаимодействия, где периферийные территории оказываются в зоне одновременного влияния собственных локальных узлов и общероссийских магистральных центров притяжения. Формирование такой

структуры означает, что классические гравитационные модели, учитывающие лишь массу и дистанцию, требуют существенной корректировки с поправкой на конкурирующие дестинации и избирательную чувствительность мигрантов к расстоянию в зависимости от их квалификационного уровня.

Ключевым пространственно-демографическим вызовом становится не столько абсолютная убыль численности жителей на обширных пространствах, сколько селективный характер этого оттока. Из 82 выделенных периферийных зон наиболее уязвимыми оказываются регионы, теряющие молодые и образованные когорты. Этот процесс запускает механизм кумулятивного демографического старения глубинных районов, сужая базу для воспроизводства человеческого капитала на местах [19]. В то же время 21 крупнейший центр-реципиент, на который приходится основной миграционный прирост, сталкивается с перегрузкой инфраструктуры и усилением конкуренции на локальных рынках труда и жилья, что в перспективе может снизить привлекательность этих центров.

Выявленная картина заставляет пересмотреть подходы к оценке регионального развития, традиционно опирающиеся на жесткое административно-территориальное деление. Статистическая фиксация миграции в разрезе субъектов Российской Федерации часто маскирует глубинные внутрирегиональные диспропорции. Как показывают расчеты с учетом и без учета статистического автовозврата, формальное сохранение численности населения в отдельном регионе может сопровождаться критической деградацией его периферийной части. Результаты анализа пространственного взаимодействия показывают, что образованные мигранты легче преодолевают большие расстояния, вследствие чего удалённые северные и восточные территории становятся источниками оттока наиболее мобильных групп населения в столичные агломерации и города юга страны.

Преодоление формирующихся диспропорций требует перехода от политики, ориентированной преимущественно на удержание населения, к

стратегии управления сетевыми связями. Географическая наука должна предложить механизмы укрепления центров второго порядка, способных частично удерживать миграционные потоки, направляющиеся в крупнейшие центры расселения. Дальнейшие исследования в рамках экономической и социальной географии целесообразно сосредоточить на выявлении пороговых значений миграционной убыли, при которых периферийный регион утрачивает способность к самостоятельному экономическому воспроизводству, а также на оценке роли межпериферийных связей в смягчении центро-периферийных контрастов. Именно понимание сетевой природы расселения позволит разработать инструменты пространственного планирования, соответствующие реальным пространственным процессам.

Список литературы

1. Смирнов А. В. Межрегиональные миграционные потоки в России: сетевой подход // AlterEconomics. 2024. Т. 21. № 2. С. 286–301. DOI: 10.31063/AlterEconomics/2024.21-2.7.

2. Wachs J. Digital Traces of Brain Drain: Developers during the Russian Invasion of Ukraine // EPJ Data Science. 2023. Vol. 12. Art. 14. DOI: 10.1140/epjds/s13688-023-00389-3.

3. Олейник Е. Б., Ивашина Н. В., Храмова М. Н. Оценка влияния мотивационных факторов на формирование эмиграционных настроений молодых специалистов в регионах Дальневосточного федерального округа // Народонаселение. 2024. Т. 27. № 3. С. 17–30. DOI: 10.24412/1561-7785-2024-3-17-30.

4. Meister M., Niebuhr A., Peters J. C., Stiller J. Local Attributes and Migration Balance – Evidence for Different Age and Skill Groups from a Machine Learning Approach // Regional Science Policy & Practice. 2023. Vol. 15. No. 4. P. 794–825. DOI: 10.1111/rsp3.12652.

5. Махотаева М. Ю., Николаев М. А. Миграция специалистов с высшим образованием в России: оценка факторов и моделирование процессов // Journal

of Applied Economic Research. 2023. T. 22. № 1. C. 120–141. DOI: 10.15826/vestnik.2023.22.1.006.

6. Anastasiadou A., Volgin A., Leasure D. R. War and Mobility: Using Yandex Web Searches to Characterize Intentions to Leave Russia after Its Invasion of Ukraine // Demographic Research. 2024. Vol. 50. No. 8. P. 205–220. DOI: 10.4054/DemRes.2024.50.8.

7. Ситковский А. М., Дождиков А. В. Внутрироссийская образовательная миграция молодежи: привлекательность регионов для получения высшего образования // Образование и наука. 2025. Т. 27. № 6. С. 149–179. DOI: 10.17853/1994-5639-2025-6-149-179.

8. D'Ingiullo D., Quaglione D. Social Capital and the Internal Mobility of Graduates: A Gravity Model at the Italian Provincial Level // The Annals of Regional Science. 2025. Vol. 74. Art. 95. DOI: 10.1007/s00168-025-01425-y.

9. Дождиков А. В. Межрегиональная миграция молодежи в Российской Федерации // ДЕМИС. Демографические исследования. 2024. Т. 4. № 3. С. 119–137. DOI: 10.19181/demis.2024.4.3.8.

10. Akbaritabar A., Dańko M. J., Zhao X., Zagheni E. Global Subnational Estimates of Migration of Scientists Reveal Large Disparities in Internal and International Flows // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2025. Vol. 122. No. 15. Art. e2424521122. DOI: 10.1073/pnas.2424521122.

11. Храмова М. Н., Зорин Д. П. Межрегиональная миграция на Дальнем Востоке России и ее влияние на демографическую безопасность // ДЕМИС. Демографические исследования. 2024. Т. 4. № 4. С. 152–164. DOI: 10.19181/demis.2024.4.4.9.

12. Sarra A., D'Ingiullo D., Evangelista A., Nissi E., Quaglione D., Di Battista T. A Network Analysis of Skill-Specific Internal Migration Flows in Italy // Socio-Economic Planning Sciences. 2025. Vol. 100. Art. 102225. DOI: 10.1016/j.seps.2025.102225.

13. Питухин Е. А., Зятева О. А., Щеголева Л. В., Соколов В. Е. Образовательная

миграция в регионах России: статистический подход // Высшее образование в России. 2023. Т. 32. № 8–9. С. 48–69. DOI: 10.31992/0869-3617-2023-32-8-9-48-69.

14. Gao X., Zhu J., Zhu H., Zhang X. Spatial Spillover Effects of Skilled Migration on Innovation in China // Heliyon. 2024. Vol. 10. No. 11. Art. e30849. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e30849.

15. Шимановский Д. В. Влияние миграции человеческого капитала на экономический рост регионов России: эконометрический анализ // Бизнес. Образование. Право. 2024. № 3(68). С. 153–163. DOI: 10.25683/VOLBI.2024.68.1087.

16. Barrios González M. C., Jandrić M., Molnar D., Tanasković S. The Effects of Internal Migration on Regional Convergence: Evidence from Serbia // Papers in Regional Science. 2024. Vol. 103. No. 6. Art. 100062. DOI: 10.1016/j.pirs.2024.100062.

17. Смирнов А. В. Сетевой подход к изучению миграционных потоков в СССР и России // Демографическое обозрение. 2025. Т. 12. № 2. С. 35–68. DOI: 10.17323/demreview.v12i2.27491.

18. Blanco-Álvarez J., González-López M. Agglomeration of Knowledge Intensive Activities as Driver of High Skilled Inter-Regional Migration: A Gravity Model with Spanish Labor Mobility Data // Papers in Regional Science. 2026. Vol. 105. No. 3. Art. 100149. DOI: 10.1016/j.pirs.2026.100149.

19. Бородкин М. А. Влияние миграционных процессов на развитие человеческого капитала региона (кейс молодежной миграции в Свердловской области и Пермском крае) // Вестник Пермского университета. Философия. Психология. Социология. 2026. № 1. С. 137–152. DOI: 10.17072/2078-7898/2026-1-137-152.

References

1. Smirnov A. V. Mezhregional'nye migratsionnye potoki v Rossii: setevoi podkhod // AlterEconomics. 2024. T. 21. № 2. S. 286–301. DOI:

10.31063/AlterEconomics/2024.21-2.7.

2. Wachs J. Digital Traces of Brain Drain: Developers during the Russian Invasion of Ukraine // EPJ Data Science. 2023. Vol. 12. Art. 14. DOI: 10.1140/epjds/s13688-023-00389-3.

3. Oleinik E. B., Ivashina N. V., Khramova M. N. Otsenka vliyaniya motivatsionnykh faktorov na formirovanie emigratsionnykh nastroenii molodykh spetsialistov v regionakh Dal'nevostochnogo federal'nogo okruga // Narodonaselenie. 2024. T. 27. № 3. S. 17–30. DOI: 10.24412/1561-7785-2024-3-17-30.

4. Meister M., Niebuhr A., Peters J. C., Stiller J. Local Attributes and Migration Balance – Evidence for Different Age and Skill Groups from a Machine Learning Approach // Regional Science Policy & Practice. 2023. Vol. 15. No. 4. P. 794–825. DOI: 10.1111/rsp3.12652.

5. Makhotaeva M. Yu., Nikolaev M. A. Migratsiya spetsialistov s vysshim obrazovaniem v Rossii: otsenka faktorov i modelirovanie protsessov // Journal of Applied Economic Research. 2023. T. 22. № 1. S. 120–141. DOI: 10.15826/vestnik.2023.22.1.006.

6. Anastasiadou A., Volgin A., Leasure D. R. War and Mobility: Using Yandex Web Searches to Characterize Intentions to Leave Russia after Its Invasion of Ukraine // Demographic Research. 2024. Vol. 50. No. 8. P. 205–220. DOI: 10.4054/DemRes.2024.50.8.

7. Sitkovskii A. M., Dozhdikov A. V. Vnutrirossiiskaya obrazovatel'naya migratsiya molodezhi: privlekatel'nost' regionov dlya polucheniya vysshego obrazovaniya // Obrazovanie i nauka. 2025. T. 27. № 6. S. 149–179. DOI: 10.17853/1994-5639-2025-6-149-179.

8. D'Ingiullo D., Quaglione D. Social Capital and the Internal Mobility of Graduates: A Gravity Model at the Italian Provincial Level // The Annals of Regional Science. 2025. Vol. 74. Art. 95. DOI: 10.1007/s00168-025-01425-y.

9. Dozhdikov A. V. Mezhregional'naya migratsiya molodezhi v Rossiiskoi Federatsii // DEMIS. Demograficheskie issledovaniya. 2024. T. 4. № 3. S. 119–137. DOI:

10.19181/demis.2024.4.3.8.

10. Akbaritabar A., Dańko M. J., Zhao X., Zagheni E. Global Subnational Estimates of Migration of Scientists Reveal Large Disparities in Internal and International Flows // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2025. Vol. 122. No. 15. Art. e2424521122. DOI: 10.1073/pnas.2424521122.

11. Khramova M. N., Zorin D. P. Mezhregional'naya migratsiya na Dal'nem Vostoke Rossii i ee vliyanie na demograficheskuyu bezopasnost' // DEMIS. Demograficheskie issledovaniya. 2024. T. 4. № 4. S. 152–164. DOI: 10.19181/demis.2024.4.4.9.

12. Sarra A., D'Ingiullo D., Evangelista A., Nissi E., Quaglione D., Di Battista T. A Network Analysis of Skill-Specific Internal Migration Flows in Italy // Socio-Economic Planning Sciences. 2025. Vol. 100. Art. 102225. DOI: 10.1016/j.seps.2025.102225.

13. Pitukhin E. A., Zyateva O. A., Shchegoleva L. V., Sokolov V. E. Obrazovatel'naya migratsiya v regionakh Rossii: statisticheskii podkhod // Vysshee obrazovanie v Rossii. 2023. T. 32. № 8–9. S. 48–69. DOI: 10.31992/0869-3617-2023-32-8-9-48-69.

14. Gao X., Zhu J., Zhu H., Zhang X. Spatial Spillover Effects of Skilled Migration on Innovation in China // Heliyon. 2024. Vol. 10. No. 11. Art. e30849. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e30849.

15. Shimanovskii D. V. Vliyanie migratsii chelovecheskogo kapitala na ekonomicheskii rost regionov Rossii: ekonometricheskii analiz // Biznes. Obrazovanie. Pravo. 2024. № 3(68). S. 153–163. DOI: 10.25683/VOLBI.2024.68.1087.

16. Barrios González M. C., Jandrić M., Molnar D., Tanasković S. The Effects of Internal Migration on Regional Convergence: Evidence from Serbia // Papers in Regional Science. 2024. Vol. 103. No. 6. Art. 100062. DOI: 10.1016/j.pirs.2024.100062.

17. Smirnov A. V. Setevoi podkhod k izucheniyu migratsionnykh potokov v SSSR i Rossii // Demograficheskoe obozrenie. 2025. T. 12. № 2. S. 35–68. DOI: 10.17323/demreview.v12i2.27491.

18. Blanco-Álvarez J., González-López M. Agglomeration of Knowledge Intensive

Activities as Driver of High Skilled Inter-Regional Migration: A Gravity Model with Spanish Labor Mobility Data // Papers in Regional Science. 2026. Vol. 105. No. 3. Art. 100149. DOI: 10.1016/j.pirs.2026.100149.

19. Borodkin M. A. Vliyanie migratsionnykh protsessov na razvitie chelovecheskogo kapitala regiona (keis molodezhnoi migratsii v Sverdlovskoi oblasti i Permskom krae) // Vestnik Permskogo universiteta. Filosofiya. Psikhologiya. Sotsiologiya. 2026. № 1. S. 137–152. DOI: 10.17072/2078-7898/2026-1-137-152.

Статья поступила в редакцию 11.08.2026; одобрена после рецензирования 08.09.2026; принята к публикации 12.10.2026.

The article was submitted 11.08.2026; approved after peer review 08.09.2026; accepted for publication 12.10.2026.

Научная статья

УДК 911.3:614.2

ДОСТУПНОСТЬ МЕДИЦИНСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПЕРИФЕРИЙНЫХ ТЕРРИТОРИЙ В КОНТЕКСТЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ СПРАВЕДЛИВОСТИ

Гацаева Лиана Саидовна, кандидат географических наук, научный сотрудник, Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, Россия, Грозный, grozny.liana@mail.ru;

Татаринцев Сергей Александрович, кандидат географических наук, Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева, Россия, Астрахань, astrakhan.sergei@inbox.ru

Аннотация. Неравномерность пространственного развития и центро-периферийная дифференциация формируют устойчивые барьеры для обеспечения базовыми социальными услугами жителей удаленных территорий. Теоретико-методологическую основу исследования составляют концепции экономической географии, учитывающие влияние институциональных ограничений на величину экономического расстояния. В статье переосмысляются критерии пространственной справедливости в сфере охраны здоровья через призму фактической доступности первичной медико-санитарной помощи. На примере периферийных муниципальных образований Иркутской области, характеризующихся сложной системой расселения и выраженной сезонностью транспортных связей, выполнено геоинформационное моделирование. Применен адаптированный метод двухшагового зонного анализа с плавающей зоной охвата (2SFCA), модифицированный с учетом реального дорожного трения, сезонной доступности маршрутов и фактической пропускной способности учреждений. Картографирование зон медицинской депривации позволило выявить локальные территории с низкой доступностью медицинской помощи, не выявляемые при использовании усредненных региональных показателей. Смоделированный сценарий оптимизации сети

показал существенное увеличение времени в пути для уязвимых демографических групп, что свидетельствует об ограниченности подхода к реорганизации отрасли, основанного только на финансовых показателях. Результаты показывают, что закрытие малых медицинских пунктов без учета пространственной доступности увеличивает вынужденные поездки населения за медицинской помощью и усиливает территориальные различия, что требует перехода к гибким мобильным форматам обслуживания, учитывающим сложившиеся тенденции расселения. Предложенные подходы могут быть использованы органами регионального управления для адресного планирования инфраструктуры и разработки адаптивных форматов оказания услуг.

Ключевые слова: медицинская география; пространственная справедливость; периферийные территории; транспортная доступность; первичная медицинская помощь.

Original article

SPATIAL EQUITY AND ACCESSIBILITY OF MEDICAL INFRASTRUCTURE IN PERIPHERAL AREAS

Gatsaeva Liana Saidovna, Candidate of Geographical Sciences, Researcher, Kh. I. Ibragimov Complex Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia, grozny.liana@mail.ru;

Tatarintsev Sergei Aleksandrovich, Candidate of Geographical Sciences, Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev, Astrakhan, Russia, astrakhan.sergei@inbox.ru

Abstract. Uneven spatial development and center-periphery differentiation create persistent barriers to the provision of basic social services to residents of remote areas. The theoretical and methodological basis of the study is based on concepts of economic geography, which consider the influence of institutional constraints on the transformation of economic distance. This article rethinks the criteria of spatial equity in health care through the prism of the actual accessibility of primary health care. Using

the example of peripheral municipalities of the Irkutsk region, characterized by extreme settlement parameters and pronounced seasonality of transport links, geoinformation modeling was performed. An adapted two-step zonal analysis with a floating catchment area (2SFCA) was applied, modified to account for actual road friction, seasonal route availability, and the actual capacity of institutions. Mapping zones of medical deprivation revealed hidden local enclaves of territorial exclusion, statistically masked by average regional indicators. A simulated network optimization scenario demonstrated a critical increase in the transportation distance for vulnerable demographic groups, demonstrating the ineffectiveness of a purely accounting approach to sector reorganization. The results confirm that the mechanical closure of small medical centers provokes forced commuting and exacerbates social polarization, necessitating a transition to flexible, mobile service formats that integrate with objective settlement trends. The proposed approaches can be used by regional governments for targeted infrastructure planning and the development of adaptive service delivery formats.

Keywords: medical geography; spatial justice; peripheral territories; transport accessibility; primary healthcare.

Введение. Формирование единого социально-экономического каркаса России исторически сопряжено с преодолением колоссальных расстояний и зонированием территорий по уровню хозяйственного освоения. В современной региональной науке утвердилось понимание того, что пространственное развитие по своей природе не может быть равномерным. Действие центро-периферийных механизмов ведет к концентрации человеческого и финансового капитала в узлах роста, тогда как обширные периферийные ареалы сталкиваются с кумулятивными эффектами депопуляции и инфраструктурного сжатия [1], [2]. На этом фоне доступность базовых социальных услуг становится не только задачей социальной защиты, но и показателем пространственной справедливости и территориальной целостности государства. Способность

системы здравоохранения гарантировать сохранение человеческого капитала независимо от места жительства гражданина становится критическим фактором, определяющим жизнеспособность удаленных поселений [3], [4].

Территориальная организация системы здравоохранения наиболее остро реагирует на диспропорции расселения. Медицинская помощь относится к числу базовых общественных благ, доступность которых должна частично компенсировать неблагоприятные последствия проживания в сложных природно-климатических или экономических условиях. Однако рыночные механизмы и агломерационные эффекты способствуют концентрации медицинских специалистов в крупных городах, где выше оплата труда, лучше развита профессиональная среда и шире возможности для карьерного роста [5-7]. В результате удаленные и малонаселенные территории, особенно в зонах сельской периферии и старопромышленных моногородов, оказываются в ситуации структурного дефицита кадров [8]. Возникает серьезный географический парадокс: именно в регионах, несущих максимальное бремя демографического старения и нуждающихся в интенсивном медицинском обслуживании, потенциал системы здравоохранения оказывается наиболее ослабленным из-за оттока квалифицированных специалистов в центры.

Традиционные подходы к оценке обеспеченности медицинскими кадрами, как правило, опираются на расчет региональной доступности, выражаемой через отношение числа врачей к количеству жителей в пределах административных границ. Подобная методология, несмотря на свою простоту и удобство для нормативного планирования, обладает существенным недостатком. Она игнорирует фактическое пространственное распределение спроса и предложения внутри самого региона, а также предполагает условную непроницаемость административных рубежей. В реальности пациенты готовы преодолевать значительные расстояния ради получения квалифицированной помощи, пересекая границы муниципальных образований, тогда как физическая удаленность и транспортное трение выступают куда более жесткими барьерами,

чем формальное наличие коечного фонда в соседнем районе [9-11]. Переход от констатации факта наличия медицинских учреждений к анализу потенциальной пространственной доступности требует учета экономического расстояния, транспортных издержек и временных затрат на преодоление пути от места проживания до места оказания услуги.

Сетевой анализ доступности, основанный на методах плавающих зон охвата и гравитационного моделирования, позволяет преодолеть ограничения усредненных статистических показателей. Оценивая доступность через призму реального времени в пути по транспортной сети с учетом конкуренции за ресурсы со стороны жителей соседних территорий, исследователи получают возможность выявить скрытые локальные анклавы депривации [12]. Такие анклавы статистически растворяются в средних значениях по муниципальному району или субъекту федерации, маскируя реальную картину территориального неравенства [13]. Таким образом, проблема пространственной справедливости в здравоохранении выходит за рамки простого перераспределения бюджетных трансфертов. Она требует глубокого географического исследования того, как физическая и экономическая удаленность формируют барьеры для сохранения человеческого капитала на обширных, но слабо освоенных пространствах страны, диктуя необходимость адаптации территориальной организации отрасли к объективным реалиям пространственного развития.

Обзор литературы. Исследования пространственного развития России связывают центро-периферийные процессы с концентрацией человеческого капитала в узлах роста и усилением депопуляции и инфраструктурного сжатия периферийных территорий [14–16]. В этих условиях доступность базовых социальных услуг рассматривается как один из показателей пространственной справедливости.

Традиционные подходы к оценке обеспеченности медицинскими кадрами, как правило, опираются на расчет региональной доступности, выражаемой через отношение числа врачей к количеству жителей в пределах административных

границ. Подобная методология, несмотря на свою простоту и удобство для нормативного планирования, обладает существенным недостатком. Она игнорирует фактическое пространственное распределение спроса и предложения внутри самого региона, а также предполагает условную непроницаемость административных рубежей. В реальности пациенты готовы преодолевать значительные расстояния ради получения квалифицированной помощи, пересекая границы муниципальных образований, тогда как физическая удаленность и транспортное трение выступают куда более жесткими барьерами. Переход от констатации факта наличия медицинских учреждений к анализу потенциальной пространственной доступности требует учета экономического расстояния, транспортных издержек и временных затрат на преодоление пути от места проживания до места оказания услуги.

Сетевой анализ доступности, базирующийся на методах плавающих водосборов и гравитационного моделирования, позволяет преодолеть ограничения усредненных статистических показателей. Оценивая доступность через призму реального времени в пути по транспортной сети с учетом конкуренции за ресурсы со стороны жителей соседних территорий, исследователи получают возможность выявить скрытые локальные анклавы депривации. Такие анклавы статистически растворяются в средних значениях по муниципальному району или субъекту федерации, маскируя реальную картину территориального неравенства. Для периферийных регионов, где плотность дорожной сети крайне низка, а сезонные факторы многократно увеличивают транспортные барьеры, именно сетевые модели дают адекватное представление о доступности медицинской инфраструктуры [17], [18].

Материалы и методы исследования. В работе рассматривается пространственная доступность первичной медицинской помощи на периферийных территориях Иркутской области. Для сравнительной оценки используются четыре муниципальных района: Катангский, Киренский, Мамско-Чуйский и Усть-Илимский. Аналитическая схема предусматривает построение

транспортной сети с учётом сезонной проходимости, размещения населённых пунктов и учреждений первичной медицинской помощи, а также расчёт показателей потенциальной доступности на основе метода двухшаговой плавающей зоны охвата (2SFCA). Для каждого учреждения кадровая мощность определяется отдельно от характеристик транспортной сети; спрос рассчитывается по численности и при необходимости возрастной структуре потенциальных получателей услуг. Сценарий сокращения 30 % фельдшерско-акушерских пунктов используется для сравнительного моделирования изменения доступности.

Методологическую основу составил адаптированный метод двухшагового зонного анализа с плавающей зоной охвата (2SFCA). Классический метод двухшаговой плавающей зоны охвата (2SFCA) учитывает соотношение предложения медицинских услуг и потенциального спроса населения. На первом этапе для каждого учреждения определяется отношение его доступной мощности к суммарному спросу в пределах установленной зоны обслуживания. На втором этапе для каждой населённой ячейки суммируются соответствующие отношения для учреждений, расположенных в пределах допустимого времени поездки.

Ключевым нововведением стало внедрение в модель коэффициентов сезонного транспортного трения и фактической пропускной способности учреждений. Если классические модели оперируют статичными расстояниями или усредненным временем в пути, разработанная ГИС-модель дифференцировала дорожную сеть по сезонам. Зимние автозимники и летние грунтовые дороги, размываемые в период распутицы, кардинально меняют изохроны доступности. Кроме того, мы отказались от допущения о бесконечной пропускной способности врачей. В модель был введен поправочный коэффициент, учитывающий демографическую нагрузку: учреждение, обслуживающее территорию с высокой долей пожилого населения, требующего частых визитов, фактически обладает меньшей доступностью для остальных

групп, даже если формально число коек или врачей на душу населения соответствует нормативам (таблица 1).

Таблица 1 - Сезонные характеристики транспортной сети в модели доступности медицинских учреждений

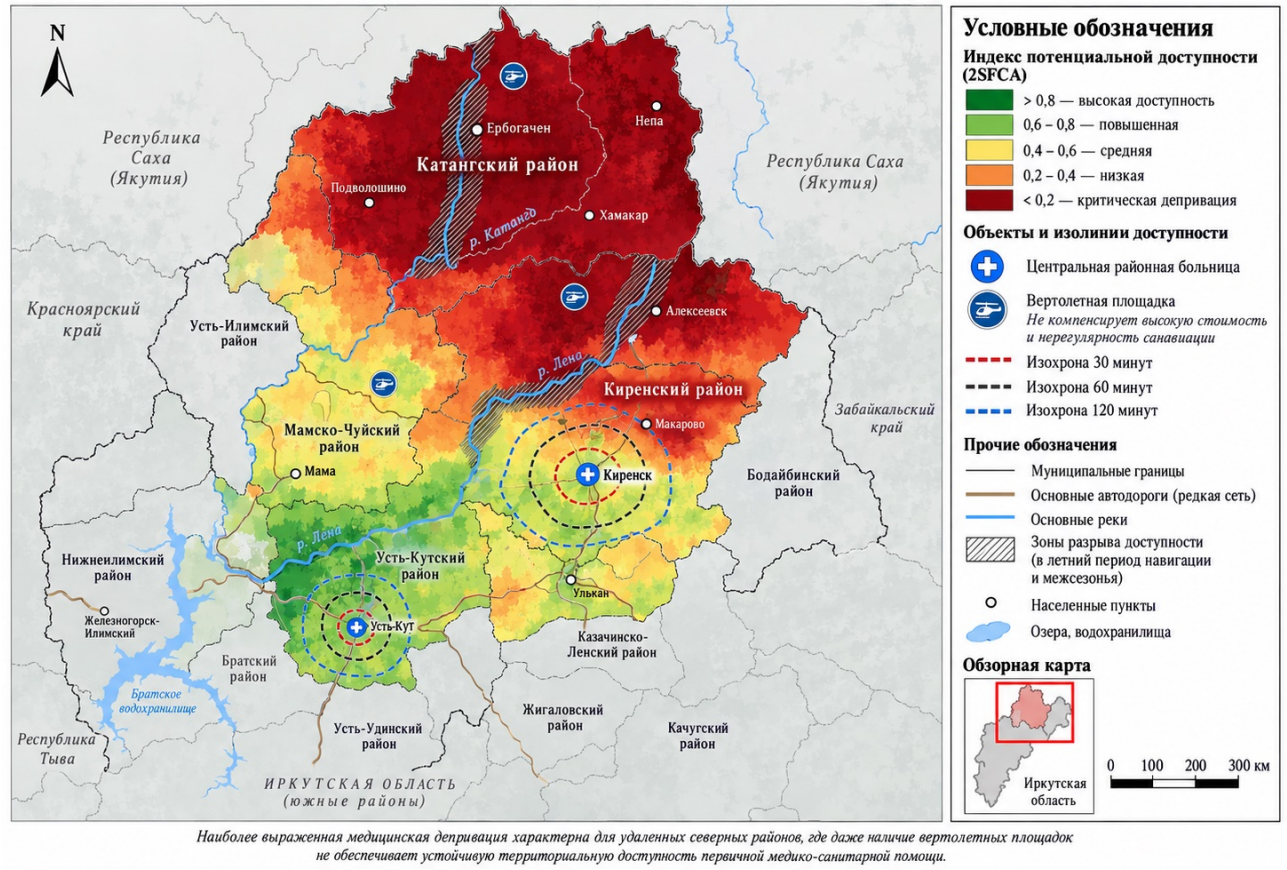
Класс дорожной сети	Тип покрытия / Характеристика	Коэффициент трения (лето)	Коэффициент трения (зима / распутица)
Федеральные и региональные трассы	Асфальт, гравий	1.0	1.1
Муниципальные дороги	Грунт, щебень	1.4	2.5
Зимники и сезонные пути	Укатанный снег, ледовые переправы	Недоступно	1.0 (только при устойчивых морозах)
Внедорожный транспорт / Судоходство	Речные пути, вертолетные площадки	3.2 (судно) / 1.0 (воздух)	4.5 (судно) / 1.2 (воздух)

Источник: разработано авторами.

Представленные данные показывают, что использование линейного расстояния как единственного показателя доступности в периферийных условиях недостаточно. Летом многие населенные пункты оказываются в зоне транспортной изоляции из-за отсутствия мостовых переходов и размыва грунтовых дорог, что увеличивает время доступа к первичной медицинской помощи в 3–4 раза. Зимнее сообщение формально сокращает время в пути, но критически зависит от погодных аномалий. Учет пропускной способности (FTE) позволяет выявить скрытые очереди и фактические ограничения доступности: там, где формально есть фельдшерско-акушерский пункт (ФАП), фактическая доступность может быть нулевой из-за того, что специалист физически не способен обслужить закрепленное население в нормативные сроки.

Результаты исследования и их обсуждение. Построение изохрон доступности и расчет индексов 2SFCA позволили картировать зоны медицинской депривации Иркутской области. Базовый сценарий, отражающий текущую сеть учреждений, выявил парадоксальную ситуацию: формальное наличие ФАПов в большинстве населенных пунктов не гарантирует реальной

пространственной справедливости (рисунок 1).



Наиболее выраженная медицинская депривация характерна для удаленных северных районов, где даже наличие вертолетных площадок не обеспечивает устойчивую территориальную доступность первичной медико-санитарной помощи.

Рисунок 1 - Пространственная вариативность потенциальной доступности первичной медико-санитарной помощи в периферийных районах Иркутской области (по данным 2SFCA-моделирования, летний период) (источник: разработано авторами)

Основным фактором дифференциации доступности медицинской помощи на периферийных территориях выступают транспортные ограничения. Зоны, окрашенные в красные тона, представляют собой анклавы пространственного отчуждения. Жители этих территорий лишены не только специализированной, но и элементарной первичной помощи. При этом демографический анализ выявил тревожную взаимосвязь: именно в зонах критической депривации наблюдается максимальная доля населения старше трудоспособного возраста. Молодежь мигрирует в узлы роста, оставляя на периферии стареющее сообщество с растущими потребностями в медицинском обслуживании, но с катастрофически снижающейся мобильностью.

Следующим этапом исследования стала оценка влияния процессов так

называемой оптимизации сети здравоохранения. В рамках государственных программ по повышению эффективности расходов часто практикуется закрытие или реорганизация маломощных ФАПов с переводом населения на обслуживание в центральные районные больницы или более крупные поселковые амбулатории [19]. Мы смоделировали сценарий ликвидации 30% наиболее удаленных и маломощных ФАПов в исследуемых районах (таблица 2).

Таблица 2 - Динамика индексов пространственной доступности и демографическая уязвимость при сценарии оптимизации сети ФАП

Муниципальное образование	Доля населения в зоне депривации (до оптимизации)	Доля населения в зоне депривации (после закрытия 30% ФАП)	Прирост среднего времени доступа для лиц старше 65 лет (мин.)	Оценка риска утраты пространственной справедливости
Катангский район	42%	68%	+ 145	Критический
Киренский район (северные кусты)	28%	51%	+ 95	Высокий
Мамско-Чуйский район	35%	49%	+ 110	Высокий
Усть-Илимский район (периферия)	15%	24%	+ 40	Умеренный

Источник: разработано авторами.

В рассматриваемом сценарии сокращения сети ФАП расчётная доля населения, отнесённого к зоне недостаточной пространственной доступности, возрастает в Катангском районе с 42 до 68 %. Разница составляет 26 процентных пунктов. Для населения старше 65 лет представлено увеличение среднего времени доступа на 145 минут. Для пожилых людей среднее время достижения медицинской помощи увеличивается почти на два с половиной часа. В условиях периферийных территорий, где своевременность экстренной помощи при острых состояниях имеет особое значение, подобное увеличение времени в пути существенно снижает фактическую доступность медицинской помощи для жителей этих территорий (рисунок 2).

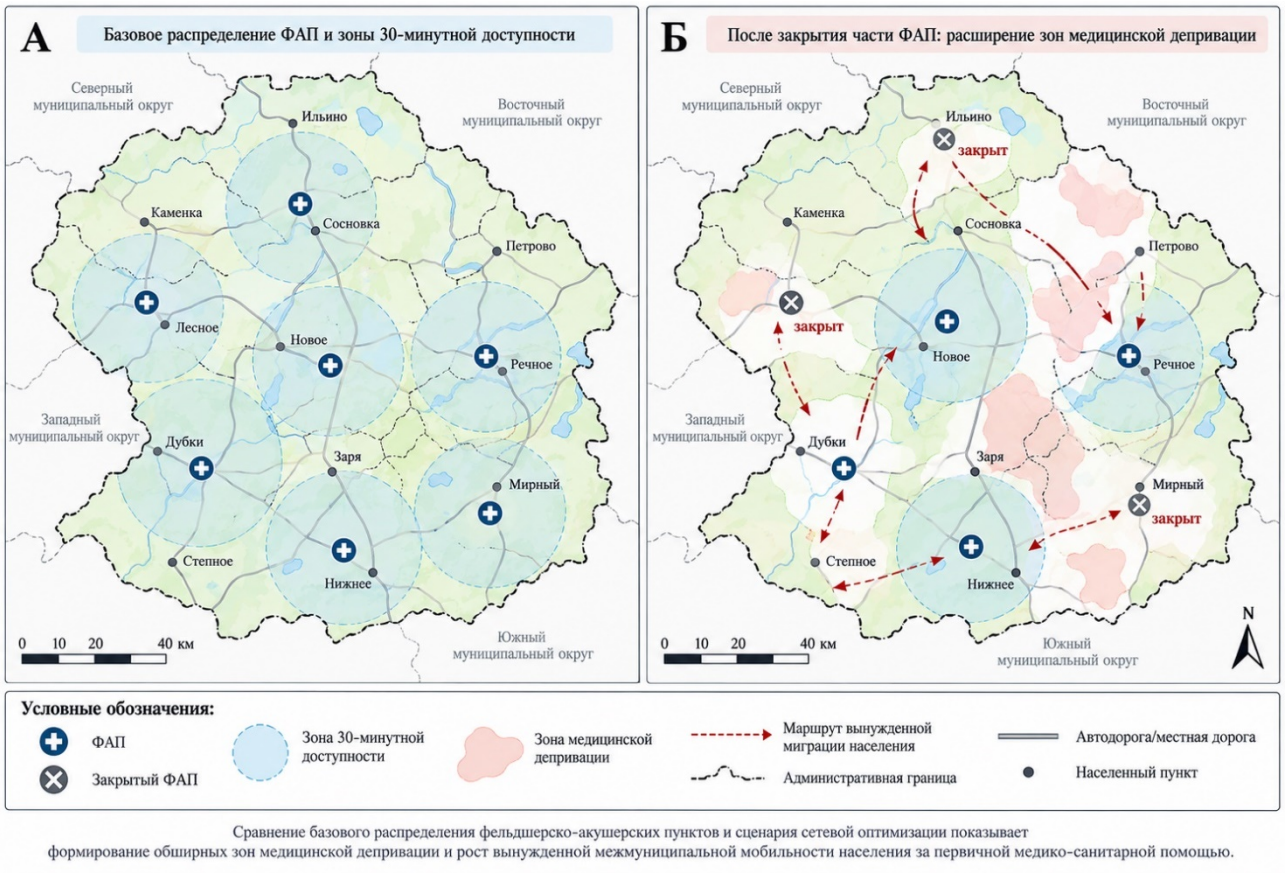


Рисунок 2 - Трансформация зон медицинской депривации при сценарии сетевой оптимизации (закрытие ФАП) (источник: разработано авторами)

Сопоставление карт на рисунке 2 показывает, что оптимизация сети без учета географических условий увеличивает вынужденные поездки населения за медицинской помощью. Население вынуждено преодолевать межмуниципальные границы для получения базовых услуг, что увеличивает нагрузку на транспортную инфраструктуру и центральные районные больницы. Возникает парадокс: закрывая малые учреждения для экономии средств, система здравоохранения сталкивается с ростом затрат на санавиацию, лечение запущенных случаев (из-за позднего обращения) и социальное напряжение.

Пространственная справедливость в контексте периферийных регионов не может быть достигнута лишь за счет финансового выравнивания или формального соблюдения нормативов обеспеченности. Географический анализ доказывает, что транспортное трение и сезонность дорожной сети выступают не просто фоном, а активными факторами, формирующими реальную доступность благ. Применение метода 2SFCA с учетом пропускной способности и сезонных

коэффициентов позволяет при оптимизации здравоохранения учитывать не только финансовые показатели, но и пространственную доступность медицинской помощи. Сохранение сети малых медицинских пунктов в отдаленных поселениях, даже при их низкой формальной эффективности, является необходимым условием поддержания устойчивости периферийной системы расселения [20]. Игнорирование фактора экономического расстояния и реальной мобильности населения ведет к принятию управленческих решений, которые усугубляют региональное неравенство и подрывают основы территориальной целостности страны.

Выводы. Завершая исследование, необходимо переосмыслить саму концепцию пространственной справедливости в сфере охраны здоровья. В условиях высокой инерционности сложившейся системы расселения и центро-периферийной дифференциации требование равномерного распределения стационарных медицинских учреждений утрачивает экономический и демографический смысл. Справедливость в данном контексте следует трактовать не как геометрическое равенство, а как выравнивание шансов на своевременное получение квалифицированной помощи вне зависимости от места жительства. Ключевым критерием здесь выступает не формальное наличие коечного фонда в административных границах, а фактическое время, затрачиваемое пациентом на преодоление пути до ближайшего центра оказания услуг.

Проведенное геоинформационное моделирование наглядно продемонстрировало, что традиционные нормативы обеспеченности, оперирующие усредненными показателями по муниципальным образованиям, маскируют реальную картину территориального неравенства. Применение методов плавающих водосборов позволило выявить скрытые локальные анклавы депривации, где физическая удаленность и сезонная непроходимость транспортных путей создают непреодолимые барьеры для сохранения человеческого капитала. Особенно остро эта проблема проявляется в стареющих

периферийных поселениях, где снижение мобильности населения накладывается на деградацию дорожной сети и отток медицинских кадров в узлы роста.

Попытки нивелировать эти диспропорции исключительно за счет капитального строительства новых объектов в депрессивных локациях сталкиваются с колоссальными финансовыми затратами и низкой последующей загруженностью таких учреждений. В связи с этим критерии пространственной справедливости должны сместиться от оценки статичной инфраструктуры к измерению динамической связности территорий. Приоритетным ориентиром государственной политики становится обеспечение предельно допустимого времени, в течение которого житель отдаленного населенного пункта может получить экстренную или первичную специализированную помощь. Достижение этого показателя требует отказа от устаревших подходов к территориальному планированию в пользу гибких, адаптивных форматов обслуживания.

Наиболее адекватным ответом на вызовы периферийного расселения выступает развитие мобильных и дистанционных форматов медицинского обслуживания. Передвижные фельдшерско-акушерские пункты и специализированные медицинские комплексы на базе автомобильного транспорта позволяют регулярно доставлять базовые диагностические и профилактические услуги непосредственно в места компактного проживания уязвимых групп населения. Подобные решения эффективно компенсируют дефицит стационарных кадров, обеспечивая непрерывность наблюдения за хроническими больными и снижая необходимость их изнурительных поездок в районные центры.

Параллельное внедрение систем телемедицинского консультирования способно радикально сократить экономическое расстояние между пациентом и узким специалистом. Цифровые технологии трансформируют саму природу доступности, переводя ее из пространственной плоскости в институциональную. Однако успех этих инициатив напрямую зависит от качества коммуникационной

инфраструктуры и преодоления ведомственных барьеров, препятствующих интеграции данных. Для территорий, полностью лишенных круглогодичного наземного сообщения, критически важна модернизация санитарной авиации. Оптимизация маршрутов санрейсов с учетом реального спроса и сезонной доступности поселков становится важнейшей геосоциальной задачей, направленной на удержание населения в экстремальных регионах.

Таким образом, географический анализ доступности медицинской помощи подтверждает, что пространственное развитие здравоохранения не может подчиняться исключительно директивным нормативам. Учет реального транспортного трения, демографической структуры и сезонных колебаний связности территорий диктует необходимость перехода к полицентричной и мобильной модели организации отрасли. Только такое адаптивное управление, опирающееся на точные методы сетевого моделирования, способно обеспечить подлинную пространственную справедливость и сохранить жизнеспособность периферийных пространств страны в условиях их объективного сжатия.

Список литературы

1. Hayes K., Coxon K., Bye R. A. Rural and remote health care: the case for spatial justice // Rural and Remote Health. 2025. Vol. 25. Article 8580. DOI: 10.22605/RRH8580.

2. Архипов Ю. Р., Никонорова И. В., Харитонов Ал. Ю., Харитонов Ан. Ю. Анализ доступности первичной медицинской помощи для сельского населения Чувашской Республики // Региональные геосистемы. 2024. Т. 48. № 4. С. 481–493. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-481-493.

3. Stacherl B., Sauzet O. Gravity models for potential spatial healthcare access measurement: a systematic methodological review // International Journal of Health Geographics. 2023. Vol. 22. Article 34. DOI: 10.1186/s12942-023-00358-z.

4. Калашников К. Н. Доступность медицинской помощи в государственном и частном секторах здравоохранения (по результатам социологического опроса населения Вологодской области) // Здравоохранение Российской Федерации.

2023. Т. 67. № 3. С. 203–210. DOI: 10.47470/0044-197X-2023-67-3-203-210.

5. Liu L., Chen Y., Xiang H., Zhong J., Zhou P., Xiao Y., Wang L., Sun Y. Measuring and optimizing the spatial accessibility of primary health care in remote and rural areas: a case study of Liannan Yao Autonomous County in China // BMC Health Services Research. 2024. Vol. 24. Article 1100. DOI: 10.1186/s12913-024-11556-1.

6. Аликова З. Р., Тотикова И. Т., Джиоева И. А. Территориальные особенности оказания экстренной хирургической помощи сельскому населению (на примере Республики Северная Осетия — Алания) // Менеджер здравоохранения. 2024. № 3. С. 47–53. DOI: 10.21045/1811-0185-2024-2-47-53.

7. Martínez Sánchez-Mateos H., Ruiz Pulpón Á. R. The challenge of access to healthcare services as a condition for territorial equity. A methodological approach for sparsely populated rural areas // Health Policy. 2025. Vol. 156. Article 105310. DOI: 10.1016/j.healthpol.2025.105310.

8. Харитонов А. Ю., Никонорова И. В., Харитонов А. Ю. Динамика доступности первичной медицинской помощи сельскому населению Чувашской Республики // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2025. № 3. С. 76–83. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2025/3/76-83.

9. Väisänen V., Satokangas M., Huhtakangas M., Antikainen H., Sinervo T. Medical deserts in Finland: measuring the accessibility and availability of primary health care services // BMC Health Services Research. 2025. Vol. 25. Article 281. DOI: 10.1186/s12913-025-12409-1.

10. Бегичева А. К., Бегичева С. В. Модифицированная гравитационная модель оценки доступности медицинских услуг: задача, алгоритм и реализация // Прикладная информатика. 2025. Т. 20. № 5 (119). С. 4–21. DOI: 10.37791/2687-0649-2025-20-5-4-21.

11. Leosari Y., Uelmen J. A., Carney R. M. Spatial evaluation of healthcare accessibility across archipelagic communities of Maluku Province, Indonesia // PLOS Global Public Health. 2023. Vol. 3. No. 3. e0001600. DOI: 10.1371/journal.pgph.0001600.

12. Моисеева К. Е., Белохов Н. В., Симченко Н. А., Резник В. А., Симченко А. Е. Оценка доступности медицинской помощи жителям сельской местности // Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. 2025. Т. 33. № 3. С. 391–400. DOI: 10.32687/0869-866X-2025-33-3-391-400.

13. Ab Hamid J., Juni M. H., Abdul Manaf R., Syed Ismail S. N., Lim P. Y. Spatial Accessibility of Primary Care in the Dual Public–Private Health System in Rural Areas, Malaysia // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2023. Vol. 20. No. 4. Article 3147. DOI: 10.3390/ijerph20043147.

14. Рубцова В. Кадровый дефицит в сельском здравоохранении России: исследовательские подходы, эмпирические результаты и аналитические ограничения // Журнал исследований социальной политики. 2026. Т. 24. № 1. С. 177–194. DOI: 10.17323/727-0634-2026-24-1-177-194.

15. Leyso N. L., Umezaki M. Spatial inequality in the accessibility of healthcare services in the Philippines // GeoJournal. 2024. Vol. 89. Article 120. DOI: 10.1007/s10708-024-11098-3.

16. Потапчик Е. Г. Доступность медицинской помощи в Российской Федерации: изменения в ее уровне с точки зрения различных институтов // Профилактическая медицина. 2025. Т. 28. № 4. С. 16–22. DOI: 10.17116/profmed20252804116.

17. Ni J., Wang Z., Li H., Chen J., Long Q. Spatial accessibility and equity of community healthcare: unraveling the impact of varying time and transport mode // Frontiers in Public Health. 2024. Vol. 12. Article 1380884. DOI: 10.3389/fpubh.2024.1380884.

18. Хабриев Р. У., Бакирова Е. А., Мингазова Е. Н. Доступность медицинской помощи сельскому населению как глобальная медико-социальная проблема // Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. 2026. Т. 34. Спецвыпуск 1. С. 513–519. DOI: 10.32687/0869-866X-2026-34-s1-513-519.

19. Luo R., Carroll P. The uneven geographies of care: Transport disadvantage and healthcare accessibility in Melbourne // Journal of Transport & Health. 2026. Vol. 49.

Article 102334. DOI: 10.1016/j.jth.2026.102334.

20. Balsa-Barreiro J., Batista S. F. A., Hannoun G. J., Menendez M. Travel-time accessibility and adaptive spatial planning solutions for the healthcare system // npj Health Systems. 2025. Vol. 2. Article 24. DOI: 10.1038/s44401-025-00028-1.

References

1. Hayes K., Coxon K., Bye R. A. Rural and remote health care: the case for spatial justice // Rural and Remote Health. 2025. Vol. 25. Article 8580. DOI: 10.22605/RRH8580.

2. Arkhipov Yu. R., Nikonorova I. V., Kharitonov Al. Yu., Kharitonov An. Yu. Analiz dostupnosti pervichnoi meditsinskoi pomoshchi dlya sel'skogo naseleniya Chuvashskoi Respubliki // Regional'nye geosistemy. 2024. T. 48. № 4. S. 481–493. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-481-493.

3. Stacherl B., Sauzet O. Gravity models for potential spatial healthcare access measurement: a systematic methodological review // International Journal of Health Geographics. 2023. Vol. 22. Article 34. DOI: 10.1186/s12942-023-00358-z.

4. Kalashnikov K. N. Dostupnost' meditsinskoi pomoshchi v gosudarstvennom i chastnom sektorakh zdravookhraneniya (po rezul'tatam sotsiologicheskogo oprosa naseleniya Vologodskoi oblasti) // Zdravookhranenie Rossiiskoi Federatsii. 2023. T. 67. № 3. S. 203–210. DOI: 10.47470/0044-197X-2023-67-3-203-210.

5. Liu L., Chen Y., Xiang H., Zhong J., Zhou P., Xiao Y., Wang L., Sun Y. Measuring and optimizing the spatial accessibility of primary health care in remote and rural areas: a case study of Liannan Yao Autonomous County in China // BMC Health Services Research. 2024. Vol. 24. Article 1100. DOI: 10.1186/s12913-024-11556-1.

6. Alikova Z. R., Totikova I. T., Dzhioeva I. A. Territorial'nye osobennosti okazaniya ekstrennoi khirurgicheskoi pomoshchi sel'skomu naseleniyu (na primere Respubliki Severnaya Osetiya — Alaniya) // Menedzher zdravookhraneniya. 2024. № 3. S. 47–53. DOI: 10.21045/1811-0185-2024-2-47-53.

7. Martínez Sánchez-Mateos H., Ruiz Pulpón Á. R. The challenge of access to healthcare services as a condition for territorial equity. A methodological approach for

sparsely populated rural areas // Health Policy. 2025. Vol. 156. Article 105310. DOI: 10.1016/j.healthpol.2025.105310.

8. Kharitonov A. Yu., Nikonorova I. V., Kharitonov A. Yu. Dinamika dostupnosti pervichnoi meditsinskoi pomoshchi sel'skomu naseleniyu Chuvashskoi Respubliki // Vestnik VGU. Seriya: Geografiya. Geoekologiya. 2025. № 3. S. 76–83. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2025/3/76-83.

9. Väisänen V., Satokangas M., Huhtakangas M., Antikainen H., Sinervo T. Medical deserts in Finland: measuring the accessibility and availability of primary health care services // BMC Health Services Research. 2025. Vol. 25. Article 281. DOI: 10.1186/s12913-025-12409-1.

10. Begicheva A. K., Begicheva S. V. Modifitsirovannaya gravitatsionnaya model' otsenki dostupnosti meditsinskikh uslug: zadacha, algoritm i realizatsiya // Prikladnaya informatika. 2025. T. 20. № 5 (119). S. 4–21. DOI: 10.37791/2687-0649-2025-20-5-4-21.

11. Leosari Y., Uelmen J. A., Carney R. M. Spatial evaluation of healthcare accessibility across archipelagic communities of Maluku Province, Indonesia // PLOS Global Public Health. 2023. Vol. 3. No. 3. e0001600. DOI: 10.1371/journal.pgph.0001600.

12. Moiseeva K. E., Belokhov N. V., Simchenko N. A., Reznik V. A., Simchenko A. E. Otsenka dostupnosti meditsinskoi pomoshchi zhitelyam sel'skoi mestnosti // Problemy sotsial'noi gigieny, zdravookhraneniya i istorii meditsiny. 2025. T. 33. № 3. S. 391–400. DOI: 10.32687/0869-866X-2025-33-3-391-400.

13. Ab Hamid J., Juni M. H., Abdul Manaf R., Syed Ismail S. N., Lim P. Y. Spatial Accessibility of Primary Care in the Dual Public–Private Health System in Rural Areas, Malaysia // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2023. Vol. 20. No. 4. Article 3147. DOI: 10.3390/ijerph20043147.

14. Rubtsova V. Kadrovyi defitsit v sel'skom zdravookhranenii Rossii: issledovatel'skie podkhody, empiricheskie rezul'taty i analiticheskie ogranicheniya // Zhurnal issledovanii sotsial'noi politiki. 2026. T. 24. № 1. S. 177–194. DOI:

10.17323/727-0634-2026-24-1-177-194.

15. Leyso N. L., Umezaki M. Spatial inequality in the accessibility of healthcare services in the Philippines // GeoJournal. 2024. Vol. 89. Article 120. DOI: 10.1007/s10708-024-11098-3.

16. Potapchik E. G. Dostupnost' meditsinskoi pomoshchi v Rossiiskoi Federatsii: izmeneniya v ee urovne s tochki zreniya razlichnykh institutov // Profilakticheskaya meditsina. 2025. T. 28. № 4. S. 16–22. DOI: 10.17116/profmed20252804116.

17. Ni J., Wang Z., Li H., Chen J., Long Q. Spatial accessibility and equity of community healthcare: unraveling the impact of varying time and transport mode // Frontiers in Public Health. 2024. Vol. 12. Article 1380884. DOI: 10.3389/fpubh.2024.1380884.

18. Khabriev R. U., Bakirova E. A., Mingazova E. N. Dostupnost' meditsinskoi pomoshchi sel'skomu naseleniyu kak global'naya mediko-sotsial'naya problema // Problemy sotsial'noi gigieny, zdravookhraneniya i istorii meditsiny. 2026. T. 34. Spetsvypusk 1. S. 513–519. DOI: 10.32687/0869-866X-2026-34-s1-513-519.

19. Luo R., Carroll P. The uneven geographies of care: Transport disadvantage and healthcare accessibility in Melbourne // Journal of Transport & Health. 2026. Vol. 49. Article 102334. DOI: 10.1016/j.jth.2026.102334.

20. Balsa-Barreiro J., Batista S. F. A., Hannoun G. J., Menendez M. Travel-time accessibility and adaptive spatial planning solutions for the healthcare system // npj Health Systems. 2025. Vol. 2. Article 24. DOI: 10.1038/s44401-025-00028-1.

Статья поступила в редакцию 04.06.2026; одобрена после рецензирования 17.08.2026; принята к публикации 12.10.2026.

The article was submitted 04.06.2026; approved after peer review 17.08.2026; accepted for publication 12.10.2026.

1.6.21. Геоэкология

Научная статья

УДК 528.88:630.43

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОСТПИРОГЕННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ СОСНОВЫХ ЛЕСОВ ТУНКИНСКОЙ КОТЛОВИНЫ ПО ОПУБЛИКОВАННЫМ СПУТНИКОВЫМ И ПОЛЕВЫМ ДАННЫМ

Прядилина Александра Владимировна, кандидат географических наук, ведущий инженер, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, Москва, priadilina.aleksandra@mail.ru;

Головань Екатерина Владимировна, кандидат географических наук, Российский государственный гидрометеорологический университет, Россия, Санкт-Петербург, perm.iuliia@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается методика геоэкологической диагностики постпирогенного восстановления сосновых лесов Тункинской котловины по опубликованным спутниковым и полевым данным. Цель работы заключается в разграничении восстановления спектральных характеристик растительности и возобновления структурно-функциональных свойств лесной геосистемы. Методологическую основу составляют сравнительный анализ исследований, использование нормализованного индекса выгорания NBR, разностного показателя dNBR и сведений о состоянии древостоя и почвенного покрова. Предложена типология восстановительных траекторий, учитывающая начальную тяжесть пожара, динамику спектральных характеристик, особенности подроста и повторные нарушения. Для временной диагностики рассматриваются показатели T80 и T90 с правилом подтверждения устойчивого достижения порога в двух последовательных сопоставимых сезонах. Показано, что спектральное приближение поверхности к предпожарному состоянию не является достаточным доказательством восстановления исходного породного состава и структуры леса. Сделан вывод о необходимости согласованного

использования дистанционных и полевых характеристик в системе мониторинга послепожарных изменений.

Ключевые слова: постпирогенное восстановление; сосновые леса; Тункинская котловина; Landsat; индекс NBR; геоэкологическая диагностика.

Original article

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF POST-FIRE PINE FOREST RECOVERY IN THE TUNKA DEPRESSION USING PUBLISHED SATELLITE AND FIELD DATA

Priadilina Aleksandra Vladimirovna, Candidate of Geographical Sciences, Leading Engineer, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, priadilina.aleksandra@mail.ru;

Golovan Ekaterina Vladimirovna, Candidate of Geographical Sciences, Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia, perm.iuliia@yandex.ru

Abstract. This article examines a methodology for geoecological diagnostics of post-fire restoration of pine forests in the Tunka Basin using published satellite and field data. The objective of the study is to distinguish between the restoration of the spectral characteristics of vegetation and the renewal of the structural and functional properties of the forest geosystem. The methodological basis consists of a comparative analysis of studies, the use of the normalized burn index (NBR), the difference indicator dNBR, and information on the state of the forest stand and soil cover. A typology of restoration trajectories is proposed, taking into account the initial severity of the fire, the dynamics of spectral characteristics, the characteristics of the undergrowth, and repeated disturbances. For temporal diagnostics, the T80 and T90 indicators are considered, with the rule of confirming the stable achievement of the threshold in two consecutive comparable seasons. It is shown that the spectral approximation of the surface to the pre-fire state is not sufficient evidence of the restoration of the original species composition and structure of the forest. A conclusion

is drawn regarding the need for a coordinated use of remote sensing and field characteristics in the system for monitoring post-fire changes.

Keywords: post-fire recovery; pine forests; Tunka Depression; Landsat; normalized burn ratio; geoecological assessment.

Актуальность и степень разработанности проблемы исследования. Лесной пожар в бореальном ландшафте представляет собой не только событие, при котором повреждается или уничтожается древостой. Его последствия распространяются на систему связей между растительностью, почвой, водно-тепловым режимом и приземным слоем атмосферы. После прохождения огня меняются альбедо поверхности, испарение и прогрев почвы, нарушается подстилка, высвобождаются элементы питания, перестраиваются конкурентные отношения между древесными и травяно-кустарничковыми видами. По этой причине геоэкологическая оценка гари не может ограничиваться ответом на вопрос, появилась ли на ней растительность через несколько лет. Гораздо существеннее установить, в каком направлении изменяется природный комплекс и приближается ли его современное состояние к тому, которое существовало до нарушения.

Актуальность такой постановки усилилась на фоне изменения пожарных режимов в лесах высоких и умеренных широт. Анализ глобальных пиромов показал заметный рост лесных пожарных эмиссий во внетропических районах в XXI в., причем наблюдаемая динамика связана с усилением благоприятных для горения погодных условий на фоне климатических изменений [15]. Для сибирских лесов проблема имеет собственную региональную специфику. По данным Е. Г. Швецова, в 2002–2022 гг. увеличивались как общая площадь пожаров, так и площадь участков, где огонь сопровождался последующей гибелью древостоя. Пожары с гибелью леса отличались статистически более высокой суммарной мощностью теплоизлучения, что подтверждает необходимость учитывать характеристики самого нарушения, а не

рассматривать все гари как исходно одинаковые объекты [5].

Наряду с ростом пирогенной нагрузки меняется и понимание того, что именно следует называть восстановлением. В дистанционном зондировании этот термин продолжительное время нередко связывался с возвратом одного из спектральных индексов к прежнему диапазону. Такая трактовка удобна для картографирования больших и труднодоступных территорий, однако экологический смысл полученного результата остается ограниченным. Как отмечает J. C. White, определение forest recovery должно быть измеримым и соответствовать конкретной исследовательской задаче; одинаковое слово может обозначать восстановление отражательной способности поверхности, сомкнутости древесного яруса, запаса древесины, высоты насаждения либо видового состава [2].

Современные эмпирические работы подтверждают принципиальность этого разграничения. После крупного пожара в сибирских бореальных лесах спектральные характеристики способны возвращаться к предпожарному диапазону быстрее, чем породная структура. S. G. Bao с соавторами установили, что после Black Dragon Megafire спектральное восстановление опережало композиционное, причем доля широколиственных компонентов возрастала быстрее, чем доля хвойных; возвращение спектрального состояния к базовому уровню занимало приблизительно 15–16 лет [4]. Следовательно, пиксель, который по Landsat снова выглядит как покрытый развитой растительностью, необязательно соответствует восстановившемуся хвойному лесу.

Та же методологическая проблема особенно отчетливо прослеживается в Тункинской котловине. Ж. В. Атутова и Е. А. Распутина объединили материалы Landsat 7 за 2009–2022 гг. с полевыми наблюдениями на постоянных площадях, проводившимися в 2014–2022 гг. после пожара 2010 г. в районе Бадары. Для точек наблюдений было получено около пятисот пригодных к анализу безоблачных значений NBR. К 2021 г. спектральный показатель на одном из нарушенных участков приблизился к предпожарным значениям, однако полевые

описания не позволяли говорить о возвращении фитоценоза к близкому к исходному состоянию [1]. Это расхождение имеет не частный, а общеметодический характер: дистанционный сигнал фиксирует свойства поверхности, тогда как лесная геосистема восстанавливается одновременно на нескольких уровнях и с неодинаковой скоростью.

Выбор Тункинской котловины в качестве регионального полигона определяется не только наличием совмещенных спутниковых и полевых наблюдений. Ландшафтная структура территории формирует выраженную неоднородность пожарной опасности. А. А. Черкашина и А. В. Силаев установили, что наиболее высокой повторяемостью пожаров отличаются боровые сосновые леса, связанные с песчаными массивами центральной части котловины и отдельными южными склонами [3]. Тем самым здесь складывается ситуация, когда постпирогенная сукцессия протекает не после изолированного единичного события, а в ландшафте с сохраняющейся вероятностью нового нарушения.

Повторный огонь меняет саму исследовательскую логику. Если следующий пожар происходит до достижения древостоем зрелого восстановительного состояния, наблюдаемый ряд уже нельзя описывать простой монотонной кривой возвращения к исходному уровню. Формируется последовательность нарушений, между которыми растительность успевает пройти лишь часть сукцессионного пути. Возникает вероятность закрепления менее сомкнутых, травяно-кустарничковых или мелколиственных сообществ, а семенное возобновление исходной хвойной породы становится зависимым от расстояния до сохранившихся участков и пространственной конфигурации гари.

Именно пространственная конфигурация в последние годы рассматривается как один из самостоятельных факторов восстановления. T. Liu с соавторами, анализируя последствия сибирского пожара 2003 г. на уровне отдельных гарей, установили, что к 2023 г. восстановились 72,7 % исследованных пятен, а среднее время восстановления составило 12,2 года. В

крупных и вытянутых гарях процесс занимал больше времени, чем в небольших компактных участках, а внутри одной гари отчетливо проявлялся градиент от кромки к центру [10]. Такой результат хорошо согласуется с экологическим механизмом поступления семян от сохранившегося леса и показывает, почему пиксельный анализ без учета геометрии нарушенного массива способен сглаживать содержательно важные различия.

Еще одна сторона проблемы связана с климатом восстановительного периода. Пожар задает первоначальное повреждение, но дальнейшая судьба леса зависит от водообеспеченности, температурных экстремумов и условий конкретных лет. Глобальное исследование Q. Lv с соавторами показало, что менее трети лесов после крупных пожаров достигали предпожарного уровня по использованным показателям в пределах семи лет; увеличение тяжести пожара сопровождалось удлинением восстановительного периода, особенно в бореальных лесах, а почвенная влага проявила себя как важнейший фактор, способствующий восстановлению [8]. В работе S. Smith-Tripp с соавторами уже на уровне структуры древостоя установлена связь замедленного восстановления хвойных с аномально холодными и сухими летними сезонами после пожара [14].

При этом отдельные функции экосистемы способны возвращаться существенно быстрее древесного яруса. Глобальная оценка постпожарной продуктивности показала, что примерно 87 % нарушенной растительности возвращалось к предпожарному уровню валовой первичной продукции в течение двух лет, хотя вечнозеленые хвойные леса относились к группам с наиболее продолжительным восстановительным временем [16]. Сопоставление этого результата с данными по структуре и породному составу еще раз показывает, что восстановление следует оценивать раздельно по нескольким группам диагностических показателей. Быстрое возвращение продуктивности может обеспечиваться травами, кустарниками или лиственными породами и потому не доказывает восстановления прежнего древостоя.

Таким образом, научная проблема состоит не в недостатке дистанционных

индексов как таковых, а в несоответствии между многокомпонентной природой постпирогенной сукцессии и упрощенной интерпретацией спутникового сигнала. Геоэкологический подход требует рассматривать гарь как пространственно организованный природный комплекс, состояние которого определяется наследием пожара, характеристиками исходного ландшафта, последующей погодой и историей повторных нарушений.

Цель настоящего исследования состоит в разработке и обосновании схемы пространственно-временной диагностики постпирогенного восстановления сосновых лесов Тункинской котловины, позволяющей разграничить возвращение спектральных характеристик поверхности к исходному уровню и структурное и ценотическое восстановление лесной геосистемы. Объектом исследования выступают пирогенно нарушенные сосновые леса Тункинской котловины, прежде всего район Бадары Тункинского национального парка. Предмет исследования составляют пространственно-временные изменения спектральных, фитоценотических и ландшафтных характеристик после пожара и их пригодность для выделения разных траекторий сукцессии.

Гипотеза заключается в том, что возвращение NBR к предпожарному диапазону является необходимым, но недостаточным условием экологического восстановления леса. При высокой тяжести исходного повреждения, повторных пожарах либо неблагоприятных условиях возобновления спектральные показатели могут заметно улучшаться за счет травяно-кустарничковой и мелколиственной растительности, тогда как структура и породный состав по-прежнему существенно отличаются от фоновых сосновых сообществ. Научная новизна предлагаемого подхода связана с совместной классификацией спектральной динамики и изменений, фиксируемых наземными наблюдениями, а также с трактовкой их расхождения как самостоятельного признака изменившегося направления сукцессии.

Методология исследования. Работа выполнена в формате сравнительно-аналитического исследования, направленного на разработку методической

схемы геоэкологической диагностики постпирогенного восстановления сосновых лесов Тункинской котловины. Информационной основой выступают опубликованные результаты дистанционных наблюдений Landsat и полевых исследований состояния лесных сообществ. Для характеристики первоначальной тяжести нарушения используется разностный нормализованный индекс выгорания dNBR, а для анализа последующего восстановления — изменение NBR относительно предпожарного состояния. Дополнительно учитываются сведения о видовом составе древостоя, наличии подроста, состоянии почвенного покрова и повторных пожарах.

Нормализованный индекс выгорания рассчитывается по отражению в ближнем и коротковолновом инфракрасном диапазонах:

$$NBR = \frac{NIR - SWIR_2}{NIR + SWIR_2} \quad (1)$$

где NIR — отражение в ближнем инфракрасном диапазоне, $SWIR_2$ — отражение в коротковолновом инфракрасном диапазоне. Для оценки первоначального изменения применяется разностный показатель:

$$dNBR = NBR_{pre} - NBR_{post} \quad (2)$$

Высокое положительное значение dNBR соответствует более выраженному падению спектрального отклика растительности после прохождения огня. В исследовании Ж. В. Атутовой и Е. А. Распутиной для сосновых лесов Тункинской котловины значения dNBR выше 0,500 характеризовали участки сильного пирогенного преобразования, тогда как интервал приблизительно 0,400–0,500 соответствовал более умеренному повреждению [1].

Важно характеризовать предпожарное состояние с помощью устойчивого исходного уровня. При наличии архива целесообразно формировать ее по нескольким годам, отбирая наблюдения в одинаковой фазе вегетационного сезона. Тогда аномально влажный либо засушливый год не превращается в искусственный эталон. Для пожара 2010 г. региональные материалы позволяют как минимум отделить допожарные наблюдения 2009 г. от последующего ряда и

сопоставить спутниковую динамику с долгосрочной полевой информацией [1]. В более протяженных сериях Landsat многолетняя базовая линия должна рассматриваться как предпочтительный вариант.

Для описания степени спектрального возвращения предлагается относительный показатель:

$$R_{nbr}(t) = \frac{NBR(t) - NBR_{post}}{NBR_{pre} - NBR_{post}} \quad (3)$$

где NBR_{post} фиксирует состояние непосредственно после пожара, NBRpre соответствует предпожарному уровню, а NBR(t) отражает состояние в анализируемом году. Значение, близкое к 1, означает спектральное приближение к исходному уровню. Показатель не используется как самостоятельное доказательство лесовосстановления. Его назначение состоит в том, чтобы сделать временную траекторию сопоставимой между участками, различающимися по исходному NBR.

Для оценки продолжительности спектрального восстановления предлагается использовать показатели T80 и T90, определяемые как число лет от момента пожара до достижения соответственно 80 и 90 % исходного нормированного спектрального уровня. Чтобы исключить случайную классификацию по единственному благоприятному сезону, устойчивым достижением порога в предлагаемой методике считается выполнение условия не менее чем в двух последовательных сопоставимых вегетационных сезонах. Принципиально учитывать устойчивость достижения порога: его кратковременное достижение в один благоприятный сезон не должно автоматически означать окончание восстановительного периода. При наличии плотного временного ряда достижение критерия следует подтверждать последующими наблюдениями и проверять относительно фонового участка.

Фоновая территория подбирается не только по расстоянию от гари. Она должна относиться к сопоставимому типу местоположения, иметь близкую экспозицию и высотное положение, аналогичные почвенно-литологические свойства и исходный тип древостоя. Такой контроль позволяет частично

исключить межгодовое влияние погоды. Если NBR одновременно снижается как на гари, так и на неповрежденном аналоге, причиной может быть засуха или иной региональный фактор.

Отдельно учитывается фенологический эффект. В Тункинской котловине при переходе от весны к максимуму вегетации травяной покров существенно изменяет спектральный отклик. Опубликованное исследование показало, что для обнаружения свежей гари информативны снимки середины вегетационного периода, тогда как при оценке древесного возобновления весенний dNBR меньше зависит от развитого травостоя [1]. Следовательно, смешение майского снимка одного года с июльским снимком другого года способно породить ложную динамику, сравнимую по величине с собственно восстановительным сигналом.

С учетом этих положений информационная база организуется следующим образом.

Таблица 1 – Система исходных данных для геоэкологической оценки постпирогенных траекторий

Блок данных	Пространственно-временная характеристика	Аналитическая функция	Методическое ограничение
Landsat 7/8/9	30 м; многолетние сезонно согласованные наблюдения	NBR, dNBR, временные траектории, предпожарная линия	облачность, дым, тени, различия сенсоров, смешанный состав пикселя
Sentinel-2	10–20 м; детализирующие наблюдения последних лет	уточнение пространственной неоднородности и границ молодых восстановительных участков	недостаточная продолжительность архива для 20–30-летнего анализа
Полевые постоянные площади	повторные описания одного местоположения	породный состав, сомкнутость, высота и густота подроста, напочвенный покров	ограниченный территориальный охват
dNBR / контур пожара	состояние до и непосредственно после события	первоначальная стратификация гари по тяжести	порог требует локальной калибровки
Ненарушенные референсные участки	тот же ландшафтный тип	контроль погодной и фенологической изменчивости	ошибочный подбор контроля искажает оценку

ЦМР и производные рельефа	высота, уклон, экспозиция, при необходимости TWI	объяснение пространственных различий восстановления	рельеф не заменяет сведения о почвах
Ландшафтные и почвенные материалы	тип геосистемы, субстрат, почва	учет эдафической обусловленности сукцессии	необходима согласованность масштаба
История повторных пожаров	дата, контур, межпожарный интервал	выявление сброса либо изменения траектории	неполнота ранних данных о малых пожарах

Источник: разработано авторами на основе [1–3, 10].

Для основной территории особое значение имеют наземные наблюдения. Полевые площадки позволяют увидеть именно те процессы, которые спутниковый индекс объединяет в единый сигнал. В них фиксируются сохранность и отпад материнского древостоя, появление подроста, соотношение хвойных и лиственных пород, высота молодых деревьев, сомкнутость ярусов и изменение травяно-кустарничкового покрытия. В работах по бореальным лесам сочетание Landsat и наземных либо лидарных структурных данных показывает, что спектральная динамика действительно связана с восстановлением структуры, но связь не является взаимно однозначной [2, 12].

Почвенные свойства рассматриваются как самостоятельный блок, а не выводятся из формы рельефа. Цифровая модель высот дает сведения о перераспределении тепла и влаги по склону, однако гранулометрический состав, мощность органогенного горизонта, водоудерживающая способность и глубина сезонного промерзания из нее непосредственно не следуют. Для Тункинской котловины это особенно важно из-за сочетания песчаных массивов, склоновых комплексов и котловинных поверхностей, по-разному реагирующих на иссушение и огонь [3].

Временной ряд перед анализом должен проходить единообразную фильтрацию. Исключаются облака, облачные тени, снег и изображения, в которых дым перекрывает исследуемую поверхность. Если используются разные поколения Landsat, значения приводятся к сопоставимому уровню отражения и проверяются на наличие систематического сдвига. Данные Sentinel-2 нельзя автоматически считать продолжением ряда Landsat: более высокое

пространственное разрешение полезно для детализации последнего этапа сукцессии, но не заменяет многодесятилетний архив при расчете времени восстановления.

Предлагаемый метод не сводит результат к единому интегральному коэффициенту. Такой коэффициент был бы удобен для ранжирования, но скрывал бы наиболее содержательную ситуацию — расхождение между восстановлением спектрального отклика и состоянием древесного яруса. Вместо этого используются три группы диагностических показателей: спектральные, структурные и ценотические. Отдельно учитываются положение участка в ландшафте и история повторных нарушений.

Схематически возможные варианты представлены на рисунке 1.

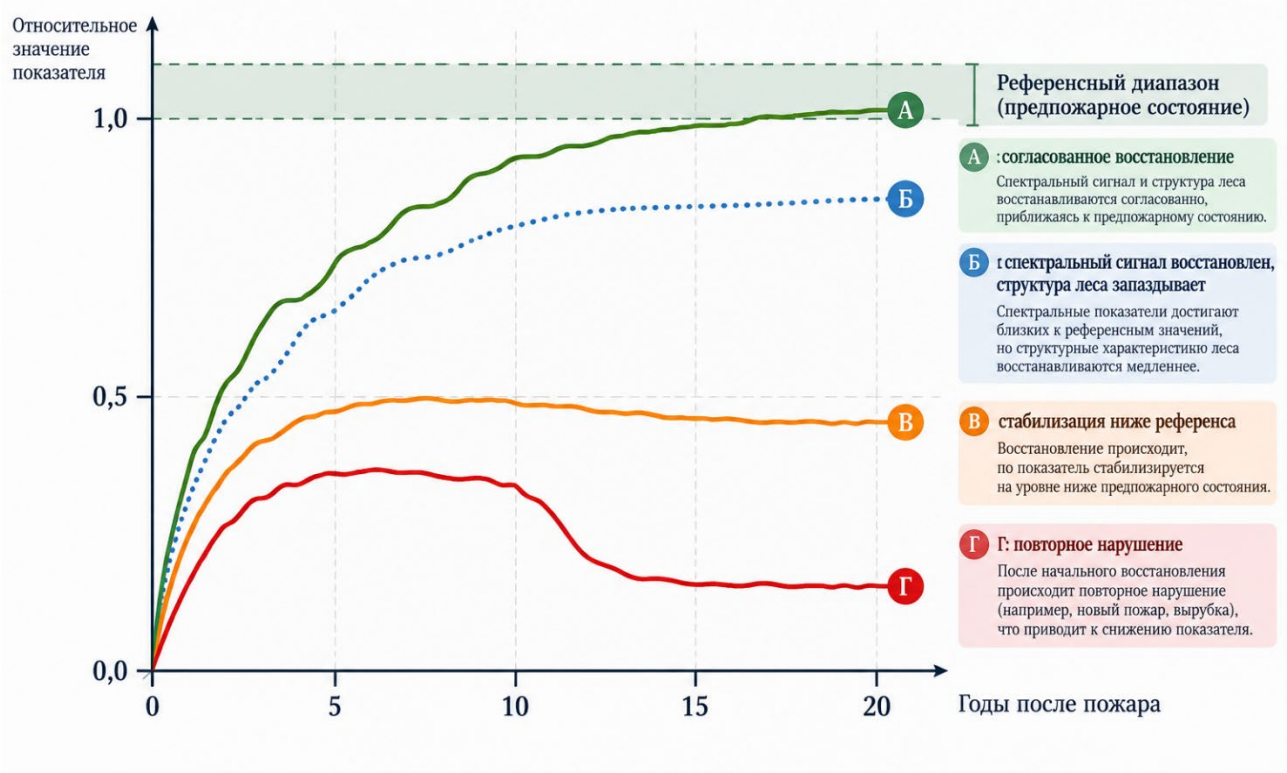


Рисунок 1 – Принципиальные типы временных траекторий после пожара (источник: разработано авторами)

В статистической части для каждой страты тяжести целесообразно определять медианное время достижения заданного спектрального состояния, а не ограничиваться средним значением. Медиана менее чувствительна к участкам, на которых восстановление чрезвычайно затянулось либо новый

пожар прервал временной ряд. Пространственную зависимость времени восстановления следует анализировать в связи с тяжестью повреждения, расстоянием до неповрежденного леса, размером и компактностью гари, экспозицией, увлажнением и типом почвенного субстрата. При наличии достаточного массива данных возможны модели выживания, где «событием» считается достижение установленного критерия восстановления, а не восстановившиеся к концу периода участки рассматриваются как цензурированные наблюдения.

Наконец, дистанционная классификация должна сопровождаться оценкой точности. Для категориальной карты используются независимые контрольные участки и матрица ошибок; для непрерывных показателей оценивается согласование с полевыми характеристиками.

Результаты исследования. Сопоставление материалов по Тункинской котловине с современными исследованиями бореальных лесов позволяет выделить несколько устойчивых закономерностей. Первая из них связана с различием между тяжестью первоначального повреждения и скоростью последующего восстановления. Высокий dNBR характеризует резкое изменение состояния непосредственно после пожара, однако сам по себе не позволяет однозначно определить срок восстановления. Два участка с близким исходным повреждением способны в дальнейшем расходиться вследствие разницы в сохранности материнских деревьев, семенного притока, влажности субстрата и погодных условий нескольких первых лет.

Для района Бадары опубликованные данные хорошо иллюстрируют подобное расхождение. Пожар 2010 г. резко снизил NBR на нарушенных площадках, после чего индекс постепенно увеличивался. К 2021 г. на одном из участков его величина приблизилась к предпожарному диапазону. Если рассматривать только временную линию NBR, такой результат можно было бы истолковать как завершившееся восстановление. Наземные наблюдения дают более осторожную картину: состав и структура растительных сообществ

сохраняли признаки пирогенной трансформации [1].

Причина этого расхождения объясняется физической природой индекса. NBR чувствителен к контрасту между ближним и коротковолновым инфракрасным отражением. Молодая листва, густой травостой и кустарники способны быстро увеличить NIR-сигнал и изменить SWIR-отклик по мере накопления влаги и биомассы. Однако по спутниковому сигналу нельзя определить, формируется ли он кронами молодых сосен, березовым подростом или плотным травяным покровом. Поэтому восстановление индекса — это прежде всего восстановление определенного спектрального свойства поверхности.

Вторая закономерность состоит в том, что расхождение спектральной и ценотической траекторий не является особенностью одного локального полигона. На сибирском материале S. G. Bao с соавторами получили более быстрое возвращение спектральных характеристик по сравнению с породным составом, причем широколиственные компоненты восстанавливались быстрее хвойных [4]. В сухих суббореальных лесах Канады связь между Landsat-траекториями и наземной структурой также оказалась неоднородной: одинаково выраженное спектральное «позеленение» соответствовало разным комбинациям древесного запаса и восстановления структуры [12].

Следовательно, геоэкологическая интерпретация должна отделять по меньшей мере пять вариантов развития нарушенного участка.

Таблица 2 – Типология постпирогенных траекторий лесной геосистемы

Тип траектории	Дистанционный признак	Полевое состояние	Геоэкологическая интерпретация
I. Быстрое согласованное восстановление	NBR устойчиво приближается к референсному диапазону	возрастает сомкнутость древесного яруса, формируется подрост исходной породы	устойчивое движение к состоянию, близкому к допожарному
II. Спектральное восстановление при структурном запаздывании	NBR достиг предпожарного диапазона	древесный ярус разрежен; высокий вклад трав, кустарников либо лиственных пород	ложноположительное «восстановление» при оценке только по индексу
III. Медленное восстановление	плавный положительный	древесное возобновление	сохранение исходного направления сукцессии

	тренд; значения T_{80}/T_{90} велики	присутствует, но темпы его развития невысоки	при длительном восстановительном периоде
IV. Стабилизация на пониженном уровне	после первоначального роста индекс выходит на плато ниже контроля	недостаточное возобновление исходного древостоя	вероятный переход к устойчиво измененному состоянию
V. Повторное нарушение	восстановительная кривая вновь резко падает	новый пожар или иное сильное нарушение	прерывание текущей сукцессии и начало нового восстановительного цикла; межпожарный интервал становится ключевым фактором

Источник: разработано авторами по результатам обобщения [1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14].

Для Тункинской котловины особого внимания требуют траектории II, IV и V. Региональная ландшафтная оценка показывает повышенную повторяемость пожаров именно в сосновых сообществах песчаных массивов [3]. На таких территориях быстрое развитие напочвенной растительности способно маскировать медленное древесное возобновление, а очередной пожар прерывает процесс до того, как лес достигнет структуры, обеспечивающей прежние средообразующие функции.

Третья выявленная закономерность относится к пространственной неоднородности одной и той же гари. Восстановительный период нельзя считать атрибутом пожара в целом. Исследование пожара 2003 г. в Сибири показало устойчивый градиент от периферии нарушенного массива к его внутренней части. Малые и более компактные гари восстанавливались быстрее, тогда как большие и вытянутые — медленнее; для всех проанализированных пятен средний срок составил 12,2 года [10]. Для интерпретации Тункинской котловины это означает, что наряду с dNBR следует измерять площадь пятна, его компактность и расстояние пикселя или полевой площадки до сохранившегося леса.

Четвертая закономерность касается устойчивой роли тяжести пожара. На межрегиональном массиве бореальных и умеренных лесов K. Li с соавторами

установили более медленное спектральное восстановление бореальных территорий; восстановление ускорялось при большей доле широколиственных пород и меньшей тяжести огня, тогда как климатические условия существенно изменяли региональную скорость процесса [6]. В глобальном исследовании крупных пожаров тяжесть нарушения оказалась фактором, сильнее удлинявшим восстановительный период, чем последующие климатические различия, хотя почвенная влага заметно способствовала регенерации [8].

Российские полевые материалы дополняют дистанционную картину. В Амурской области Н. А. Тимченко с соавторами показали, что естественное постпирогенное возобновление лиственницы Гмелина определяется конкретными условиями, формирующимися после огня в мерзлотных ландшафтах [9]. Многолетние исследования гарей Западного Забайкалья также фиксируют различную направленность формирования вторичных лесов в зависимости от территориальной и топологической приуроченности [7]. Эти результаты показывают, что даже в пределах восточносибирского сектора нельзя ожидать одной универсальной функции «время после пожара — степень восстановления».

Пятая закономерность проявляется через роль первых послепожарных лет. Именно в этот период отдельные жизненные формы получают начальное преимущество. Сохранившийся подрост, наличие семенных деревьев и быстрое заселение открытого субстрата задают дальнейшую траекторию на годы вперед. Если хвойное возобновление остается редким, а лиственные породы и травяной покров быстро занимают освободившееся пространство, спектральный индекс может быстро расти, хотя структура сообщества при этом всё больше отличается от исходной.

С этим связан и фенологический эффект, обнаруженный на основном полигоне. В ненарушенном сосняке Тункинской котловины сезонное развитие травяного яруса само по себе существенно увеличивало NBR [1]. Значит, годовой тренд, сформированный из снимков разных месяцев, способен частично

отражать календарное смещение даты съемки. В методическом отношении это один из наиболее опасных источников ложного ускорения восстановления, поскольку он внешне выглядит как естественный плавный рост индекса.

Проверка выводов на иных типах геосистем показывает, что проблема не ограничена лесом. На Большом Васюганском болоте А. А. Синюткина и Л. П. Гашкова обнаружили различную информативность NBR и NDWI: первый показатель лучше отражал выраженность пирогенного воздействия, второй — последующую динамику болотной растительности; наиболее быстрый рост индексов наблюдался в первые 2–4 года после пожара, а прогнозируемый возврат индексов к прежнему уровню занимал 12–14 лет [11]. Хотя болотная система отличается от соснового леса, методический вывод совпадает: показатель, удобный для диагностики повреждения, необязательно является лучшим индикатором всех компонентов восстановления.

Современные международные данные позволяют еще отчетливее увидеть различия между функциями и структурой. Если глобальная продуктивность во многих экосистемах восстанавливается сравнительно быстро [16], то после крупных пожаров менее трети лесов достигают предпожарного состояния по комплексу характеристик в семилетний срок [8]. Такое различие нельзя считать противоречием. Оно показывает, что продуктивность, плотность растительности, вертикальная структура и породный состав имеют собственные временные масштабы.

Сводные результаты, наиболее значимые для методики исследования Тункинской котловины, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Современные эмпирические результаты 2024–2026 гг. и их значение для диагностики постпирогенного восстановления

Исследование	Территория и данные	Основной результат	Следствие для геоэкологической оценки
Атутова, Распутина, 2025 [1]	Тункинская котловина; Landsat 7, полевые наблюдения	возврат NBR не гарантирует возвращения близкого к исходному растительного сообщества	NBR обязательно сопоставляется с полевыми характеристиками
Bao et al., 2024 [4]	сибирский бореальный лес; Landsat	спектральное восстановление быстрее композиционного; широколиственные компоненты восстанавливаются быстрее хвойных	необходимо отдельно контролировать породный состав
Швецов, 2024 [5]	Сибирь, 2002–2022; MODIS, Landsat	пожары с гибелью древостоя имеют более высокие энергетические характеристики	характеристики самого пожара входят в объясняющую модель
Li et al., 2025 [6]	бореальные и умеренные леса	бореальное восстановление медленнее; важны тяжесть пожара, климат и доля лиственных пород	единого регионально независимого срока восстановления нет
Lv et al., 2025 [8]	3281 крупный пожар в мире	менее трети лесов восстановились за 7 лет; тяжесть пожара удлиняет срок	восстановление нужно оценивать на длительном временном интервале
Liu et al., 2026 [10]	сибирский пожар 2003 г.	72,7 % пятен восстановились к 2023 г.; среднее время — 12,2 года; выражен градиент край–центр	в модель вводятся размер, форма гари и расстояние до кромки
Smith-Tripp et al., 2026 [14]	сухие суббореальные леса	структурное восстановление связано с климатическими экстремумами и предпожарной структурой	климат после пожара анализируется наряду с dNBR

Источник: составлено авторами по [1, 4–6, 8, 10, 14].

Полученные сопоставления позволяют уточнить само понятие геоэкологического восстановления. Для пирогенно нарушенного соснового

ландшафта его целесообразно понимать не как возврат одного показателя, а как приближение нескольких взаимосвязанных характеристик к значениям, типичным для референсного состояния, при отсутствии устойчивого перехода к альтернативному состоянию. В этом определении принципиальны и множественность показателей, и временная устойчивость.

На этой основе для Тункинской котловины предлагается трехуровневая диагностическая модель. Первый уровень фиксирует, насколько поверхность спектрально приблизилась к ненарушенному аналогу. Второй показывает, восстановлена ли структура древесного яруса: сформировался ли достаточно представительный подрост, увеличиваются ли его высота и сомкнутость, сохраняются ли деревья исходной генерации. Третий отвечает на вопрос о направлении сукцессии: остается ли сосна ведущей породой либо наблюдается устойчивое перераспределение в пользу мелколиственных видов.

Ландшафтный контекст следует учитывать как отдельный компонент такой оценки. Один и тот же результат полевых описаний имеет разное прогностическое значение на влажном участке с невысокой повторяемостью пожаров и на сухом песчаном массиве, где новый огонь статистически более вероятен. Поэтому карта восстановления должна отражать текущий тип траектории и факторы, способные ее изменить.

Обсуждение результатов исследования. Предложенный подход меняет привычную последовательность интерпретации спутниковых наблюдений. В традиционной схеме сначала рассчитывается индекс, затем по его увеличению делается вывод о восстановлении растительности. Геоэкологический анализ требует дополнительного вопроса: какая именно растительность сформировала этот сигнал и вернулись ли функции, которые обеспечивал допожарный лес?

Такое уточнение особенно существенно для светлохвойных лесов. Сосновый древостой создает особый режим освещения и подстилки, влияет на запас горючих материалов, пространственное распределение влаги и условия для нижних ярусов. Если после пожара участок быстро покрывается травами и

березовым подростом, суммарная фотосинтетически активная биомасса может увеличиваться, но структура природного комплекса уже становится иной. Значит, дистанционное «озеленение» не следует автоматически называть восстановлением соснового леса.

Результаты Bao et al. непосредственно подтверждают этот вывод на материале сибирского бореального сектора: спектральное восстановление после мегапожара происходило быстрее восстановления породного состава, а широколиственные лесные типы демонстрировали более высокие темпы восстановления, чем хвойные [4]. Это обстоятельство объясняет, почему высокое значение NBR в поздней фазе сукцессии без классификации породного состава остается неоднозначным.

Не менее важно различать «медленное восстановление» и «изменение траектории». В первом случае сосна продолжает возобновляться, но ее развитие ограничено суровыми условиями, дефицитом влаги или высокой тяжестью первоначального пожара. Во втором случае доминирующая роль переходит к другому сообществу и разрыв с референсным сосняком со временем не сокращается. Одинаковое низкое значение NBR через пять лет после пожара может характеризовать оба варианта, хотя их экологический прогноз различен.

Полевые наблюдения необходимы именно для такого различения. Полевые наблюдения не должны сводиться к формальной проверке класса «лес/не лес». Наибольшую информацию дают повторные измерения состояния подроста и изменения его породного состава. Если NBR стабильно растет, но число и высота молодых сосен почти не меняются, а проективное покрытие трав и лиственных пород увеличивается, исследователь получает доказательство расхождения двух восстановительных траекторий.

Вместе с тем и наземное обследование имеет пространственные ограничения. Несколько пробных площадей не отражают неоднородность многокилометровой гари. Поэтому дистанционные и полевые методы дополняют друг друга. Landsat обеспечивает пространственно-временной охват

наблюдений, а наземные данные позволяют интерпретировать экологический смысл спектральной динамики. Их объединение составляет ядро методики.

Протяженный архив Landsat остается здесь особенно ценным. Обзор J. C. White указывает на более чем сорокалетнюю последовательность наблюдений с пространственным разрешением 30 м как на один из основных ресурсов исследования восстановления бореальных лесов [2]. Sentinel-2 повышает детализацию современной стадии, однако не дает сопоставимой ретроспективной глубины. Поэтому совмещение двух систем оправдано лишь при четком разделении их функций.

Еще одно следствие относится к оценке времени. Отсчет «прошло десять лет после пожара» почти ничего не сообщает о стадии сукцессии без данных о тяжести и ландшафтном положении. Результаты Liu et al. показывают, что даже в пределах одного крупного пожара время восстановления закономерно меняется от края к центру гари и зависит от ее размеров [10]. Следовательно, возраст нарушения — необходимая, но недостаточная переменная.

Для Тункинской котловины пространственная конфигурация приобретает дополнительное значение из-за особенностей сосновых боров. Песчаные массивы обладают ограниченной влагоудерживающей способностью, а открытые после огня поверхности быстрее прогреваются и иссушаются. Если в центре крупной гари отсутствуют семенные деревья, расстояние до источника семян усиливает действие эдафического дефицита. Два фактора работают совместно, и их действие нельзя корректно приписать только рельефу или только тяжести пожара.

Аналогично следует трактовать влияние экспозиции. Южный склон получает больше солнечной радиации и при прочих равных условиях может быстрее терять влагу. Но сама экспозиция не «задерживает лесовосстановление» автоматически. Ее эффект реализуется через локальный водно-тепловой режим и зависит от субстрата, почв и погодных условий конкретного периода. Такое причинное разграничение важно для геоэкологического моделирования,

поскольку не позволяет подменять объяснение механизма простой констатацией статистической связи.

Климатические экстремумы первых лет после пожара способны изменить траекторию даже при одинаковой начальной тяжести. Исследование структурного восстановления в суббореальных лесах связывает медленное формирование хвойного древостоя с аномально холодными и сухими летними сезонами, тогда как предпожарная структура также сохраняет заметное влияние на последующее состояние [14]. Это дает основание включать в мониторинг не только многолетние климатические нормы, но и последовательность конкретных послепожарных сезонов.

Роль повторного пожара принципиально иная. Он частично разрушает сформировавшуюся древесную структуру и задает новую исходную точку сукцессии. При коротком межпожарном интервале молодые сосны не успевают достичь репродуктивной зрелости, а запас семян и число сохранившихся источников возобновления уменьшаются. В ландшафтах с высокой повторяемостью огня это создает предпосылки для выхода системы из исторически привычного диапазона состояний.

Именно поэтому выявленная Черкашиной и Силаевым высокая пожарная подверженность сосновых боров Тункинской котловины важна не только для противопожарного планирования [3]. Она должна учитываться и при интерпретации карт восстановления. Участок с медленным возобновлением в зоне редких пожаров сохраняет временной ресурс для продолжения сукцессии. Аналогичный участок в зоне высокой повторяемости может не получить такого временного окна.

Полученные положения имеют прикладное значение для организации геоэкологического мониторинга. Территории, на которых спектральный индекс приблизился к референсному уровню и одновременно подтверждено восстановление соснового подроста, могут переводиться в режим менее интенсивного обследования. Там, где спектральные и полевые признаки

расходятся, мониторинг должен сохраняться. Еще большего внимания требуют площади с устойчивым плато ниже референсного состояния и участки, где новый пожар нарушил незавершенную сукцессию.

В этой связи карта восстановительных траекторий информативнее обычной карты давности пожаров. На ней один цветовой класс должен объединять территории по типу процесса. Пятнадцатилетняя гарь с развитым сосновым подростом и пятнадцатилетняя гарь, занятая преимущественно лиственной порослью, нуждаются в разных геоэкологических оценках, хотя дата нарушения совпадает.

Предлагаемая схема также позволяет осторожнее пользоваться термином «устойчивость». Быстрый возврат индекса после пожара свидетельствует о быстром восстановлении биомассы растительного покрова, фиксируемом по спектральным характеристикам. Устойчивость исходного соснового леса требует большего: возврата древесной структуры, возобновления ведущей породы и сохранения способности комплекса продолжать развитие без перехода к альтернативному типу сообщества.

В этом отношении особенно показательна разница между глобальными оценками продуктивности и исследованиями структуры леса. Быстрое восстановление GPP, выявленное для значительной части пожаров [16], не опровергает многолетние сроки структурного восстановления, обнаруженные в бореальных лесах [8, 10, 14]. Напротив, сопоставление этих результатов дает более полную картину: биогеохимическая функция может частично восстановиться раньше, чем прежняя пространственная организация древостоя.

Научно-практический результат работы поэтому заключается не в выборе «лучшего» дистанционного индекса. NBR и dNBR сохраняют высокую ценность для диагностики пирогенного воздействия. Ограничение возникает тогда, когда измеряемому ими спектральному свойству приписывается более широкий экологический смысл, чем позволяет физическая природа наблюдения.

Для сосновых лесов Тункинской котловины оптимальной является

иерархическая схема мониторинга. На первом уровне многолетний Landsat-ряд выявляет участки с различной формой траектории. На втором Sentinel-2 уточняет современную пространственную структуру неоднородных зон. На третьем полевые обследования концентрируются в местах, где дистанционные показатели указывают на замедление, плато либо подозрительно быстрое спектральное восстановление. Такой порядок сокращает объем наземных работ без отказа от их экологической содержательности.

Перспективным развитием методики станет подключение высотной информации. Воздушное или космическое лазерное сканирование позволяет оценивать вертикальную структуру, которую оптический индекс отображает лишь косвенно. Современный обзор бореального восстановления специально выделяет сочетание оптических временных рядов и лазерных данных как направление, способное сблизить дистанционную оценку с лесной структурой [2]. Для Тункинской котловины такой подход помог бы отделить высокий спектральный отклик низкорослого покрова от формирования полноценного древесного яруса.

Однако даже при появлении более совершенных сенсоров полевые наблюдения сохраняют свое значение. Видовой состав, жизненное состояние подроста и локальные следы повторного нарушения нельзя во всех случаях надежно вывести из спектральных данных.

Выводы. Проведенное исследование показывает, что оценивать постпирогенное состояние сосновых лесов по факту возвращения одного спутникового индекса к исходному диапазону методологически недостаточно. Спектральная нормализация поверхности, восстановление вертикальной структуры древостоя и возвращение предпожарного породного состава принадлежат к разным сторонам сукцессионного процесса и способны существенно расходиться во времени. Для геоэкологической диагностики важно не устранять это расхождение усреднением, а использовать его как показатель изменившегося хода восстановления.

Материалы по Тункинской котловине дают особенно наглядный пример. После пожара 2010 г. NBR на части исследованных территорий приблизился к допожарным значениям, однако многолетние геоботанические наблюдения не подтвердили эквивалентного возвращения сообщества к состоянию ненарушенного соснового леса. Тем самым региональные данные согласуются с результатами современных исследований других бореальных территорий, где спектральное восстановление систематически опережает композиционное и структурное.

Сравнительный анализ опубликованных спутниковых и полевых исследований показывает необходимость многокомпонентной оценки постпирогенного восстановления сосновых лесов. Возвращение спектральных характеристик растительности к предпожарному диапазону может происходить быстрее восстановления породного состава и структуры древостоя. Для разграничения восстановительных траекторий предложено учитывать первоначальную тяжесть пожара, динамику NBR, состояние подроста, особенности почвенного покрова и повторные нарушения. В качестве методических временных характеристик определены показатели T_{80} и T_{90} с правилом подтверждения достижения порога в последовательных сопоставимых сезонах. Предложенная схема предназначена для применения к пространственно согласованным спутниковым и полевым данным.

Начальная тяжесть пожара и последующая восстановительная траектория должны анализироваться раздельно. dNBR рационально применять для стратификации территории непосредственно после нарушения, тогда как многолетний NBR позволяет прослеживать дальнейшее изменение поверхности. Надежность временного ряда повышается при наличии многолетней предпожарной линии, сопоставимых ненарушенных участков и единого фенологического окна. Без выполнения этих условий сезонное развитие растительности и межгодовая погода могут быть ошибочно истолкованы как ускорение либо замедление сукцессии.

В пространственном отношении гарь неоднородна. На время восстановления воздействуют не только интенсивность повреждения и число прошедших лет, но и площадь пирогенного пятна, его форма, удаленность от сохранившегося леса, водно-тепловой режим, почвенный субстрат и климат первых послепожарных сезонов. Поэтому средний срок для всего контура пожара обладает ограниченной диагностической ценностью. Более содержательно выделять локальные траектории и сопоставлять их с конкретными ландшафтными условиями.

Предложенная классификация из пяти траекторий позволяет отделить быстрое согласованное восстановление от случаев, когда высокий спутниковый сигнал маскирует недостаточное восстановление древесного яруса, а также выявить медленную сукцессию, стабилизацию на пониженном уровне и повторное нарушение. Такая типология удобна для тематического картографирования, поскольку переводит разрозненные временные значения индексов в экологически интерпретируемые классы состояния.

Практическая организация мониторинга должна строиться на сочетании масштабов. Landsat обеспечивает историческую глубину и сопоставимость многолетнего ряда; Sentinel-2 повышает детализацию современных границ; полевые площадки раскрывают состав и структуру растительного сообщества. Цифровая модель рельефа дополняется реальными почвенными и ландшафтными материалами, поскольку высота и экспозиция не могут служить заменой эдафической информации.

Геоэкологическая ценность разработанного подхода состоит в переходе от картографирования факта пожара к пространственной диагностике его долговременных последствий. Конечным объектом мониторинга становится не индекс и не отдельный древостой, а изменяющаяся лесная геосистема. Такой ракурс позволяет выделить территории, где естественная сукцессия сохраняет направление к исходному состоянию, отличить их от площадей с устойчиво измененной траекторией и обосновать дифференцированную частоту

наблюдений и природоохранных мероприятий.

Дальнейшее развитие исследования целесообразно связывать с объединением длинных оптических рядов, данных о вертикальной структуре растительности и повторных полевых обследований. На этой основе возможно построение вероятностных карт времени восстановления, в которых учитываются как незавершенные к моменту наблюдения траектории, так и риск повторного пожара. Для территорий Южной Сибири с контрастными формами рельефа и растущей пирогенной нагрузкой подобные модели способны стать содержательной частью системы регионального геоэкологического мониторинга.

Список литературы

1. Atutova Z. V., Rasputina E. A. Applicability of NBR and dNBR indices in assessment of pyrogenic transformation and post-fire forest regeneration: case study of Southeastern Siberia coniferous forests // Geography, Environment, Sustainability. 2025. Vol. 18. No. 4. P. 36–47. DOI: 10.24057/2071-9388-2025-3963.

2. White J. C. Characterizing forest recovery following stand-replacing disturbances in boreal forests: contributions of optical time series and airborne laser scanning data // Silva Fennica. 2024. Vol. 58. No. 2. Article 23076. DOI: 10.14214/sf.23076.

3. Черкашина А. А., Силаев А. В. Комплексная оценка подверженности пожарам ландшафтов Тункинской котловины // География и природные ресурсы. 2025. Т. 46. № 4. С. 45–58. DOI: 10.15372/GIPR20250405.

4. Bao S. G., Wang W. J., Liu Z., Zhang H. K., Wang L., Ma J., Sun H., Ba S., Wang Y., He H. S. Revealing post-megafire spectral and compositional recovery in the Siberian boreal forest using Landsat time series and regression-based unmixing approach // Remote Sensing of Environment. 2024. Vol. 311. Article 114307. DOI: 10.1016/j.rse.2024.114307.

5. Швецов Е. Г. Оценка послепожарной гибели лесов в Сибири по спутниковым данным и ее связь с характеристиками пожаров // Сибирский экологический журнал. 2024. Т. 31. № 4. С. 550–560. DOI: 10.15372/SEJ20240403.

6. Li K., Liu Z., Xu W. et al. Post-fire spectral recovery and driving factors across the boreal and temperate forests // Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 2025. Vol. 380. No. 1924. Article 20230453. DOI: 10.1098/rstb.2023.0453.

7. Воронин В. И., Гриценюк А. П., Сизых А. П., Осколков В. А. Современные тенденции восстановления лесов на гарях Западного Забайкалья // География и природные ресурсы. 2025. Т. 46. № 2. С. 115–123. DOI: 10.15372/GIPR20250211.

8. Lv Q., Chen Z., Wu C., Peñuelas J. et al. Increasing severity of large-scale fires prolongs recovery time of forests globally since 2001 // Nature Ecology & Evolution. 2025. Vol. 9. P. 980–992. DOI: 10.1038/s41559-025-02683-x.

9. Тимченко Н. А., Ткаченко К. Г., Юст Н. А., Щербакова О. Н. Постпирогенное восстановление лиственницы Гмелина в Амурской области // Сибирский лесной журнал. 2024. № 6. С. 68–77. DOI: 10.15372/SJFS20240609.

10. Liu T., Chen F., Yu B., Wang L., Gao M. Patch-based assessment of post-fire recovery after the 2003 Siberian wildfire // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2026. Vol. 146. Article 105167. DOI: 10.1016/j.jag.2026.105167.

11. Синюткина А. А., Гашкова Л. П. Оценка постпирогенной динамики растительности верхового болота (Западная Сибирь) на основе спутниковых данных Landsat // Региональные геосистемы. 2025. Т. 49. № 1. С. 112–127. DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-1-112-127.

12. Smith-Tripp S. M., Coops N. C., Mulverhill C., White J. C., Axelson J. Landsat assessment of variable spectral recovery linked to post-fire forest structure in dry sub-boreal forests // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2024. Vol. 208. P. 121–135. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2024.01.008.

13. Синюткина А. А., Гашкова Л. П., Харанжевская Ю. А. Пирогенное изменение болотной растительности и торфа в Западной Сибири // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2024. Т. 79. № 1. С. 78–88. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.6.

14. Smith-Tripp S., Coops N., Mulverhill C., White J., Gergel S. Post-fire structural forest recovery associated with climate extremes in dry sub-boreal forests // Landscape Ecology. 2026. Vol. 41. Article 14. DOI: 10.1007/s10980-025-02266-y.

15. Jones M. W., Veraverbeke S., Andela N., Doerr S. H., Kolden C. et al. Global rise in forest fire emissions linked to climate change in the extratropics // Science. 2024. Vol. 386. No. 6719. Article eadl5889. DOI: 10.1126/science.adl5889.

16. Xu H., Chen H. W., Chen D., Wang Y., Yue X. et al. Global patterns and drivers of post-fire vegetation productivity recovery // Nature Geoscience. 2024. Vol. 17. No. 9. P. 874–881. DOI: 10.1038/s41561-024-01520-3.

References

1. Atutova Z. V., Rasputina E. A. Applicability of NBR and dNBR indices in assessment of pyrogenic transformation and post-fire forest regeneration: case study of Southeastern Siberia coniferous forests // Geography, Environment, Sustainability. 2025. Vol. 18. No. 4. P. 36–47. DOI: 10.24057/2071-9388-2025-3963.

2. White J. C. Characterizing forest recovery following stand-replacing disturbances in boreal forests: contributions of optical time series and airborne laser scanning data // Silva Fennica. 2024. Vol. 58. No. 2. Article 23076. DOI: 10.14214/sf.23076.

3. Cherkashina A. A., Silaev A. V. Kompleksnaya ocenka podverzhennosti pozharam landshaftov Tunkinskoj kotloviny` // Geografiya i prirodny`e resursy`. 2025. T. 46. № 4. S. 45–58. DOI: 10.15372/GIPR20250405.

4. Bao S. G., Wang W. J., Liu Z., Zhang H. K., Wang L., Ma J., Sun H., Ba S., Wang Y., He H. S. Revealing post-megafire spectral and compositional recovery in the Siberian boreal forest using Landsat time series and regression-based unmixing approach // Remote Sensing of Environment. 2024. Vol. 311. Article 114307. DOI: 10.1016/j.rse.2024.114307.

5. Shveczov E. G. Ocenka poslepozharnoj gibeli lesov v Sibiri po sputnikovy`m danny`m i ee svyaz` s xarakteristikami pozharov // Sibirskij e`kologicheskij zhurnal. 2024. T. 31. № 4. S. 550–560. DOI: 10.15372/SEJ20240403.

6. Li K., Liu Z., Xu W. et al. Post-fire spectral recovery and driving factors across the

boreal and temperate forests // Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 2025. Vol. 380. No. 1924. Article 20230453. DOI: 10.1098/rstb.2023.0453.

7. Voronin V. I., Gricenyuk A. P., Sizy`x A. P., Oskolkov V. A. Sovremenny`e tendencii vosstanovleniya lesov na garyax Zapadnogo Zabajkal`ya // Geografiya i prirodny`e resursy`. 2025. T. 46. № 2. S. 115–123. DOI: 10.15372/GIPR20250211.

8. Lv Q., Chen Z., Wu C., Peñuelas J. et al. Increasing severity of large-scale fires prolongs recovery time of forests globally since 2001 // Nature Ecology & Evolution. 2025. Vol. 9. P. 980–992. DOI: 10.1038/s41559-025-02683-x.

9. Timchenko N. A., Tkachenko K. G., Yust N. A., Shherbakova O. N. Postpirogennoe vosstanovlenie listvennicy Gmelina v Amurskoj oblasti // Sibirskij lesnoj zhurnal. 2024. № 6. S. 68–77. DOI: 10.15372/SJFS20240609.

10. Liu T., Chen F., Yu B., Wang L., Gao M. Patch-based assessment of post-fire recovery after the 2003 Siberian wildfire // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2026. Vol. 146. Article 105167. DOI: 10.1016/j.jag.2026.105167.

11. Sinyutkina A. A., Gashkova L. P. Ocenka postpirogennoj dinamiki rastitel`nosti verxovogo bolota (Zapadnaya Sibir`) na osnove sputnikovy`x danny`x Landsat // Regional`ny`e geosistemy`. 2025. T. 49. № 1. S. 112–127. DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-1-112-127.

12. Smith-Tripp S. M., Coops N. C., Mulverhill C., White J. C., Axelson J. Landsat assessment of variable spectral recovery linked to post-fire forest structure in dry sub-boreal forests // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2024. Vol. 208. P. 121–135. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2024.01.008.

13. Sinyutkina A. A., Gashkova L. P., Xaranzhevskaya Yu. A. Pirogennoe izmenenie bolotnoj rastitel`nosti i torfa v Zapadnoj Sibiri // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. 2024. T. 79. № 1. S. 78–88. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.6.

14. Smith-Tripp S., Coops N., Mulverhill C., White J., Gergel S. Post-fire structural

forest recovery associated with climate extremes in dry sub-boreal forests // Landscape Ecology. 2026. Vol. 41. Article 14. DOI: 10.1007/s10980-025-02266-y.

15. Jones M. W., Veraverbeke S., Andela N., Doerr S. H., Kolden C. et al. Global rise in forest fire emissions linked to climate change in the extratropics // Science. 2024. Vol. 386. No. 6719. Article eadl5889. DOI: 10.1126/science.adl5889.

16. Xu H., Chen H. W., Chen D., Wang Y., Yue X. et al. Global patterns and drivers of post-fire vegetation productivity recovery // Nature Geoscience. 2024. Vol. 17. No. 9. P. 874–881. DOI: 10.1038/s41561-024-01520-3.

Статья поступила в редакцию 27.05.2026; одобрена после рецензирования 08.07.2026; принята к публикации 12.10.2026.

The article was submitted 27.05.2026; approved after peer review 08.07.2026; accepted for publication 12.10.2026.

Научная статья
УДК 911.375.4:556.53

ДИФФУЗНЫЙ ВЫНОС БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ЭВТРОФИКАЦИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ РЕЧНОГО БАССЕЙНА

Хотяновская Юлия Владимировна, кандидат географических наук, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия, Пермь, khotianovskaia.iu.v@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается пространственная дифференциация диффузного поступления азота и фосфора с агроландшафтов и её значение для оценки потенциальной эвтрофикации водных объектов бассейна Средней Волги. Цель исследования заключается в согласовании бассейновой оценки биогенной нагрузки с характеристиками принимающей водной массы. Используется расчётная схема SWAT, позволяющая разграничивать суббассейны и гидрологические единицы отклика с различными природными и хозяйственными характеристиками. Рассмотрены калибровочные показатели моделирования стока и гидрохимических параметров, а также сравнительные характеристики выноса азота и фосфора по типам территорий. Показано, что удельный вынос биогенов с водосбора не может непосредственно отождествляться с их концентрациями в водохранилище. Для оценки трофического состояния необходимо учитывать измеренные гидрохимические и гидробиологические параметры, водообмен и внутриводоёмные процессы удержания веществ.

Ключевые слова: диффузный сток; биогенные элементы; речной бассейн; эвтрофикация; SWAT; трофическое состояние.

Original article

DIFFUSE REMOVAL OF NUTRIENTS AND EUTROPHICATION OF THE RIVER BASIN

Khotianovskaia Iuliia Vladimirovna, Candidate of Geographical Sciences, Perm State University, Perm, Russia, khotianovskaia.iu.v@mail.ru

Abstract. This article examines the spatial differentiation of diffuse nitrogen and phosphorus inputs from agricultural landscapes and its implications for assessing the potential eutrophication of water bodies in the Middle Volga basin. The study aims to reconcile basin-wide assessments of nutrient loads with the characteristics of the receiving water mass. The SWAT calculation model is used, allowing for the differentiation of sub-basins and hydrological response units with different natural and economic characteristics. Calibration parameters for runoff modeling and hydrochemical parameters are considered, as well as comparative characteristics of nitrogen and phosphorus removal by site type. It is shown that the specific removal of nutrients from the catchment cannot be directly identified with their concentrations in the reservoir. To assess the trophic state, it is necessary to consider measured hydrochemical and hydrobiological parameters, water exchange, and in-reservoir processes of nutrient retention.

Keywords: diffuse runoff; nutrients; river basin; eutrophication; SWAT; trophic state.

Введение. Крупные речные бассейны на протяжении последних десятилетий испытывают нарастающую нагрузку, связанную с поступлением соединений азота и фосфора с прилегающих территорий. Эти вещества, необходимые водным экосистемам в естественных концентрациях, при избыточном поступлении вызывают комплекс трофических изменений, приводящих к эвтрофикации [1]. Процессы деградации водоёмов, обусловленные переизбытком нутриентов, давно перестали быть локальными

явлениями и приобрели масштабы, сопоставимые с региональными экологическими кризисами. В.Б. Сочава (1978), разрабатывая учение о геосистемах, указывал на то, что нарушение баланса веществ в одном компоненте ландшафта неизбежно передаётся по цепям прямых и обратных связей всем остальным. Применительно к речным бассейнам этот тезис означает, что изменения агроландшафтов на водоразделах сказываются на качестве воды в русловой сети [2].

Геоэкология как научная дисциплина сформировала собственный аппарат для оценки подобных явлений. А.В. Чигаркин (2003) рассматривал геоэкологическую обстановку через призму предельно допустимых экологических нагрузок, выделяя пять уровней напряжённости среды: от благоприятного до катастрофического [3]. Такая шкала позволяет перейти от качественных описаний к количественным критериям, что особенно ценно при моделировании. Г.Н. Голубев (1999) настаивал на необходимости учитывать не только текущее состояние, но и пространственно-временную динамику загрязняющих веществ. Именно временной лаг между поступлением биогенов в почву и их выносом в гидрографическую сеть создаёт основные трудности для прогнозирования [4].

Проблема требует инструментария, способного связать разрозненные данные о землепользовании, почвенном покрове, рельефе и гидрологическом режиме в единую расчётную схему. Эту задачу решают геоэкологические модели, предназначенные для оценки диффузного загрязнения [5].

В отличие от сбросов промышленных предприятий, которые поступают в водоём через конкретный выпуск и поддаются непосредственному измерению, диффузный сток формируется на обширных площадях и не имеет фиксированного источника. Дождевые и талые воды смывают с поверхности почвы растворённые и взвешенные вещества. Затем они по склонам, лощинам и малым водотокам достигают рек. С.Б. Лавров (1989) обращал внимание на то, что рассредоточенный характер поступления загрязняющих веществ делает их

контроль чрезвычайно сложным. Невозможно разместить измерительный прибор на каждом гектаре пашни [6].

Первые попытки количественно описать этот процесс относятся к 1970-м годам. Дж. Уильямс и Р. Ханн создали систему HYMO - проблемно-ориентированный язык для гидрологического моделирования, позволявший рассчитывать сток с учётом характеристик бассейна. Несколько лет спустя те же авторы расширили подход, введя ограничение по качеству воды при оптимизации управления крупными сельскохозяйственными водосборами. Указанные работы заложили основу для последующих разработок, в которых гидрологический расчёт стал неразрывно связан с оценкой переноса веществ [7], [8].

Следующим шагом стала модель AGNPS, предложенная Р. Янгом с соавторами. Она была специально сконструирована для анализа территорий, занятых сельскохозяйственными угодьями, и позволяла оценивать вынос наносов, азота и фосфора с каждой расчётной ячейки. Исследовательская служба Министерства сельского хозяйства США опубликовала отчёт, в котором модель рассматривалась как инструмент комплексного анализа бассейна, а не отдельных его фрагментов. А. Вебер, Н. Фёрер и Д. Мёллер позднее продемонстрировали, как долгосрочные изменения в структуре землепользования, вызванные социально-экономическими факторами, отражаются на функционировании ландшафтов мезомасштабного водосбора. Даже постепенная трансформация угодий, по их данным, способна существенно изменить режим поступления нутриентов в речную сеть [9].

Для отечественной геоэкологической школы близким по смыслу остаётся подход, основанный на оценке экологической устойчивости геосистем. К.Н. Мамирова (2014) в учебном пособии по геоэкологии и охране природы указывала, что антропогенное воздействие на литогенную, гидроклиматогенную и почвенно-биотическую среды формирует совокупный эффект, который нельзя свести к простой сумме отдельных факторов. Диффузное загрязнение -

наглядный пример такого синергетического воздействия. Ни эрозия, ни внесение удобрений по отдельности не объясняют всей картины деградации водных объектов [10].

Сельскохозяйственные угодья занимают значительную часть площадей, дренируемых крупными реками, и именно они служат главным источником соединений фосфора и азота, поступающих в поверхностные воды. Механизм этого влияния изучен достаточно подробно. Минеральные удобрения, вносимые на поля, лишь частично усваиваются культурными растениями. Оставшаяся доля сохраняется в почвенном профиле, откуда во время дождей или снеготаяния перемещается вместе с внутрипочвенным и поверхностным стоком в ближайшие водотоки [11]. А.Г. Исаченко (1991) в работах по ландшафтоведению и физико-географическому районированию показывал, что распаханные склоны теряют способность задерживать влагу. Скорость поверхностного стекания на них возрастает в несколько раз по сравнению с целинными участками.

Особую опасность представляет фосфор. Он переносится преимущественно в сорбированном состоянии на почвенных частицах. Эрозия, следовательно, выступает не просто фактором потери плодородия, но и каналом доставки биогенных веществ в водоёмы. М.И. Будыко в исследованиях глобальной экологии отмечал, что масштабы эрозионных процессов на распаханных территориях сопоставимы с естественной денудацией целых горных систем. Это подчёркивает глубину трансформации, которую вносит земледелие в круговорот веществ. Мамирова (2014) приводит данные о том, что суммарный объём поверхностного стока Казахстана распределяется крайне неравномерно. Внутриконтинентальное положение республики и аридность климата усиливают уязвимость водных объектов. В бессточных бассейнах накопление нутриентов не компенсируется разбавлением, и риски эвтрофикации возрастают многократно.

А.В. Лосев и Г.Г. Провадкин (1998) рассматривали эту проблему в контексте социальной экологии. Интенсивность землепользования, по их

мнению, определяется не столько природными условиями, сколько экономической конъюнктурой и демографической ситуацией. Вебер с соавторами пришли к аналогичному заключению на примере мезомасштабного бассейна в Центральной Европе. Сокращение поголовья скота и забрасывание пашни, вызванные структурными сдвигами в экономике, привели к заметному снижению нагрузки на водные объекты. Антропогенный фактор действует нелинейно. Его вклад в загрязнение нельзя экстраполировать механически.

Геоэкологическое моделирование в этом контексте выступает инструментом, позволяющим учесть пространственную неоднородность бассейна. Лавров (1989) формулировал задачи геоэкологии как разработку теоретических основ и практических рекомендаций по управлению природопользованием, отводя особое место оценке экологических рисков. Модель, адекватно отражающая процессы выноса биогенов, должна опираться на данные геоэкологического районирования, охватывающие уровни от ландшафтных зон до локальных участков. Чигаркин (2000) разработал схему регионального геоэкологического районирования Казахстана, в которой каждая провинция характеризуется собственным набором лимитирующих факторов. Перенос этого подхода на бассейновый уровень открывает возможность дифференцированного управления рисками эвтрофикации. Для одних участков водосбора критическим параметром окажется интенсивность эрозии. Для других - объём вносимых удобрений. Для третьих - гидрологический режим.

Цель статьи - разработка геоэкологической модели, связывающей характеристики агроландшафтов с количественными оценками выноса биогенных элементов и вероятностью эвтрофикации водоёмов-реципиентов. Методологическую основу составляют принципы геосистемного анализа Сочавы (1978) и подходы к оценке предельно допустимых экологических нагрузок, обоснованные Чигаркиным (2003). Конкретные расчётные процедуры опираются на опыт применения моделей AGNPS и HYMO, адаптированный к условиям внутриконтинентальных аридных бассейнов [12].

Обзор источников литературы. Крупные речные бассейны представляют собой сложные природно-антропогенные геосистемы, в которых последствия хозяйственной деятельности на водоразделах проявляются в состоянии водных объектов. Формирование качества воды в таких системах во многом определяется диффузным (рассредоточенным) загрязнением, источником которого выступают агроландшафты. В работах, посвященных геоэкологии и охране природы, подчеркивается, что устойчивость природных сред к антропогенному воздействию неравномерна и зависит от структурной организации ландшафтов. Нарушение баланса веществ в одном компоненте геосистемы, таком как почвенный покров или растительность, запускает цепь взаимосвязанных изменений, заключающихся в деградации водных объектов [13-15].

Проблема поступления соединений азота и фосфора с сельскохозяйственных угодий давно перешла из разряда локальных в категорию региональных экологических кризисов. Традиционные подходы к оценке водных ресурсов часто опираются на точечные замеры, которые не способны отразить пространственную неоднородность формирования диффузного стока. Для решения этой задачи в мировой и отечественной практике активно применяются пространственно-распределенные гидрологические модели. Модель SWAT, разработанная и непрерывно совершенствуемая специалистами Министерства сельского хозяйства США, зарекомендовала себя как надёжный инструмент моделирования процессов в крупных речных бассейнах. Она позволяет в непрерывном режиме моделировать гидрологические процессы, эрозию, рост растений и циклы биогенных элементов с учётом различных сценариев землепользования.

Несмотря на развитый математический аппарат, в современных исследованиях сохраняется методологическая проблема: во многих работах объёмы выноса биогенов с водосбора напрямую соотносятся со степенью эвтрофикации принимающего водоёма [16], [17]. Такой подход игнорирует

специфику водной массы, ее морфометрию, время водообмена и внутренние биогеохимические процессы. Вынос фосфора из почвы не тождественен цветению воды в водохранилище. В связи с этим назрела необходимость интеграции ландшафтно-геоэкологического моделирования стока с оценкой фактического трофического статуса водных объектов, что позволяет выявить не просто зоны максимального смыва, а участки, формирующие реальный риск эвтрофирования.

Методологическая и теоретическая база исследования. В работе рассматриваются процессы формирования диффузной биогенной нагрузки в бассейне Средней Волги и возможные последствия её поступления в водохранилища. В качестве аналитического инструмента используется расчётная схема SWAT, предусматривающая пространственное подразделение водосбора на суббассейны и гидрологические единицы отклика. Основными анализируемыми компонентами являются поверхностный и внутрипочвенный сток, вынос соединений азота и фосфора, а также характеристики землепользования. Для оценки согласования модели с наблюдаемыми рядами в статье приведены характеристики калибровки речного стока за 2010–2015 гг. и гидрохимических параметров за 2012–2016 гг.

В качестве вычислительного ядра использована модель SWAT. Пространственная дискретизация бассейна выполнена через создание суббассейнов и гидрологических откликающих единиц (HRU). Каждая HRU представляет собой уникальное пересечение типов почв, классов земельного покрова и диапазонов крутизны склонов. Анализ земельного покрова (Land Use/Land Cover) проведен на основе дешифрирования спутниковых снимков с последующей верификацией по наземным данным, что позволило выделить пашню, пастбища, лесные массивы и урбанизированные территории.

Калибровочные характеристики представлены отдельно для гидрологического стока, нитратного азота и общего фосфора. Значения R^2 и NSE позволяют оценивать степень согласованности расчётного и наблюдаемого

рядов, а p-factor и r-factor характеризуют принятую процедуру оценки неопределённости модели.

Чтобы избежать прямого отождествления выноса веществ и эвтрофикации, в схему исследования включён блок оценки трофического статуса Куйбышевского водохранилища. Результаты моделирования наземного выноса биогенов суббассейнами сопрягаются с данными о гидрологическом режиме и морфометрии водоема. Это позволяет рассчитать индекс трофического состояния (TSI) и выявить зоны, где высокая антропогенная нагрузка накладывается на условия, благоприятные для накопления веществ в водной толще.

Результаты исследования и их обсуждение. Пространственная структура бассейна, заложенная в модель, отражает доминирование агроландшафтов. Распределение гидрологических откликающих единиц показывает, как именно землепользование фрагментирует естественные геосистемы (таблица 1).

Таблица 1 - Структура гидрологических откликающих единиц (HRU) и земельного покрова в бассейне Средней Волги

Класс земельного покрова	Доля в площади бассейна, %	Количество сформи-рованных HRU	Преобладающий тип почв	Удельный вес в общем выносе взвешенных веществ, %
Пашня (интенсивное земледелие)	48,2	145	Черноземы выщелоченные, серые лесные	64,5
Пастбища и сенокосы	21,4	86	Черноземы обыкновенные, каштановые	18,2
Лесные массивы и кустарники	22,7	112	Дерново-подзолистые, серые лесные	8,4
Урбанизированные территории	4,1	34	Урбоземы, нарушенные почвы	6,1
Водно-болотные угодья и прибрежные зоны	3,6	28	Аллювиальные, глеевые	2,8

Источник: разработано автором.

Пашня, занимая менее половины территории, формирует подавляющий

объем твердого стока. Это подтверждает геоэкологический постулат о том, что распашка склонов радикально меняет гидродинамику поверхностного стекания. Лесные массивы, напротив, демонстрируют высокую буферную емкость, минимизируя эрозионные процессы. Водно-болотные угодья, при своей незначительной площади, играют непропорционально важную роль в трансформации растворенных форм веществ, выступая естественным фильтром.

Процедура калибровки и оценки неопределенности позволила установить адекватность модели реальным физико-географическим условиям (таблица 2).

Таблица 2 - Показатели калибровки модели SWAT и анализа неопределенности для гидрологических и гидрохимических параметров

Моделируемый параметр	Период калибровки	Коэффициент детерминации (R^2)	Индекс эффективности Нэша-Сатклиффа (NSE)	p-фактор (доля данных в 95% ДИ)	r-фактор (ширина 95% ДИ)
Речной сток	2010-2015	0,78	0,74	0,82	0,45
Концентрация нитратов (NO3)	2012-2016	0,65	0,61	0,71	0,58
Концентрация общего фосфора (P)	2012-2016	0,58	0,52	0,64	0,72

Источник: разработано автором.

Анализ таблицы 2 демонстрирует, что модель наиболее точно воспроизводит динамику речного стока, о чем свидетельствуют высокие значения R^2 и NSE. Для нитратов показатели адекватности остаются на приемлемом уровне, что отражает относительно предсказуемый характер миграции подвижных форм азота. Моделирование выноса фосфора характеризуется большей неопределенностью (ниже R^2 и NSE, выше r-фактор). Это объясняется нелинейностью процессов сорбции фосфора почвенными частицами и сильной зависимостью его смыва от экстремальных ливневых событий, которые сложно точно зафиксировать в режиме ежедневного шага дискретизации. p-фактор показывает, какая доля наблюдаемых данных попала в 95-процентный доверительный интервал; значения выше 0,6 свидетельствуют о том, что модель надежно улавливает общую тенденцию, несмотря на

структурные погрешности.

Пространственное распределение выноса биогенов позволило картировать зоны критического вклада (таблица 3).

Таблица 3 - Пространственная дифференциация удельного выноса азота и фосфора по ключевым суббассейнам (кг/га/год)

Суббассейн (характеристика ландшафта)	Вынос нитратного азота	Вынос общего фосфора	Доминирующий фактор формирования стока
Суббассейн 1 (возвышенная равнина, интенсивная пашня)	14,2	2,8	Водная эрозия, поверхностный сток
Суббассейн 2 (расчлененный рельеф, овражно-балочная сеть)	11,5	4,5	Овражная эрозия, внутрипочвенный сток
Суббассейн 3 (низменность, дренажные системы, пашня)	18,6	1,2	Мелиоративный сток, латеральный поток
Суббассейн 4 (лесостепь, мозаика пашни и леса)	6,4	0,9	Буферное влияние лесных полос
Суббассейн 5 (прибрежная зона, водно-болотные угодья)	2,1	0,3	Ретенция (удержание) в пойме

Источник: разработано автором.

Данные таблицы 3 выявляют фундаментальное различие в поведении азота и фосфора. Суббассейн 3 демонстрирует аномально высокий вынос нитратов, что напрямую связано с наличием мелиоративных систем, обеспечивающих быстрый дренаж и вынос подвижных форм азота в обход почвенной толщи. Фосфор, напротив, мигрирует преимущественно в сорбированном состоянии. Суббассейн 2, характеризующийся глубоким расчленением рельефа, дает максимальный вынос фосфора, поскольку овражная эрозия вовлекает в перенос верхние горизонты почв, богатые этим элементом. Удельный вынос биогенных элементов с водосбора, выраженный в кг/га в год, характеризует массу вещества, поступающую с единицы площади за установленный период. Концентрация биогена в водном объекте выражается в единицах массы на объём и зависит не только от нагрузки, но и от расхода воды, процессов удержания и внутриводоёмных преобразований.

Однако, как отмечалось ранее, по объёму вынесенных веществ нельзя напрямую судить о степени эвтрофикации водоёма. Для оценки реального риска

необходимо соотнести нагрузку с характеристиками водной массы (таблица 4).

Таблица 4 - Сценарное сопоставление биогенной нагрузки, водообмена и потенциального трофического состояния секторов Куйбышевского водохранилища

Сектор водохранилища	Поступление биогенов (относительное)	Время водообмена (дни)	Глубина (м)	Расчетный индекс трофического состояния (TSI)	Класс трофности	Уровень риска эвтрофикации
Верхний бьеф (устье Камы)	Высокое	12	4,5	68	Эвтрофный	Критический
Приплотинная зона (глубоководная)	Низкое	145	22,0	42	Мезотрофный	Низкий
Широкое русло (центральная часть)	Среднее	45	10,5	56	Мезоэвтрофный	Умеренный
Мелководные заливы (закрытые)	Высокое (локальное)	210	2,5	74	Гипертрофный	Критический

Источник: разработано автором.

В верхнем секторе водохранилища сочетание высокой поступающей биогенной нагрузки, сравнительно малой глубины и интенсивного водообмена формирует сложные условия переноса и преобразования питательных веществ. Само по себе короткое время водообмена не является доказательством повышенного накопления, поскольку ускоренная смена водных масс может одновременно способствовать выносу растворённых компонентов. Фактическое удержание азота и фосфора определяется соотношением поступления, выноса, осаждения, повторного высвобождения из донных отложений и биологического потребления.

Таким образом, геоэкологическое моделирование позволяет перейти от констатации факта загрязнения к управлению рисками. Выявление зон критического вклада показывает, что природоохранные мероприятия целесообразно концентрировать на наиболее проблемных участках бассейна.

Меры по улучшению состояния природной среды должны быть территориально адресными: в суббассейнах с преобладанием овражной эрозии необходимо внедрение террасирования и залужения балок, в зонах мелиоративного стока - создание искусственных водно-болотных угодий и буферных полос вдоль дренажных каналов. Интеграция гидрологических моделей с оценкой трофического статуса водоемов формирует научно обоснованную базу для принятия управленческих решений, обеспечивая сохранение экологической устойчивости крупных речных систем.

Выводы. Результаты выполненного исследования убедительно демонстрируют несостоятельность фрагментарных методов оценки качества водных ресурсов, опирающихся исключительно на локальные замеры в створах рек. Формирование диффузного стока биогенных веществ представляет собой непрерывный пространственно-временной процесс, охватывающий всю площадь водосбора и подчиняющийся законам ландшафтной дифференциации. Переход к бассейновому принципу управления водными ресурсами, активно развиваемый в современной международной практике интеграционного моделирования, требует фундаментального пересмотра существующих нормативов. Геоэкологическое нормирование в данном контексте перестает быть просто инструментом контроля точечных сбросов и трансформируется в механизм оценки совокупной антропогенной нагрузки на природно-территориальные комплексы.

Интеграция непрерывных гидрологических моделей с принципами ландшафтной экологии позволяет перейти от констатации фактов загрязнения к прогнозированию трофических изменений в водных объектах-реципиентах. Ключевым аспектом предлагаемого бассейнового подхода выступает внедрение концепции предельно допустимой экологической нагрузки в качестве основного критерия нормирования. В отличие от традиционных предельно допустимых концентраций, определяемых для конкретных химических веществ в точке измерения, интегральная нагрузка учитывает способность геосистемы

выдерживать антропогенное воздействие без утраты средоформирующих функций. Именно способность ландшафтов к саморегуляции и сопротивлению эрозионным процессам определяет уязвимость речной сети к сельскохозяйственной нагрузке.

Пространственная неоднородность бассейна крупной реки диктует необходимость дифференцированного экологического районирования его территории. Участки водосбора, характеризующиеся высокой устойчивостью литогенной основы и развитым почвенно-растительным покровом, обладают значительным буферным потенциалом и требуют преимущественно профилактических мер охраны природы. Напротив, зоны с нарушенным равновесием, где преобладают процессы водной эрозии и деградации почв, формируют критические очаги выноса фосфора и азота. Геоэкологическое нормирование на таких территориях должно базироваться на строгом лимитировании хозяйственной деятельности и обязательной компенсации экологического ущерба через создание буферных полос и реконструкцию естественных фильтров.

Предотвращение эвтрофикации водохранилищ и устьевых областей невозможно только за счёт гидротехнических и природоохранных мероприятий, проводимых непосредственно в акватории. Истинная причина трофической деградации кроется в характере землепользования на прилегающих водоразделах. Бассейновый подход к геоэкологическому нормированию обеспечивает научную основу для принятия управленческих решений, позволяя увязать экономические интересы сельскохозяйственного производства с требованиями сохранения экологического равновесия. Дальнейшее развитие данного направления связано с совершенствованием методов автоматизированного картографирования экологических рисков и адаптацией распределенных моделей к специфическим климатическим и ландшафтным условиям крупных речных систем.

Список литературы

1. Ясинский С. В., Кашутина Е. А., Сидорова М. В. Диффузное загрязнение водных объектов равнинных территорий: проблемы оценки // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 87. № 1. С. 115–130. DOI: 10.31857/S258755662301017X.

2. Sun H., Tian Y., Li L., Zhuang Y., Zhou X., Zhang H., Zhan W., Zuo W., Luan C., Huang K. Unraveling Spatial Patterns and Source Attribution of Nutrient Transport: Towards Optimal Best Management Practices in Complex River Basin // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 906. Art. 167686. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167686.

3. Полянин В. О., Фащевская Т. Б., Словягина А. Н. Особенности формирования и регулирования диффузного загрязнения в пределах городских территорий (на примере р. Яузы) // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 1. С. 53–67. DOI: 10.31857/S0321059623010121.

4. Wallington K., Cai X. Updating SWAT+ to Clarify Understanding of In-Stream Phosphorus Retention and Remobilization: SWAT+P.R&R // Water Resources Research. 2023. Vol. 59. No. 3. Art. e2022WR033283. DOI: 10.1029/2022WR033283.

5. Долгов С. В., Коронкевич Н. И., Алентьев Ю. Ю. Трансграничный водообмен в бассейне Дона // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 87. № 2. С. 250–263. DOI: 10.31857/S2587556623020048.

6. Salim Aoubid H., Opp C. Nitrogen and Phosphorus Discharge Loads Assessment Using the SWAT Model: A Case Study of the Shatt Al-Arab River Basin // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. No. 14. Art. 8376. DOI: 10.3390/app13148376.

7. Ясинский С. В., Кондратьев С. А., Шмакова М. В., Кашутина Е. А., Расулова А. М. Assessment of Nutrient Load on the Cheboksary Reservoir Using the Results of Modeling Runoff and Removal of Biogenic Elements from the Pilot Catchments // Limnology and Freshwater Biology. 2024. № 3. P. 130–141. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-3-130.

8. Ji K., Li W., Hao X., Ouyang W., Zhang Y. Transport Dynamics of Watershed

Discharged Diffuse Phosphorus Pollution Load to the Lake in Middle of Yangtze River Basin // Environmental Pollution. 2024. Vol. 344. Art. 123221. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.123221.

9. Кондратьев С. А., Брюханов А. Ю., Шмакова М. В., Расулова А. М., Галахина Н. Е., Зобков М. Б., Васильев Э. В., Обломкова Н. С. Оценка возможных изменений биогенной нагрузки на Онежское озеро под воздействием антропогенных и климатических факторов // Водные ресурсы. 2024. Т. 51. № 3. С. 285–296. DOI: 10.31857/S0321059624030056.

10. Галахина Н. Е., Сабылина А. В., Зобков М. Б. Современная речная биогенная нагрузка на Онежское озеро // Известия Русского географического общества. 2024. Т. 156. № 4. С. 293–310. DOI: 10.31857/S0869607124040052.

11. Hu Y., Chen M., Pu J., Chen S., Li Y., Zhang H. Enhancing Phosphorus Source Apportionment in Watersheds through Species-Specific Analysis // Water Research. 2024. Vol. 253. Art. 121262. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121262.

12. Джабборов Н. И., Савельев А. П., Добриков А. В., Захаров А. М., Жуйков И. И. Моделирование и прогнозирование выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в зависимости от агрофизических свойств почвы // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34. № 1. С. 101–114. DOI: 10.15507/2658-4123.034.202401.101-114.

13. Минакова Е. А., Шлычков А. П., Кондратьев С. А., Латыпова В. З., Минакова Д. А. Количественная оценка диффузной биогенной нагрузки, обусловленной воздействием сельского хозяйства, на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах Республики Татарстан // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 6. С. 57–69. DOI: 10.17076/lim2069.

14. Wu J., He S., Lu J. Multi-Scale Effects of Topography and Landscape Pattern on Riverine Nitrogen and Phosphorus Nutrients in an Agricultural Watershed // Landscape Ecology. 2025. Vol. 40. Art. 112. DOI: 10.1007/s10980-025-02131-y.

15. Chen G., Liu L., Wang W., Wang R., Li Y., Tang X., Li X. Effectiveness of Best Management Practices for Non-Point Source Pollution in Intensively Managed

Agricultural Watersheds // Journal of Cleaner Production. 2025. Vol. 495. Art. 145076. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.145076.

16. Li S., Xia B., Shen W., Lin Z., Huo K., Wei J. et al. Phosphorus Retention and Delivery Estimation Across a Large River Basin: Assessing the Impact of Landscape Patterns // Water Resources Research. 2025. Vol. 61. Art. e2024WR039347. DOI: 10.1029/2024WR039347.

17. Yang X., Han H., Yan X., Xie Y., Ren Y., Zhang Y., Yang D., She D., Huang X., Xia Y. Divergent Controls on Nitrogen and Phosphorus Export Regimes across Chinese Catchments // Water Research. 2026. Vol. 307. Art. 126674. DOI: 10.1016/j.watres.2026.126674.

References

1. Yasinskii S. V., Kashutina E. A., Sidorova M. V. Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ob"ektov ravninnykh territorii: problemy otsenki // Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. 2023. T. 87. № 1. S. 115–130. DOI: 10.31857/S258755662301017X.

2. Sun H., Tian Y., Li L., Zhuang Y., Zhou X., Zhang H., Zhan W., Zuo W., Luan C., Huang K. Unraveling Spatial Patterns and Source Attribution of Nutrient Transport: Towards Optimal Best Management Practices in Complex River Basin // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 906. Art. 167686. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167686.

3. Polyanin V. O., Fashchevskaya T. B., Slovyagina A. N. Osobennosti formirovaniya i regulirovaniya diffuznogo zagryazneniya v predelakh gorodskikh territorii (na primere r. Yauzy) // Vodnye resursy. 2023. T. 50. № 1. S. 53–67. DOI: 10.31857/S0321059623010121.

4. Wallington K., Cai X. Updating SWAT+ to Clarify Understanding of In-Stream Phosphorus Retention and Remobilization: SWAT+P.R&R // Water Resources Research. 2023. Vol. 59. No. 3. Art. e2022WR033283. DOI: 10.1029/2022WR033283.

5. Dolgov S. V., Koronkevich N. I., Alent'ev Yu. Yu. Transgranichnyi vodoobmen v basseine Dona // Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. 2023. T. 87. № 2. S. 250–

263. DOI: 10.31857/S2587556623020048.

6. Salim Aoubid H., Opp C. Nitrogen and Phosphorus Discharge Loads Assessment Using the SWAT Model: A Case Study of the Shatt Al-Arab River Basin // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. No. 14. Art. 8376. DOI: 10.3390/app13148376.

7. Yasinskii S. V., Kondrat'ev S. A., Shmakova M. V., Kashutina E. A., Rasulova A. M. Assessment of Nutrient Load on the Cheboksary Reservoir Using the Results of Modeling Runoff and Removal of Biogenic Elements from the Pilot Catchments // Limnology and Freshwater Biology. 2024. № 3. P. 130–141. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-3-130.

8. Ji K., Li W., Hao X., Ouyang W., Zhang Y. Transport Dynamics of Watershed Discharged Diffuse Phosphorus Pollution Load to the Lake in Middle of Yangtze River Basin // Environmental Pollution. 2024. Vol. 344. Art. 123221. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.123221.

9. Kondrat'ev S. A., Bryukhanov A. Yu., Shmakova M. V., Rasulova A. M., Galakhina N. E., Zobkov M. B., Vasil'ev E. V., Oblomkova N. S. Otsenka vozmozhnykh izmenenii biogennoi nagruzki na Onezhskoe ozero pod vozdeistviem antropogennykh i klimaticheskikh faktorov // Vodnye resursy. 2024. T. 51. № 3. S. 285–296. DOI: 10.31857/S0321059624030056.

10. Galakhina N. E., Sabylina A. V., Zobkov M. B. Sovremennaya rechnaya biogennaya nagruzka na Onezhskoe ozero // Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva. 2024. T. 156. № 4. S. 293–310. DOI: 10.31857/S0869607124040052.

11. Hu Y., Chen M., Pu J., Chen S., Li Y., Zhang H. Enhancing Phosphorus Source Apportionment in Watersheds through Species-Specific Analysis // Water Research. 2024. Vol. 253. Art. 121262. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121262.

12. Dzhabborov N. I., Savel'ev A. P., Dobrikov A. V., Zakharov A. M., Zhuikov I. I. Modelirovanie i prognozirovanie vynosa biogennykh elementov s sel'skokhozyaistvennykh ugodii v zavisimosti ot agrofizicheskikh svoistv pochvy // Inzhenernye tekhnologii i sistemy. 2024. T. 34. № 1. S. 101–114. DOI: 10.15507/2658-4123.034.202401.101-114.

13. Minakova E. A., Shlychkov A. P., Kondrat'ev S. A., Latypova V. Z., Minakova D. A. Kolichestvennaya otsenka diffuznoi biogennoi nagruzki, obuslovlennoi vozdeistviem sel'skogo khozyaistva, na vodosborakh Kuibyshevskogo i Nizhnekamskogo vodokhranilishch v granitsakh Respubliki Tatarstan // Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN. 2025. № 6. S. 57–69. DOI: 10.17076/lim2069.
14. Wu J., He S., Lu J. Multi-Scale Effects of Topography and Landscape Pattern on Riverine Nitrogen and Phosphorus Nutrients in an Agricultural Watershed // Landscape Ecology. 2025. Vol. 40. Art. 112. DOI: 10.1007/s10980-025-02131-y.
15. Chen G., Liu L., Wang W., Wang R., Li Y., Tang X., Li X. Effectiveness of Best Management Practices for Non-Point Source Pollution in Intensively Managed Agricultural Watersheds // Journal of Cleaner Production. 2025. Vol. 495. Art. 145076. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.145076.
16. Li S., Xia B., Shen W., Lin Z., Huo K., Wei J. et al. Phosphorus Retention and Delivery Estimation Across a Large River Basin: Assessing the Impact of Landscape Patterns // Water Resources Research. 2025. Vol. 61. Art. e2024WR039347. DOI: 10.1029/2024WR039347.
17. Yang X., Han H., Yan X., Xie Y., Ren Y., Zhang Y., Yang D., She D., Huang X., Xia Y. Divergent Controls on Nitrogen and Phosphorus Export Regimes across Chinese Catchments // Water Research. 2026. Vol. 307. Art. 126674. DOI: 10.1016/j.watres.2026.126674.

Статья поступила в редакцию 21.07.2026; одобрена после рецензирования 25.08.2026; принята к публикации 12.10.2026.

The article was submitted 21.07.2026; approved after peer review 25.08.2026; accepted for publication 12.10.2026.

Научная статья

УДК 551.524.3:504.3.054

ВЛИЯНИЕ КОТЛОВИННОГО РЕЛЬЕФА И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИНВЕРСИЙ НА НАКОПЛЕНИЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ КРАСНОЯРСКА

Седых Владислав Александрович, кандидат географических наук, Воронежский государственный университет, Россия, Липецк, stonebridge@rambler.ru

Аннотация. В городах, расположенных в долинно-котловинных формах рельефа, качество атмосферного воздуха особенно чувствительно к вертикальной устойчивости нижней тропосферы. Для Красноярска данная особенность приобретает выраженное геоэкологическое значение в холодный период года, когда интенсивность антропогенных выбросов сочетается с продолжительными слабоветренными ситуациями и температурными инверсиями, ограничивающими вертикальный воздухообмен. Цель работы состояла в выявлении топоклиматических сочетаний, при которых формируется устойчивое накопление мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$, а также в разработке типологии метеорологических ситуаций по степени геоэкологического риска. Материалом послужили опубликованные в 2024–2026 гг. результаты инструментальных наблюдений за атмосферой Красноярска, включая измерения $PM_{2.5}$, приземной температуры, влажности, давления, скорости и направления ветра, данные температурного профилемера МТП-5 и сведения о пространственной репрезентативности городской сети мониторинга. При интерпретации принципиально разграничены температура земной поверхности Land Surface Temperature, температура приземного воздуха, поверхностный городской остров тепла и собственно температурная инверсия. Установлено, что высокий риск продолжительного накопления $PM_{2.5}$ определяется не наличием городской тепловой аномалии как таковой, а сочетанием слабого ветра с низко

расположенным инверсионным слоем, устойчивой стратификацией и сокращением эффективного объема атмосферы, доступного для рассеивания примесей. Для Красноярска особенно неблагоприятны ситуации с ветром менее 2 м/с и приземными либо низкими инверсиями, нижняя граница которых находится в пределах первых 100–150 м. Сильная приподнятая инверсия сама по себе не всегда сопровождается максимальными концентрациями аэрозоля, что исключает возможность использования единственного температурного критерия для оценки загрязнения. Предложена геоэкологическая типология атмосферных состояний, учитывающая положение и интенсивность инверсии, ветровой режим и морфологическую позицию участка в пределах городской территории. Полученные обобщения предназначены для совершенствования мониторинга атмосферного воздуха и учета топоклиматических ограничений при территориальном планировании Красноярска.

Ключевые слова: Красноярск; $PM_{2.5}$; температурная инверсия; котловинный рельеф; атмосферная стратификация; загрязнение воздуха.

Original article

TOPOCLIMATIC CONDITIONS OF SPATIOTEMPORAL $PM_{2.5}$ ACCUMULATION IN THE URBAN ENVIRONMENT OF KRASNOYARSK: THE ROLE OF BASIN TOPOGRAPHY AND TEMPERATURE INVERSIONS

Sedykh Vladislav Aleksandrovich, Candidate of Geographical Sciences, Voronezh State University, Lipetsk, Russia, stonebridge@rambler.ru

Annotation. Urban areas situated within valley and basin landforms are especially sensitive to changes in the thermal stability of the lower atmosphere. This feature is environmentally significant for Krasnoyarsk during the cold season, when anthropogenic emissions coincide with persistent low-wind conditions and temperature inversions that suppress vertical mixing. The study aims to identify combinations of

topographic and meteorological factors associated with sustained $PM_{2.5}$ accumulation and to develop a typology of atmospheric situations according to their geoenvironmental risk. The analysis draws on studies published in 2024–2026 that report instrumental observations in Krasnoyarsk, including $PM_{2.5}$ measurements, near-surface temperature, humidity, pressure, wind speed and direction, vertical temperature profiles obtained with an MTP-5 profiler, and assessments of the spatial representativeness of urban air-quality monitoring sites. Land Surface Temperature, near-surface air temperature, the Surface Urban Heat Island and atmospheric temperature inversions are treated as physically distinct variables. The evidence indicates that prolonged $PM_{2.5}$ accumulation is controlled primarily by the joint occurrence of weak winds, low-level temperature inversions, stable stratification and a reduced atmospheric mixing volume, rather than by the urban thermal anomaly itself. Particularly unfavorable conditions in Krasnoyarsk are associated with wind speeds below 2 m s^{-1} and surface-based or low-level inversions located within approximately the lowest 100–150 m of the atmosphere. Strong elevated inversions do not invariably produce the highest aerosol concentrations; consequently, inversion intensity cannot be used as an isolated indicator of pollution hazard. A typology of urban atmospheric states is proposed based on inversion geometry and strength, wind conditions and topographic position within the city. The results provide a basis for refining urban air-quality monitoring and for incorporating topoclimatic constraints into spatial planning in Krasnoyarsk.

Keywords: Krasnoyarsk; PM2.5; temperature inversion; basin topography; atmospheric stratification; air pollution.

Введение. Загрязнение атмосферного воздуха в крупном промышленном городе определяется не только объемом и составом поступающих в атмосферу выбросов. Не менее существенное значение имеет способность нижней тропосферы переносить и рассеивать примеси. При одинаковой эмиссионной нагрузке концентрация аэрозоля у земной поверхности может различаться в

несколько раз в зависимости от скорости ветра, глубины перемешанного слоя и вертикального распределения температуры. Для городов, занимающих долины и межгорные понижения, данная зависимость выражена сильнее, поскольку рельеф ограничивает горизонтальный воздухообмен и создает условия для накопления холодного воздуха в пониженных частях территории. Современные исследования городских котловин показывают, что ночные холодные воздушные бассейны способны формировать устойчивую инверсионную структуру мощностью порядка первых сотен метров, внутри которой резко ослабевают турбулентность и перенос примеси за пределы приземного слоя [4].

Для Красноярска проблема имеет дополнительную специфику. Городская территория вытянута вдоль долины Енисея, а сочетание долинно-террасного рельефа с суровым зимним климатом создает пространственно неодинаковые условия проветриваемости. В холодное время года низкие температуры поддерживают устойчивую стратификацию, отопительный сезон сопровождается повышенной нагрузкой на атмосферу, а продолжительные периоды слабого ветра уменьшают скорость удаления примесей из приземного слоя. Инструментальные наблюдения, выполненные в Красноярске в зимние сезоны 2022–2024 гг., уже позволили сопоставить содержание $PM_{2.5}$ с вертикальными температурными профилями и разделить инверсионные эпизоды по их строению. Автор установил статистически выраженную зависимость аэрозольного загрязнения от характера и интенсивности температурной стратификации, причем продолжительные эпизоды связаны прежде всего с теми состояниями атмосферы, при которых инверсия непосредственно ограничивает нижний слой воздуха над городом [1].

Связь между формированием острова тепла и рассеиванием загрязняющих веществ требует терминологического уточнения. Температура земной поверхности, определяемая по тепловым каналам спутника, не является температурой приземного воздуха. Разность Land Surface Temperature между урбанизированным и фоновым участками характеризует поверхностный

городской остров тепла, тогда как атмосферный городской остров тепла относится к температуре воздушной среды. Температурная инверсия представляет третье явление: она описывает вертикальный градиент температуры, при котором воздух на некоторой высоте оказывается теплее нижележащего слоя. Эти характеристики могут взаимодействовать, но взаимозаменяемыми индикаторами они не являются. Современные сопоставления спутниковых продуктов LST показывают, что величина рассчитанного поверхностного теплового острова зависит даже от типа сенсора, времени съемки и алгоритма восстановления температуры поверхности [8]. Для перехода от LST к температуре воздуха необходимы наземные измерения или специально обученные модели, причем ошибка преобразования остается ненулевой даже при качественной калибровке [14].

Отсюда следует принципиальное для геоэкологической интерпретации положение. Высокая температура городской поверхности не должна заранее рассматриваться как фактор усиления загрязнения. В одних ситуациях термическая неоднородность поддерживает локальную конвекцию и способствует перемешиванию; в других господствующая над городом устойчивая стратификация блокирует этот процесс. Поэтому причинная цепочка должна начинаться не с предполагаемого воздействия «острова тепла», а с фактически наблюдаемой вертикальной структуры атмосферы. Такой подход согласуется и с современными исследованиями аэрозольного загрязнения в городских котловинах, где максимальное содержание $PM_{2.5}$ наблюдается внутри устойчивого холодного слоя при слабой турбулентности и низкой высоте атмосферного перемешивания [2].

Объект настоящего исследования — приземная атмосфера урбанизированной территории Красноярска в зимних метеорологических условиях. Предметом выступает изменение условий накопления $PM_{2.5}$ под влиянием вертикальной температурной стратификации, слабого ветра и морфологии городской территории. Цель работы состоит в выделении сочетаний

топоклиматических признаков, наиболее благоприятствующих формированию продолжительных эпизодов загрязнения, и разработке на их основе геоэкологической типологии, пригодной для интерпретации мониторинговых данных и решения задач территориального планирования.

Исследование сочетает анализ физических характеристик атмосферы, оценку изменений качества атмосферного воздуха под техногенным воздействием и геоинформационное моделирование геоэкологических процессов. Действующий паспорт специальности непосредственно относит к ее проблематике моделирование геоэкологических процессов, современное геоэкологическое картографирование и применение ГИС-технологий.

Обзор литературы. В исследованиях последних лет все отчетливее прослеживается переход от упрощенной трактовки инверсии как бинарного признака «есть/нет» к анализу ее вертикальной геометрии. Для оценки условий рассеивания необходимо знать, где начинается инверсионный слой, какова его мощность, насколько велика разность температур между нижней и верхней границами и как долго сохраняется такое состояние. Cordeiro на материале топографической котловины в районе Коимбры сочетал наземные наблюдения с вертикальными измерениями и показал, что в ночные часы внутри понижения формируется холодный воздушный бассейн мощностью порядка 100–120 м. Над ним располагается инверсионный слой, а скорость ветра в центральной части понижения приближается к нулю [4]. В подобной конфигурации даже сравнительно небольшая территория оказывается частично изолированной от вышележащего перемешанного воздуха.

Физическая роль котловины хорошо просматривается и на примере более крупного урбанизированного бассейна, рассмотренного M. Zhang и соавторами. Во время эпизодов формирования холодного воздушного бассейна аэрозоль концентрировался преимущественно в нижних нескольких сотнях метров, тогда как ослабление ветрового сдвига и турбулентного обмена замедляло вынос частиц. Авторы также обращают внимание на обратную связь: повышенная

аэрозольная нагрузка изменяет радиационный баланс и способна дополнительно влиять на состояние пограничного слоя [2]. Для геоэкологии городской атмосферы существенен именно этот нелинейный характер процесса. Метеорологические условия воздействуют на загрязнение, однако уже накопившийся аэрозоль может менять энергетический режим нижнего слоя атмосферы.

Исследования зимнего загрязнения в альпийских долинах дополняют данную картину анализом источников. M. Masiol с соавторами показали, что относительная роль различных компонентов $PM_{2.5}$ может быть корректно оценена лишь при учете инверсионной динамики и способности атмосферы к рассеиванию [6]. Накопление аэрозоля в долине не означает, что инверсия является его источником: она лишь меняет объем воздуха, в котором распределяются продукты эмиссии. Это разграничение особенно важно применительно к Красноярску. Совпадение эпизода загрязнения с отопительным периодом само по себе не позволяет количественно разделить вклад теплоэнергетики, индивидуального отопления, автотранспорта и других источников. Для такой задачи необходимы либо детализированные данные инвентаризации выбросов с достаточным пространственно-временным разрешением, либо расчеты переноса примесей.

Вертикальное положение аэрозольного слоя относительно инверсии имеет самостоятельное диагностическое значение. Z. Zhu и соавторы, сопоставляя температурные инверсии с вертикальным распределением аэрозоля, установили, что зимой наиболее выраженное накопление частиц наблюдается ниже инверсионной границы, причем интенсивность температурного скачка заметно влияет на эффективность «запирания» аэрозоля [10]. Результат нельзя механически переносить на любой город, поскольку региональная циркуляция и рельеф меняют структуру пограничного слоя, но он подтверждает необходимость вертикальных измерений. Одна приземная температура не содержит информации о том, что происходит на высоте 50, 100 или 300 м, а

именно эта часть профиля определяет, открыт ли приземный воздух для турбулентного обмена.

В опубликованной в 2026 г. работе по крупнейшей аридной городской агломерации, расположенной в бассейне, Q. Liang и соавторы дополнительно показали роль синоптической обстановки. При застойной циркуляции формировались устойчивый холодный воздушный бассейн, сильная инверсия и мелкий пограничный слой; вторжение холодного воздуха и усиление северо-западного потока, напротив, разрушали устойчивую структуру и улучшали вентиляцию [12]. Здесь важен механизм: котловинная форма задает потенциальную предрасположенность к застою, однако реальный уровень риска определяет конкретная циркуляционная ситуация.

Российская источниковая база последних лет позволяет существенно конкретизировать эти общие закономерности применительно к Красноярску. Н. Я. Шапарев, А. В. Токарев и О. Э. Якубайлик исследовали зимние температурные инверсии на основе городских метеорологических наблюдений, измерений $PM_{2.5}$ и данных профилемера МТП-5. Авторы различили радиационные и адвективные режимы, показав, что инверсионные состояния могут сохраняться как несколько часов, так и несколько суток. Наиболее значимым результатом является не сам факт частого появления инверсий, а различия в их экологических последствиях: концентрация $PM_{2.5}$ зависит от категории, вертикального положения и интенсивности инверсионного слоя [1].

Работа М. И. Малимонова, В. В. Заворуева, Т. В. Якубайлик и О. Э. Якубайлика расширяет этот вывод. По данным трехлетнего периода 2022–2024 гг. наиболее высокие уровни $PM_{2.5}$ были характерны прежде всего для приземных инверсий в пределах нижних приблизительно 150 м при скорости ветра менее 2 м/с. При этом сильная приподнятая инверсия не во всех случаях приводила к превышению концентраций аэрозоля. В зимнее время инверсионное состояние атмосферы регистрировалось более половины времени наблюдений, а эпизоды с большой температурной разностью не являлись редкими

исключениями [7]. Тем самым для Красноярска уже имеется эмпирическое основание отказаться от простейшей схемы, при которой любая интенсивная инверсия автоматически считается синонимом высокого загрязнения.

Отдельная методическая проблема связана с качеством измерений $PM_{2.5}$. Е. Д. Карепова и В. С. Петракова сопоставили данные городской сети оптических датчиков CityAir с референсными измерениями E-BAM и показали, что необработанные показания требуют статистической корректировки, зависящей в том числе от метеорологических условий и сезона [3]. Для анализа коротких зимних эпизодов этот вывод принципиален. Если ошибка сенсора закономерно меняется с влажностью или температурой, часть наблюдаемой связи между концентрацией аэрозоля и погодными условиями может быть обусловлена особенностями измерений. Следовательно, до экологической интерпретации необходимо отделять реальную динамику концентрации от особенностей прибора.

Еще один локальный фактор обнаруживается при рассмотрении Енисея. О. Е. Yakubailik, V. V. Zavoruev и Т. V. Yakubailik сопоставили вертикальные температурные профили над урбанизированной частью города и участком, связанным с речной долиной. В зимний период знак температурных различий между участками менялся с высотой: в нижних десятках метров термическое влияние незамерзающего Енисея проявлялось иначе, чем выше 100 м, а зона перехода могла распространяться до высот порядка 200 м [9]. Для пространственной интерпретации загрязнения это означает, что речной коридор нельзя механически считать ни постоянной «зоной вентиляции», ни постоянным источником локального прогрева. Его воздействие зависит от высоты, времени суток и общей стратификации атмосферы.

Наконец, репрезентативность мониторинговой сети зависит от местной проветриваемости. С. В. Михайлюта и А. А. Леженин рассмотрели условия размещения постов контроля атмосферного загрязнения Красноярска и показали необходимость учитывать ветровой режим конкретного пункта наблюдений [5].

Пост, расположенный в локально экранированном участке, характеризует не только общегородскую атмосферную ситуацию, но и окружающую его застройку и рельеф. Сопоставление станций без учета этого фактора может привести к ошибочному распространению локальных характеристик отдельного участка на всю городскую территорию.

Совокупность современных публикаций позволяет сформулировать исследовательский пробел более точно. В Красноярске уже измеряются $PM_{2.5}$, метеорологические параметры и вертикальная температура; разработаны процедуры корректировки оптических сенсоров; исследуются проветриваемость постов и особенности профиля над Енисеем. Тем не менее эти блоки нередко рассматриваются раздельно. Для геоэкологической задачи требуется свести их в единую интерпретационную схему, в которой рельеф задает пространственные предпосылки, вертикальная стратификация характеризует текущее состояние атмосферы, ветер определяет интенсивность горизонтального обмена, а концентрация $PM_{2.5}$ рассматривается как результат совместного действия эмиссии и условий рассеивания. Именно такая схема положена в основу настоящего исследования.

Методы исследования. Работа выполнена в формате ретроспективного сравнительного анализа опубликованных материалов об атмосферном загрязнении Красноярска и топоклиматических условиях накопления $PM_{2.5}$. Основную локальную группу составляют исследования, содержащие сведения об инструментальных измерениях концентраций мелкодисперсных частиц, температурных профилях атмосферы и характеристиках ветрового режима за зимние сезоны 2022–2024 гг. Для методического сопоставления используются также публикации 2024–2026 гг., посвящённые формированию холодных воздушных бассейнов и влиянию температурных инверсий на аэрозольное загрязнение. В сравнительный анализ включаются источники, позволяющие установить территорию наблюдения, измеряемую величину, временной масштаб и применяемый метод [1, 7].

В качестве основного индикатора состояния атмосферного воздуха выбрана концентрация $PM_{2.5}$. Данный выбор позволяет работать с высокочастотными рядами и сопоставлять их с быстро меняющимися метеорологическими условиями. Бенз(а)пирен не используется в качестве центральной переменной. Его включение оправдано лишь при наличии сопоставимого по частоте и длительности ряда измерений, тогда как основная исследовательская задача требует синхронного анализа на часовом либо суточном шаге. Такой отказ от расширения перечня загрязнителей снижает риск ложного объединения показателей, имеющих различную периодичность контроля.

При рассмотрении данных оптических датчиков учитывается их метрологическая неоднородность. Результаты CityAir интерпретируются только с учетом разработанной для Красноярска процедуры приведения к референсным измерениям Е-ВАМ. Исследование Е. Д. Кареповой и В. С. Петраковой выполнено на материале девяти автоматических постов региональной системы и двадцати одной станции CityAir и показало систематические различия между типами измерителей [3]. Следовательно, необработанный ряд оптического сенсора нельзя непосредственно объединять с референсным рядом и использовать для установления метеорологических зависимостей.

Наземный метеорологический блок включает температуру воздуха, относительную влажность, атмосферное давление, скорость и направление ветра. Особое внимание уделяется ветру, поскольку вертикальная устойчивость без слабого горизонтального обмена не обязательно приводит к продолжительному накоплению частиц. В исследованиях Красноярска скорость около 2 м/с выступает практически значимой границей, ниже которой загрязнение при низких инверсиях заметно усиливается [7]. Эта величина используется как локально установленный ориентир.

Данные LST отведены в отдельный аналитический блок. Их функция заключается в описании неоднородности нагрева и охлаждения поверхности.

Рельеф в аналитической схеме рассматривается как постоянная географическая предпосылка формирования слабопроветриваемых участков. Для пространственного анализа существенны абсолютная и относительная высота, положение относительно днища долины, степень топографической замкнутости, ориентация склонов и открытость участка по отношению к преобладающему направлению ветра. Эти параметры целесообразно получать из цифровой модели рельефа и сопоставлять с характеристиками локальной ветровой обстановки.

Таблица 1 — Состав информационных блоков и их роль в геоэкологическом анализе

Информационный блок	Основные показатели	Аналитическая функция	Принципиальное ограничение
Качество воздуха	$PM_{2.5}$, часовые и суточные значения	Характеристика интенсивности и длительности эпизода загрязнения	Оптические датчики требуют локальной корректировки
Приземная метеорология	температура воздуха, влажность, давление, скорость и направление ветра	Оценка условий горизонтального обмена и фоновой метеорологической ситуации	Одна наземная станция не характеризует вертикальную стратификацию
Вертикальный температурный профиль	(z_b), (z_t), (H_{inv}), (\Delta T_{inv})	Выделение приземных и приподнятых инверсий, оценка их геометрии	Требуется непрерывность профилеметрических наблюдений
Рельеф	высота, относительное положение, экспозиция, топографическая открытость	Выделение потенциально слабопроветриваемых морфологических позиций	DEM не позволяет самостоятельно диагностировать застой воздуха
Спутниковая термометрия	LST, SUHI	Характеристика пространственной тепловой неоднородности поверхности	LST не является температурой приземного воздуха
Характеристика пунктов мониторинга	положение в рельефе и застройке, локальная проветриваемость	Оценка пространственной репрезентативности измерений	Локальный микроклимат может искажать общегородскую интерпретацию

Источник: составлено автором на основе [1–5, 7–10, 14].

Синхронизация данных имеет ключевое значение. Среднемноголетняя карта LST не должна сопоставляться с отдельно взятым часовым эпизодом $PM_{2.5}$, а месячная температура не может заменять фактический профиль атмосферы в момент загрязнения. Корректная единица анализа — конкретный эпизод, для которого одновременно известны концентрация аэрозоля, приземные метеорологические условия и вертикальная температурная структура. Более длительные показатели используются лишь после агрегирования сопоставимых эпизодов.

Источник загрязнения в настоящей работе специально не определяется по одному временному совпадению. Сезонное увеличение концентрации в период отопления еще не доказывает долю ТЭЦ, частного сектора или транспорта. Такая задача требует отдельного эмиссионного массива. Настоящее исследование отвечает на иной вопрос: при каких состояниях городской атмосферы условия для удаления уже поступивших примесей из приземного слоя наиболее неблагоприятны.

Результаты исследования и их обсуждение. Сопоставление работ по Красноярску с результатами исследований других топографических бассейнов показывает, что геоэкологически неблагоприятная ситуация возникает не вследствие одного признака, а при совпадении нескольких условий. Первым служит устойчивая вертикальная стратификация в нижней части атмосферы. Вторым — слабый горизонтальный перенос. Третьим выступает морфологическое положение городской территории, способствующее удержанию холодного воздуха. Если один из этих элементов исчезает, вероятность длительного эпизода загрязнения уменьшается.

Для аналитической типологии неблагоприятных условий накопления $PM_{2.5}$ используются три группы характеристик: положение нижней границы устойчивого слоя атмосферы, скорость приземного ветра и наличие топографических предпосылок ослабленного воздухообмена. В рассмотренных локальных исследованиях наиболее неблагоприятные ситуации связываются с

низкими инверсиями, затрагивающими нижние приблизительно 100–150 м атмосферы, и скоростью ветра менее 2 м/с [1, 7]. С геоэкологической точки зрения уменьшается объем воздуха, доступный для рассеивания примесей: выбросы продолжают поступать, однако их разбавление происходит в меньшей массе воздуха.

Особенно существен вывод о различии приземных и приподнятых инверсий. Сильная температурная разность на высоте не обязательно означает столь же сильное загрязнение возле поверхности. Если под инверсионным слоем сохраняется достаточно глубокая зона перемешивания или усиливается горизонтальный перенос, аэрозоль распределяется в большем объеме. Напротив, сравнительно менее интенсивная, но очень низкая инверсия способна оказаться экологически более неблагоприятной.

Данные Института вычислительного моделирования СО РАН дополняют эту зависимость более конкретными метеорологическими сочетаниями. При низко расположенных инверсиях и температурном перепаде свыше нескольких градусов увеличение $PM_{2.5}$ особенно заметно в морозную погоду и при малой скорости ветра. Вместе с тем выраженная приподнятая инверсия может сохраняться без столь же высокого приземного содержания частиц. Такое расхождение имеет принципиальный смысл: одно и то же слово «инверсия» описывает существенно различные по геоэкологическим последствиям состояния атмосферы.

Механизм можно представить на поперечном профиле котловинной части города.

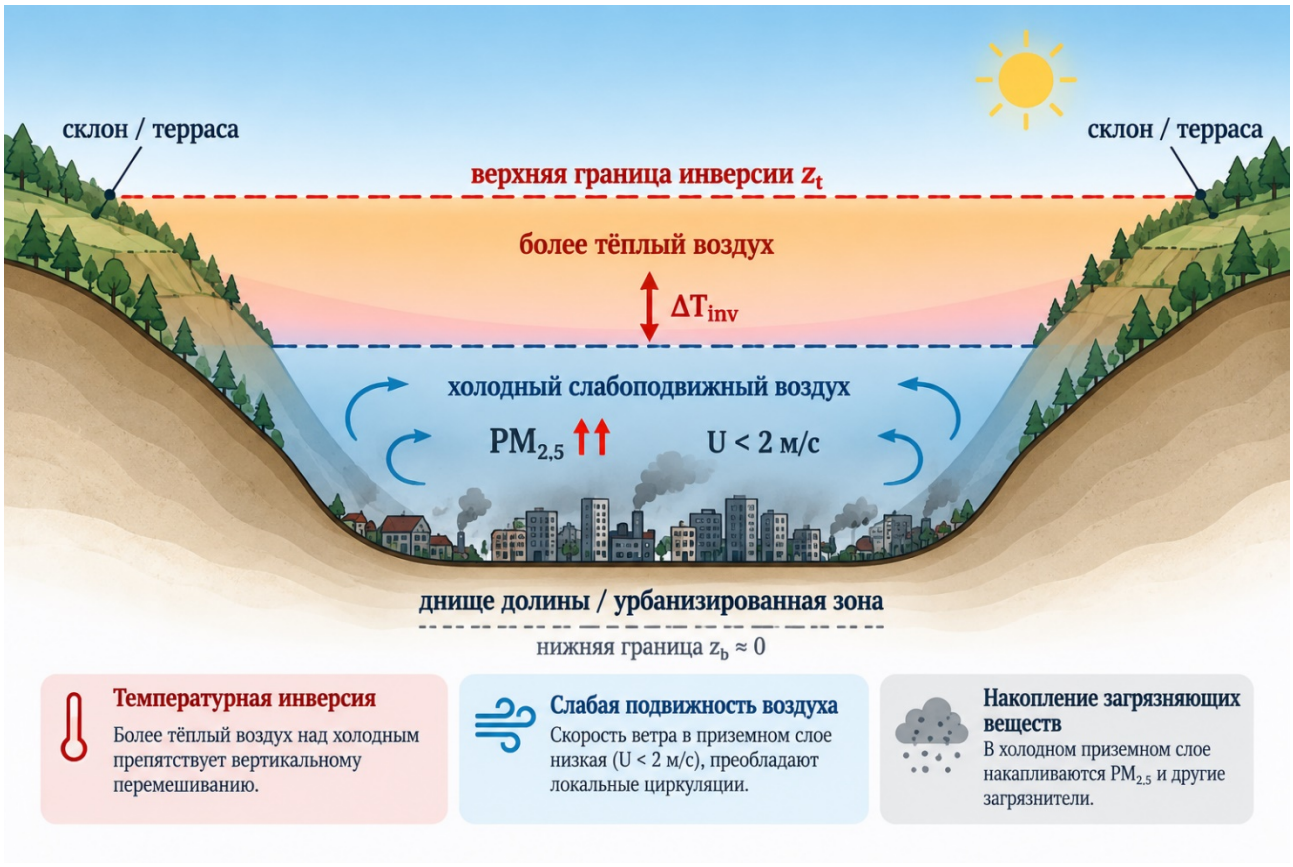


Рисунок 1 — Схема формирования слоя накопления $PM_{2.5}$ при низкой температурной инверсии (источник: составлено автором по [1, 2, 4, 7])

Именно положение нижней границы меняет экологический смысл инверсии. Когда z_b близка к поверхности, загрязняющие примеси оказываются внутри холодного воздушного бассейна. Слабый ветер не обеспечивает достаточного горизонтального переноса, а устойчивый температурный профиль подавляет вертикальное движение. При разрушении инверсии или усилении ветра система переходит в иное состояние: доступный для перемешивания объем возрастает, и при неизменной эмиссии концентрация у поверхности начинает снижаться. Сходная последовательность установлена и в зарубежных бассейновых городах, где изменение синоптического режима может за короткое время привести к переходу от устойчивого накопления загрязнений к их рассеиванию [12].

Влияние котловинного рельефа при этом нельзя сводить к образному представлению о городе как о «чаше». Реальный городской рельеф неоднороден. Днище долины, нижние террасы, локальные понижения, речной коридор, склоны

и более высокие участки различаются по доступности ветрового переноса. Плотная застройка дополнительно меняет шероховатость поверхности. Поэтому концентрационное поле $PM_{2.5}$ даже во время единого общегородского инверсионного эпизода должно оставаться пространственно неоднородным.

Положение мониторингового поста в такой системе становится частью интерпретации, а не технической деталью. С. В. Михайлюта и А. А. Леженин показали, что пункты наблюдений Красноярска характеризуются различающимися условиями проветриваемости [5]. Если станция расположена в пространстве, где локальная застройка или форма рельефа ослабляет ветер, зафиксированная концентрация может превышать значения на открытом участке при той же фоновой стратификации. Обратная ситуация возможна возле хорошо продуваемого коридора.

Енисей вносит дополнительную неоднородность. Незамерзающая водная поверхность существенно отличается от окружающей суши по тепловому режиму. Измерения вертикальной температуры показали, что зимой различие между речным и урбанизированным участками меняет знак с высотой [9]. Следовательно, термическое воздействие реки не ограничивается тонким приземным слоем. В отдельных ситуациях оно может влиять на нижнюю часть температурного профиля и тем самым менять локальную устойчивость атмосферы. Для геоэкологического картирования это означает необходимость выделять речную долину самостоятельной топоклиматической единицей, а не включать ее в единую категорию с прилегающей застройкой.

Результаты, относящиеся к LST, требуют иной трактовки. Спутниковая сцена способна показать, какие поверхности охлаждены или прогреты сильнее, где сосредоточены техногенные тепловые аномалии и как меняется температура земной поверхности вдоль градиента «центр — периферия». Но из такой карты невозможно непосредственно определить высоту инверсии. Тем более нельзя заключить, что участок с более высокой LST обязательно имеет более загрязненный воздух. Сопоставление спутниковых продуктов, выполненное А.

Hurduc с соавторами, показывает существенную зависимость характеристик SUHI от используемого набора LST [8]. В работе A. Cecilia и соавторов температура воздуха восстанавливается из спутниковой LST лишь после обучения модели на наземных измерениях [14]. Эти результаты подтверждают необходимость рассматривать тепловой остров как дополнительный пространственный показатель, но не использовать его вместо вертикального профиля атмосферы.

Такое разграничение меняет постановку причинного вопроса. Вместо формулы «остров тепла усиливает загрязнение» следует проверять, как поверхность воздействует на конкретный эпизод стратификации. В ясную морозную ночь сильное охлаждение отдельных участков может поддерживать сток более холодного воздуха в понижения. Днем прогрев поверхности, напротив, способен ослабить устойчивость нижнего слоя. Техногенно прогретые участки также могут локально изменять тепловой баланс, но итог зависит от мощности вышележащей инверсии. Поэтому SUHI нельзя априори считать ни ухудшающим, ни улучшающим фактором качества воздуха.

Полученные зависимости позволяют предложить типологию атмосферных ситуаций, ориентированную не на одно измерение, а на совместный учет нескольких физически различающихся характеристик.

Таблица 2 — Типология зимних атмосферных состояний Красноярска по риску накопления $PM_{2.5}$

Тип ситуации	Вертикальная структура и ветер	Ожидаемое поведение $PM_{2.5}$	Геоэкологическая оценка
Вентилируемая	устойчивая низкая инверсия отсутствует либо быстро разрушается; ветер достаточен для горизонтального обмена	продолжительное удержание высоких концентраций маловероятно; локальные пики быстрее рассеиваются	низкий риск накопления
Переходная слабоустойчивая	формируется устойчивость нижнего слоя, но инверсия непродолжительна или сохраняется заметный горизонтальный перенос	возможен рост $PM_{2.5}$, однако эпизод ограничен по длительности	умеренный риск

Низкая приземная инверсия	нижняя граница у поверхности; инверсионный слой охватывает нижние ~100–150 м; ветер менее 2 м/с	выраженное накопление, медленное снижение концентрации, рост пространственных контрастов	высокий риск
Интенсивная низкая инверсия при длительном штиле	устойчивый холодный воздушный бассейн; слабый ветер сохраняется продолжительное время; температурный перепад значителен	возможно формирование наиболее тяжелых и длительных эпизодов загрязнения	критический риск
Приподнятая инверсия	инверсионный слой расположен выше приземного слоя; под ним сохраняется некоторый объем перемешивания	результат зависит от высоты нижней границы и ветра; высокая интенсивность инверсии не гарантирует пикового $PM_{2.5}$	переменный, от умеренного до высокого
Разрушение инверсии	усиление ветра, изменение синоптической ситуации, увеличение глубины перемешивания	концентрации снижаются по мере восстановления вертикального и горизонтального обмена	быстро уменьшающийся риск

Источник: составлено автором по [1, 2, 4, 7, 10, 12].

Предлагаемая типология отличается от бинарной классификации тем, что допускает одинаковую интенсивность температурной инверсии при разном экологическом результате. Например, приподнятый слой может оказаться менее опасным, чем слабее выраженная приземная инверсия. Тем самым основным параметром становится сочетание геометрии устойчивого слоя с характеристиками воздухообмена.

Наглядно различие между спутниковым и атмосферным блоками представлено на рисунке 2.

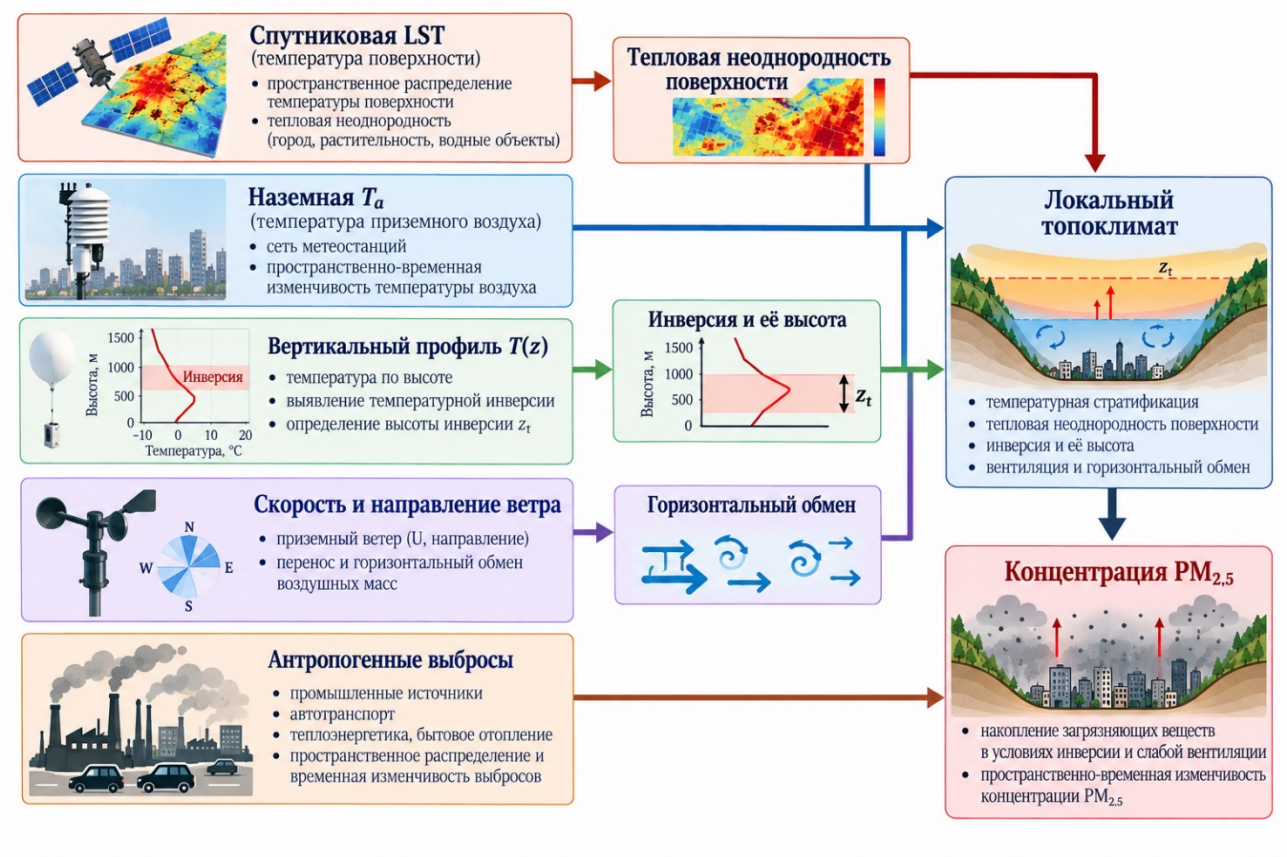


Рисунок 2 — Разделение каналов формирования тепловой неоднородности и загрязнения (источник: разработано автором)

Схема подчеркивает, почему спутниковая температура не должна располагаться в причинной цепочке на месте температуры воздуха. Она описывает одно из граничных условий теплообмена между поверхностью и атмосферой. Степень удержания загрязняющих веществ определяется профилем T(z), ветром и глубиной слоя, доступного для перемешивания.

Отдельного рассмотрения требует временной масштаб. Годовое среднее содержание $PM_{2.5}$ может оставаться относительно умеренным и при этом скрывать короткие, но экологически значимые зимние эпизоды. Региональные материалы по состоянию окружающей среды фиксируют устойчивую проблему загрязнения атмосферного воздуха Красноярска; при этом разные загрязнители и разные показатели нормативной оценки дают неодинаковую картину. Это еще раз показывает ограниченность годового среднего для исследования инверсионного механизма. Для настоящей задачи содержательнее длительность эпизода, максимальная часовая или суточная концентрация и скорость снижения

$PM_{2.5}$ после изменения метеорологических условий.

С практической точки зрения важен и вопрос качества высокочастотного мониторинга. Оптические датчики позволяют получить плотную пространственную сеть, что существенно для неоднородного городского рельефа. Но высокая плотность точек не компенсирует систематическую измерительную ошибку. Красноярская работа по сопоставлению CityAir и E-BAM показывает, что корректирующие коэффициенты должны учитывать сезон и метеорологическое состояние [3]. Поэтому пространственная карта $PM_{2.5}$ приобретает геоэкологический смысл лишь после приведения измерительных рядов к сопоставимой основе.

В рамках территориального планирования результаты не следует сводить к рекомендации «не строить в низинах». Морфология городской территории взаимодействует с направлением ветра, высотой источника выбросов, шероховатостью застройки и существующими транспортными потоками. Тем не менее участки, где рельеф и застройка систематически ослабляют обмен, объективно требуют более строгой оценки при размещении новых источников эмиссии. Такая оценка должна проводиться с учетом повторяемости зимних слабоветренных и инверсионных режимов.

Таблица 3 — Геоэкологическая интерпретация основных морфологических позиций городской территории

Морфологическая или функциональная позиция	Основная особенность	Возможный риск в инверсионный период	Приоритет мониторинга и планирования
Днище долины и локальные понижения	склонность к накоплению холодного воздуха	длительное удержание примесей при приземной инверсии	повышенная плотность наблюдений; учет инверсий при оценке новых источников
Плотно застроенные слабопроветриваемые участки	локальное снижение скорости ветра	усиление пространственного контраста $PM_{2.5}$	анализ микромасштабной вентиляции до интерпретации данных поста
Речной коридор Енисея	специфическое зимнее тепловое воздействие незамерзающей воды	эффект зависит от высоты и текущей стратификации	отдельное профилеметрическое наблюдение;

			недопустимость упрощенной трактовки как постоянного вентиляционного коридора
Склоны и верхние террасы	иная экспозиция к ветровому переносу и катабатическим потокам	локально меньшая склонность к накоплению, но высокая зависимость от направления переноса	размещение фоновых и сравнительных постов
Промышленные и транспортные узлы	высокая локальная эмиссионная нагрузка	особенно высокий риск при совпадении источника с низкой инверсией и слабым ветром	совместный учет эмиссии и топоклиматической ситуации
Переходные зоны между днищем и склонами	изменение шероховатости и рельефа на малом расстоянии	резкие пространственные градиенты концентраций	детализированное картирование, мобильные измерения

Источник: разработано автором на основе [1, 5, 7, 9].

Геоэкологический подход в данном случае состоит не в поиске единственного «главного» фактора загрязнения. Рельеф не производит $PM_{2.5}$, инверсия также не производит частицы, а эмиссионная нагрузка сама по себе не определяет концентрацию у конкретного поста. Наблюдаемое качество воздуха определяется сочетанием характеристик источников выбросов и состояния атмосферы, в которой происходит рассеивание примесей. Именно поэтому одинаковая интенсивность выбросов в соседние дни способна приводить к резко различающимся уровням загрязнения.

Сопоставление с зарубежными исследованиями позволяет оценить общность выявленного механизма, но не дает оснований переносить на Красноярск чужие количественные доли источников. В альпийской долине Masiol с соавторами получили конкретное распределение зимнего $PM_{2.5}$ между источниками [6]; в другой урбанизированной котловине Zhang с соавторами исследовали взаимодействие аэрозоля с пограничным слоем [2]. Для Красноярска эти публикации ценны как методические аналоги. Их численные результаты характеризуют другие эмиссионные системы и климатические

условия. Такая граница применимости необходима, поскольку внешне сходная морфология рельефа не делает города геоэкологически тождественными.

Полученная схема позволяет иначе интерпретировать понятие неблагоприятной метеорологической ситуации. Для задач оперативного мониторинга предупреждающим признаком должно быть приближение к комплексу условий: низкая нижняя граница устойчивого слоя, малая глубина эффективного перемешивания, слабый ветер и достаточная длительность режима. Если одновременно начинает расти $PM_{2.5}$ на нескольких приведенных к сопоставимому уровню станциях, вероятность формирования общегородского эпизода становится значительно выше, чем при одиночном превышении на локально экранированном посту.

Совмещение наблюдений за вертикальной температурной стратификацией, приземным ветром и концентрациями $PM_{2.5}$ может стать основой системы предварительного выявления неблагоприятных метеорологических условий. Однако переход от концептуальной типологии к оперативному прогнозу требует формирования синхронизированного массива наблюдений, выбора временного горизонта и независимой проверки частоты правильных и ложных предупреждений.

Выводы. Геоэкологическая специфика атмосферного загрязнения Красноярска определяется совместным действием антропогенной нагрузки и топоклиматических условий долинно-котловинной территории. Рельеф формирует пространственные предпосылки слабого воздухообмена, однако не объясняет конкретный эпизод повышенного $PM_{2.5}$. Для этого необходимо учитывать текущую вертикальную структуру атмосферы, скорость ветра и положение наблюдательного пункта.

Наиболее неблагоприятный режим связан с приземными и низко расположенными инверсиями, охватывающими нижние приблизительно 100–150 м, особенно если они сочетаются со скоростью ветра менее 2 м/с. В таких условиях загрязняющие вещества поступают в ограниченный объем

слабоподвижного воздуха, а процессы горизонтального и вертикального обмена одновременно ослабевают. Продолжительность состояния становится не менее важной, чем температурная разность внутри инверсии.

Сильная приподнятая инверсия не может рассматриваться как самостоятельный надежный предиктор высокого $PM_{2.5}$. Ее влияние определяется высотой нижней границы и состоянием расположенного ниже слоя. Этот результат требует отказаться от бинарного деления атмосферных ситуаций по признаку наличия инверсии и использовать параметры геометрии устойчивого слоя — его высоту, мощность и интенсивность.

Поверхностный городской остров тепла следует анализировать отдельно. Спутниковая LST характеризует термическое состояние земной поверхности, но не заменяет температуру воздуха и не дает прямой информации о вертикальном температурном профиле. Влияние городской тепловой неоднородности на загрязнение может менять знак в зависимости от времени суток и устойчивости вышележащих слоев. Поэтому связь между SUHI, инверсией и $PM_{2.5}$ должна устанавливаться эмпирически.

Енисей образует самостоятельный топоклиматический элемент городской территории. Современные вертикальные измерения фиксируют изменение характера температурных различий между речным и урбанизированным участками с высотой. Данное обстоятельство делает некорректным представление речного коридора как неизменно благоприятного либо неизменно неблагоприятного для рассеивания загрязнений; его функцию необходимо оценивать в рамках конкретного атмосферного эпизода.

Предложенная типология геоэкологического риска соединяет вертикальную стратификацию, ветровой режим и положение участка в рельефе. Она позволяет перейти от констатации повышенной концентрации к объяснению условий, при которых загрязнение сохраняется. Для территориального планирования такой подход означает необходимость учитывать повторяемость зимних инверсионных и слабоветренных режимов при оценке новых источников

эмиссии, а для мониторинга — различать общегородскую атмосферную ситуацию и локальный эффект микрорельефа и застройки.

Дальнейшее развитие исследования целесообразно связывать с синхронным анализом непрерывных рядов $PM_{2.5}$, вертикальных температурных профилей, высоты пограничного слоя и трехмерного ветрового поля. Следующим содержательным этапом может стать построение пространственно-временной модели риска, прогнозирующей вероятность превышения заданного уровня $PM_{2.5}$ на горизонте нескольких часов. Для разделения вклада отдельных источников потребуется иной массив данных — детализированный кадастр выбросов, химическая характеристика аэрозоля и модель атмосферного переноса.

Список литературы

1. Шапарев Н. Я., Токарев А. В., Якубайлик О. Э. Формирование зимних температурных инверсий в атмосфере г. Красноярска и их последствия // Оптика атмосферы и океана. 2026. Т. 39. № 6. С. 520–527. DOI: 10.15372/AOO20260609.
2. Zhang M., Tian P., Zhao Y. et al. Impact of aerosol-boundary layer interactions on PM2.5 pollution during cold air pool events in a semi-arid urban basin // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 922. Article 171225. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171225.
3. Карепова Е. Д., Петракова В. С. Статистически обоснованная корректировка показаний датчиков станций CityAir уровня концентрации взвешенных частиц PM2.5 в приземном слое атмосферы города // Информатика и автоматизация. 2024. Т. 23. № 2. С. 352–376. DOI: 10.15622/ia.23.2.2.
4. Cordeiro A. M. R. Formation and Dynamics of Night-Time Cold Air Pools in Peri-Urban Topographic Basins: A Case Study of Coimbra, Portugal // Meteorology. 2025. Vol. 4. Article 4. DOI: 10.3390/meteorology4010004.
5. Михайлюта С. В., Леженин А. А. Проветриваемость мест размещения постов мониторинга загрязнения атмосферного воздуха на территории г. Красноярска // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2025. С. 106–111. DOI: 10.33764/2618-981X-2025-4-

106-111.

6. Masiol M., Formenton G., Visin F. et al. Sources of wintertime PM2.5 at a major city in an Alpine Valley: The role of atmospheric dispersion and inversion dynamics // Atmospheric Environment. 2024. Vol. 330. Article 120556. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2024.120556.

7. Малимонов М. И., Заворуев В. В., Якубайлик Т. В., Якубайлик О. Э. Программно-технологическое обеспечение для мониторинга температурных инверсий и загрязнения атмосферы Красноярска // Южно-Сибирский научный вестник. 2025. Т. 64. Вып. 6. С. 179–184. DOI: 10.25699/SSSB.2025.64.6.029.

8. Hurduc A., Ermida S. L., DaCamara C. C. On the Suitability of Different Satellite Land Surface Temperature Products to Study Surface Urban Heat Islands // Remote Sensing. 2024. Vol. 16. No. 20. Article 3765. DOI: 10.3390/rs16203765.

9. Yakubailik O. E., Zavoruev V. V., Yakubailik T. V. Measurement and Analysis of Vertical Temperature Profiles of the Atmosphere over the Yenisei River and the Urbanized Area of Krasnoyarsk // Technical Physics. 2025. Vol. 70. No. 12. P. 634–639. DOI: 10.1134/S1063784225700549.

10. Zhu Z., Li H., Fan S., Xu W., Fang R., Liu B., Gong W. The covariability between temperature inversions and aerosol vertical distribution over China // Atmospheric Pollution Research. 2024. Vol. 15. No. 1. Article 101959. DOI: 10.1016/j.apr.2023.101959.

11. Министерство экологии Красноярского края. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2024 году». Красноярск, 2025.

12. Liang Q., Miao Y., Yan Y., Liu S. Winter PM2.5 pollution in China's largest arid urban agglomeration: Impacts of basin terrain and synoptic-scale circulations // Atmospheric Research. 2026. Vol. 332. Article 108728. DOI: 10.1016/j.atmosres.2025.108728.

13. ФИЦ КНЦ СО РАН. Система мониторинга состояния атмосферного воздуха в г. Красноярске: данные о концентрации $PM_{2.5}$ и метеорологических

параметрах. Электронный информационный ресурс. 2026.

14. Cecilia A., Casasanta G., Petenko I., Argentini S. A Machine Learning Algorithm to Convert Geostationary Satellite LST to Air Temperature Using In Situ Measurements: A Case Study in Rome and High-Resolution Spatio-Temporal UHI Analysis // Remote Sensing. 2025. Vol. 17. No. 3. Article 468. DOI: 10.3390/rs17030468.

References

1. Shaparev N. Ya., Tokarev A. V., Yakubajlik O. E`. Formirovanie zimnix temperaturny`x inversij v atmosfere g. Krasnoyarska i ix posledstviya // Optika atmosfery` i okeana. 2026. T. 39. № 6. S. 520–527. DOI: 10.15372/AOO20260609.

2. Zhang M., Tian P., Zhao Y. et al. Impact of aerosol-boundary layer interactions on PM2.5 pollution during cold air pool events in a semi-arid urban basin // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 922. Article 171225. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171225.

3. Karepova E. D., Petrakova V. S. Statisticheski obosnovannaya korrektirovka pokazanij datchikov stancij CityAir urovnya koncentracii vzveshenny`x chasticz PM2.5 v prizemnom sloe atmosfery` goroda // Informatika i avtomatizaciya. 2024. T. 23. № 2. S. 352–376. DOI: 10.15622/ia.23.2.2.

4. Cordeiro A. M. R. Formation and Dynamics of Night-Time Cold Air Pools in Peri-Urban Topographic Basins: A Case Study of Coimbra, Portugal // Meteorology. 2025. Vol. 4. Article 4. DOI: 10.3390/meteorology4010004.

5. Mixajlyuta S. V., Lezhenin A. A. Provetrivaemost` mest razmeshheniya postov monitoringa zagryazneniya atmosfernogo vozduxa na territorii g. Krasnoyarska // Intere`kspo GEO-Sibir`. 2025. S. 106–111. DOI: 10.33764/2618-981X-2025-4-106-111.

6. Masiol M., Formenton G., Visin F. et al. Sources of wintertime PM2.5 at a major city in an Alpine Valley: The role of atmospheric dispersion and inversion dynamics // Atmospheric Environment. 2024. Vol. 330. Article 120556. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2024.120556.

7. Malimonov M. I., Zavoruev V. V., Yakubajlik T. V., Yakubajlik O. E`. Programmno-texnologicheskoe obespechenie dlya monitoringa temperaturny`x inversij i zagryazneniya atmosfery` Krasnoyarska // Yuzhno-Sibirskij nauchny`j vestnik. 2025. T. 64. Vy`p. 6. S. 179–184. DOI: 10.25699/SSSB.2025.64.6.029.

8. Hurduc A., Ermida S. L., DaCamara C. C. On the Suitability of Different Satellite Land Surface Temperature Products to Study Surface Urban Heat Islands // Remote Sensing. 2024. Vol. 16. No. 20. Article 3765. DOI: 10.3390/rs16203765.

9. Yakubailik O. E., Zavoruev V. V., Yakubailik T. V. Measurement and Analysis of Vertical Temperature Profiles of the Atmosphere over the Yenisei River and the Urbanized Area of Krasnoyarsk // Technical Physics. 2025. Vol. 70. No. 12. P. 634–639. DOI: 10.1134/S1063784225700549.

10. Zhu Z., Li H., Fan S., Xu W., Fang R., Liu B., Gong W. The covariability between temperature inversions and aerosol vertical distribution over China // Atmospheric Pollution Research. 2024. Vol. 15. No. 1. Article 101959. DOI: 10.1016/j.apr.2023.101959.

11. Ministerstvo e`kologii Krasnoyarskogo kraya. Gosudarstvenny`j doklad «O sostoyanii i oxrane okruzhayushhej sredy` v Krasnoyarskom krae v 2024 godu». Krasnoyarsk, 2025.

12. Liang Q., Miao Y., Yan Y., Liu S. Winter PM2.5 pollution in China's largest arid urban agglomeration: Impacts of basin terrain and synoptic-scale circulations // Atmospheric Research. 2026. Vol. 332. Article 108728. DOI: 10.1016/j.atmosres.2025.108728.

13. FICz KNCz SO RAN. Sistema monitoringa sostoyaniya atmosfernogo vozduxa v g. Krasnoyarske: danny`e o koncentracii $PM_{2.5}$ i meteorologicheskix parametrax. E`lektronny`j informacionny`j resurs. 2026.

14. Cecilia A., Casasanta G., Petenko I., Argentini S. A Machine Learning Algorithm to Convert Geostationary Satellite LST to Air Temperature Using In Situ Measurements: A Case Study in Rome and High-Resolution Spatio-Temporal UHI Analysis // Remote Sensing. 2025. Vol. 17. No. 3. Article 468. DOI:

10.3390/rs17030468.

Статья поступила в редакцию 18.06.2026; одобрена после рецензирования 30.07.2026; принята к публикации 12.10.2026.

The article was submitted 18.06.2026; approved after peer review 30.07.2026; accepted for publication 12.10.2026.

Научная статья

УДК 502.45:379.85(571.53)

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕКРЕАЦИОННОЙ ДИГРЕССИИ ПРИБРЕЖНЫХ ЛАНДШАФТОВ ОСТРОВА ОЛЬХОН ПО ГРАДИЕНТУ ТУРИСТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Топчая Виктория Юрьевна, кандидат географических наук, научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия, Калининград, topchaia59@yandex.ru

Аннотация. Рост посещаемости особо охраняемых природных территорий Байкальского региона усиливает противоречие между рекреационным использованием природных комплексов и необходимостью сохранять их устойчивое состояние. Для острова Ольхон данная проблема имеет отчетливо выраженный пространственный характер: туристический поток концентрируется на ограниченном числе прибрежных участков, маршрутов и мест кратковременной остановки, тогда как экологическая устойчивость почвенно-растительного покрова существенно различается в зависимости от субстрата, увлажнения, рельефа и характера использования территории. Цель исследования состоит в разработке геоэкологического подхода к оценке рекреационной дигрессии прибрежных ландшафтов Ольхона, при котором фактически измеренная интенсивность посещения сопоставляется с количественным откликом почвы, растительности и тропной сети. Информационную основу составили опубликованные в 2024–2026 гг. материалы мониторинга Прибайкальского национального парка, исследования туристического потока на Ольхоне, работы по состоянию прибрежных почв Байкала, а также современные исследования рекреационной экологии, посвященные вытоптанности, уплотнению грунтов, деградации троп и управлению посетительской нагрузкой. Предлагается отказаться от представления о рекреационной емкости как об одной неизменной нормативной

величине. Экологически значимую величину рекреационной емкости следует определять по положению точки перелома в зависимости «нагрузка — отклик» и корректировать с учетом сезона, устойчивости конкретной ландшафтной фации и эффективности защитной инфраструктуры. Для полевого мониторинга обосновано совместное измерение посетительской нагрузки, плотности сложения и сопротивления почвы проникновению, влажности, мощности подстилки, доли оголенной поверхности, проективного покрытия растительности, видового богатства, распространения рудеральных видов, морфометрии троп и количества рекреационных отходов. Стадии дигрессии предлагается выделять не путем экспертного присвоения, а на основе многомерной классификации наблюдаемых состояний с последующим сопоставлением выделенных классов с интенсивностью посещения. Разработана схема геоэкологического зонирования, разделяющая участки устойчивого использования, регулируемой нагрузки, восстановления и временного ограничения посещения. Подход позволяет увязать природоохранный мониторинг ООПТ с решениями по размещению настилов, локализации движения, восстановлению неофициальных троп и распределению туристического потока.

Ключевые слова: остров Ольхон; рекреационная дигрессия; туристическая нагрузка; тропная эрозия; ландшафтная устойчивость; геоэкологический мониторинг.

Original article

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF RECREATIONAL DIGRESSION OF OLKHON ISLAND COASTAL LANDSCAPES ALONG A TOURISM PRESSURE GRADIENT

Topchaia Viktoriia Iurevna, Candidate of Geographical Sciences, Researcher, Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, Russia, topchaia59@yandex.ru

Abstract. Increasing visitation to protected natural areas in the Baikal region intensifies the conflict between recreational use and the conservation of environmentally sensitive landscapes. On Olkhon Island, this conflict has a pronounced spatial dimension because visitor flows are concentrated within a limited number of coastal sites, routes and stopping areas, whereas the resistance of soil and vegetation to disturbance varies with substrate, moisture conditions, relief and land-use pattern. The study develops a geoecological framework for assessing recreational digression in the coastal landscapes of Olkhon Island by directly relating measured visitor pressure to quantitative responses of soils, vegetation and trail surfaces. The evidence base comprises studies published in 2024–2026 on visitor loads in Pribaikalsky National Park, tourism flows on Olkhon, recreationally affected soils along Lake Baikal, and recent international research on trampling, soil compaction, trail degradation and adaptive visitor management. Recreational carrying capacity is treated not as a fixed universal number but as a site- and season-specific management parameter that should be linked to empirically determined breakpoints in pressure–response relationships. The proposed monitoring design combines visitor counts with measurements of soil bulk density, penetration resistance, soil moisture, litter depth, bare-ground cover, vegetation cover, species richness, ruderal species share, trail width and incision, and recreational litter. Digression stages are to be obtained from multivariate classification of observed conditions rather than assigned through expert judgement. Seasonal surveys before, during and after peak visitation make it possible to distinguish reversible disturbance from persistent degradation. UAV imagery, GPS mapping and repeated high-resolution surveys are integrated into the monitoring of informal trails and erosion. The resulting framework supports geoecological zoning into areas of sustainable use, regulated pressure, ecological restoration and temporary access restriction. It also provides a defensible basis for adapting visitor infrastructure and redistributing recreational flows without equating the numerical capacity of a site with its ecological resistance.

Keywords: Olkhon Island; recreational degradation; tourist pressure; trail

erosion; landscape resilience; geoecological monitoring.

Введение. Природоохранное значение Байкальской природной территории сочетается с устойчивым ростом ее востребованности как пространства отдыха. Особенно отчетливо это противоречие проявляется на острове Ольхон, где сравнительно малочисленное постоянное население соседствует с сезонным туристическим потоком, во много раз превышающим численность местных жителей. По данным О.В. Евстропьевой с соавторами, Хужирское муниципальное образование принимает ориентировочно от 200 до 500 тыс. туристов и отдыхающих в год при численности постоянных жителей около 2 тыс. человек. Посещаемость имеет два выраженных сезонных максимума: летний приходится на июль–август, зимний — на февраль–март; при этом средства коллективного размещения и автомобильные туристы преимущественно концентрируются в Хужире, его окрестностях и у Хужирского залива [3].

Сам по себе большой поток людей еще не является достаточным доказательством деградации природного комплекса. Для геоэкологической оценки существенно другое: где именно проходит поток, сколько времени люди проводят на конкретном участке, каким образом перемещаются, остается ли воздействие в пределах устойчивой поверхности или смещается на растительный покров, возникает ли система параллельных троп, насколько быстро участок восстанавливается после окончания сезона. Один и тот же показатель посещаемости может иметь неодинаковые последствия на оборудованном настиле, плотной грунтовой дороге, степном дерновом покрове или рыхлом песчаном субстрате. Поэтому исследование рекреационной нагрузки, оторванное от свойств геосистемы, дает административную характеристику посещаемости, но еще не дает полноценной оценки геоэкологического состояния.

Материалы Прибайкальского национального парка хорошо показывают

эту разницу. Для 93 участков и троп парка А.Д. Калихманом и Т.П. Калихман была рассчитана допустимая единовременная численность 5285 человек. Почти половина выданных разрешений в рассмотренный авторами период была связана с Ольхоном, на который одновременно приходилось около трети совокупной предельной нагрузки парка [1]. Особый интерес представляет установленный авторами эффект благоустройства: настильные тропы, организованные площадки, ограничения въезда транспорта, санитарная инфраструктура и локализация движения позволяли увеличивать число посетителей без соответствующего увеличения давления на прилегающие природные поверхности. Для Сарайского залива приводится рекреационная емкость 350 человек, для мыса Хобой — 150 человек; в обоих случаях изменение инфраструктуры существенно повлияло на соотношение между числом посетителей и экологическими последствиями [1].

Из этого следует принципиальное для настоящей работы положение. Рекреационная емкость не тождественна устойчивости ландшафта и тем более не должна пониматься как универсальное количество людей на гектар. Ее значение определяется взаимодействием трех групп факторов: свойств природного комплекса, характера рекреационного использования и системы управления. Если потоки направлены на устойчивые поверхности, инфраструктура предотвращает рассредоточение посетителей по территории, а нарушенные участки восстанавливаются после сезона, одно и то же количество посетителей оказывает меньшее воздействие, чем на необустроенном участке с сетью стихийных троп.

Современная дискуссия развивается именно в этом направлении. Обзор 2026 г. показывает, что подход, основанный на поиске одного «максимально допустимого» числа посетителей, недостаточен для управления охраняемыми территориями. Рабочая система должна включать описание желаемого состояния, набор измеримых индикаторов, приемлемые пределы их изменения, повторный мониторинг и заранее определенную управленческую реакцию [15].

Для Ольхона такая постановка особенно оправданна, поскольку фактическая нагрузка распределена крайне неравномерно, а природные комплексы острова сочетают участки с разной устойчивостью к механическому нарушению.

Дополнительно следует учитывать пространственное накопление рекреационного воздействия. В начале сезона единичные проходы могут лишь сминать травостой. При повторении маршрута формируется узкая тропа, затем происходит потеря растительного покрова, верхний слой почвы уплотняется, уменьшается шероховатость поверхности, меняется инфильтрация осадков. На наклонных участках формируется более выраженное русло поверхностного стока. Если посетители обходят переувлажненные или разрушенные фрагменты, тропа расширяется либо распадается на несколько параллельных ветвей. Возникает уже пространственная перестройка микроландшафта.

Работы последних лет подтверждают, что отклик почв и растительности нельзя сводить к одному индикатору. В эксперименте Q. Shang, C. Li и Y. Liu вытоптанность сопровождалась изменением физических свойств почвы, в том числе плотности и пористости, а также перестройкой микробного сообщества [2]. T. Chisholm и J.L. McCune обнаружили зависимость дальности распространения воздействия троп от типа растительности и характера использования маршрута [12]. Российское исследование 2026 г. на экологической тропе особо охраняемой территории также показало целесообразность рассматривать рекреационную нагрузку как самостоятельный фактор уплотнения почв, причем оценивать ее следует в контексте конкретного защищаемого ландшафта [14].

Именно здесь обнаруживается основной методический разрыв применительно к Ольхону. По острову накоплены сведения о количестве отдыхающих, посещаемости маршрутов, расчетной рекреационной емкости, отходах и ограничениях природопользования. Однако эти сведения пока недостаточно сопоставлены с синхронными измерениями реакции почвы и растительности на тех же участках. Следовательно, невозможно надежно

определить, при какой интенсивности использования начинается переход от обратимого сезонного нарушения к устойчивой дигрессии.

Цель исследования состоит в обосновании системы геоэкологической оценки рекреационной дигрессии прибрежных ландшафтов острова Ольхон, позволяющей количественно связать фактическую посетительскую нагрузку с состоянием почвенного и растительного покрова, параметрами тропной сети и поверхностной эрозией, определить локальные пороги устойчивости и использовать полученные зависимости для пространственного регулирования рекреации.

В соответствии с этой целью объектом исследования выступают прибрежные природные комплексы Ольхона в границах Прибайкальского национального парка, а предметом — пространственно и сезонно изменяющаяся реакция сопоставимых ландшафтных фаций на разную интенсивность туристического использования.

Обзор литературы. Современные исследования Ольхона образуют достаточно содержательную, но методически неоднородную базу. Одну ее часть составляют работы, где измеряется или рассчитывается туристическая нагрузка. Другая посвящена состоянию инфраструктуры, отходам и режиму природопользования. Отдельный блок формируют почвенные и ландшафтные исследования Байкальского побережья. Однако исследования, в которых количественные показатели посещения анализируются совместно с синхронно зарегистрированной реакцией конкретного природного комплекса, пока немногочисленны.

Работа А.Д. Калихмана и Т.П. Калихман [1] важна тем, что переводит рассуждения о «перегруженности» территории в систему измеряемых параметров. Авторы рассматривают 93 рекреационных объекта Прибайкальского национального парка и используют логику пределов допустимых изменений. Для Сарайского залива разработана схема, где 250 посетителей распределяются по прибрежной полосе, а еще 100 — по настильной

тропе «Сарайское кольцо». Авторы особо отмечают, что средний показатель в человеко-гектарах не передает реальных условий использования крупных неоднородных участков: допустимая нагрузка должна определяться применительно к конкретному ограниченному объекту с учетом его состояния и инфраструктуры.

Эта мысль получает дополнительное развитие в публикации Е.Н. Соловьевой и С.Г. Бабиной [19], рассматривающей практику применения действующих правил определения предельно допустимой рекреационной емкости непосредственно на маршруте «Север острова Ольхон». Методически важен сам переход от абстрактной «вместимости» территории к расчету, зависящему от экологических и инфраструктурных ограничений. Авторы показывают, что работа с пропускной способностью ООПТ неизбежно требует постоянного обновления исходных параметров, а не однократного получения нормативной цифры.

В то же время рекреационная емкость, рассчитанная по нормативно-управленческой методике, и эмпирический экологический порог — не одно и то же. Первая отвечает на вопрос, какое использование допускается при существующей системе управления. Второй показывает, начиная с какой интенсивности давления конкретный природный компонент меняется быстрее, чем в диапазоне естественной или обратимой сезонной вариабельности. В идеальной системе управления эти величины согласованы; на практике между ними возможен разрыв. Поэтому геоэкологическое исследование должно не повторять административный расчет, а проверять его экологическую состоятельность по наблюдаемому отклику ландшафта.

Исследование туристического потока на Ольхоне, выполненное О.В. Евстропьевой, Т.И. Заборцевой, П.В. Роговым, О.А. Игнатовой и К.В. Дулей [3], добавляет к этой проблеме пространственное измерение. Авторы характеризуют распределение потока как монофокальное: значительная часть коллективных средств размещения сосредоточена в Хужире и его окрестностях,

автомобильные туристы также тяготеют к побережью Хужирского залива. При этом 200–500 тыс. приезжающих в течение года распределяются крайне неравномерно по времени. Для мониторинга дигрессии это обстоятельство принципиально: годовая посещаемость плохо характеризует фактическую нагрузку на почву или растительный покров, если несколько десятков процентов проходов приходятся на ограниченное число летних недель.

Именно поэтому в настоящей работе предлагается считать базовой единицей воздействия не общее годовое число туристов, а интенсивность использования конкретного участка за стандартизованный временной интервал. Для площадных объектов это могут быть посетитель-часы на гектар в сутки; для троп — количество проходов через сечение в сутки и суммарное число проходов между двумя последовательными обследованиями. Подобное разделение дает возможность сопоставить воздействие с изменением физического состояния почвы за тот же период.

Состояние рекреационной инфраструктуры также имеет самостоятельное экологическое значение. Е.Н. Соловьева, И.И. Подлипский и А.М. Стронская рассматривают состояние Ольхона в совокупности с дорожной сетью, туристическим сектором, выпасом и коммунальным обеспечением [11]. В более узкой работе Е.Н. Соловьевой, Л.А. Эповой и И.И. Подлипского [5] показано, что отходы на туристических маршрутах нельзя интерпретировать только как эстетическое нарушение. По их расчетам, на одного туриста приходится в среднем 0,38 ± 0,06 кг отходов в рассматриваемой системе учета, а неустойчивое обращение с ними связано также с распространением синантропных животных и рудеральных растений.

Однако мусорное загрязнение не следует делать единственным или главным индикатором рекреационной дигрессии. Количество отходов сильно зависит от частоты уборки, наличия контейнеров, организации вывоза и поведения посетителей. Два одинаково вытоптанных участка способны существенно различаться по числу обнаруженных предметов только потому, что

на одном уборка проводилась накануне. Поэтому этот показатель целесообразно использовать как характеристику рекреационного использования и качества управления, но анализ почвенно-растительной деградации должен опираться прежде всего на физически устойчивые и повторяемые признаки.

Региональные почвенные исследования дают основания для такого выбора. Л.Д. Балсанова в 2024 г. проанализировала рекреационно используемые прибрежные участки восточного побережья Байкала и показала необходимость оценивать устойчивость почв по сочетанию морфологических и физико-химических характеристик [7]. Хотя восточное побережье нельзя использовать как прямой фон для Ольхона, этот материал подтверждает общую для Байкальской природной территории закономерность: почвенный покров рекреационных зон неодинаково переносит механическое воздействие, поэтому норматив без учета свойств субстрата методически недостаточно обоснован.

Сходный вывод следует из результатов O. Gordienko, A. Mitrofanova и T.J. Novák [14]. На экологической тропе природного парка авторы рассматривают изменение уплотнения почвы в связи с рекреационной нагрузкой и подчеркивают необходимость систематического мониторинга на охраняемых территориях. Работа особенно полезна для настоящего исследования тем, что относится к российскому объекту и опубликована в 2026 г., то есть отражает современную практику количественной оценки давления на почвенный покров.

Зарубежные исследования уточняют механизм реакции. Q. Shang с соавторами [2] зарегистрировали при туристическом вытаптывании изменение объемной плотности и пористости почвы, показав, что механическое нарушение распространяется глубже визуально заметного повреждения поверхности. T. Chisholm и J.L. McCune [12] установили, что величина и пространственная дальность изменений растительного сообщества возле троп определяются совместным действием типа растительности и способа использования маршрута. Это важное предупреждение против прямого переноса порога, полученного на одном участке, на другой.

Исследования тропной сети в 2024–2026 гг. существенно расширили набор инструментальных методов рекреационной экологии. Обзор M.V.R.C. Simão, E.I. Farías-Torbidoni и M. Llena охватывает современные подходы к восстановлению деградированных троп на охраняемых природных территориях и показывает, что устойчивое управление требует одновременно диагностировать форму нарушения, причины его возникновения и эффективность последующего вмешательства [4]. В другой работе та же исследовательская школа сопоставила поперечное профилирование и максимальную глубину с наземным лазерным сканированием, SfM-фотограмметрией и съемкой с беспилотной платформы. Повторные обследования позволяли отделять текущую эрозионную динамику от накопленного за длительный период врезания [16].

Эксперимент Y.S. Hayakawa и соавторов [10] дополняет эти наблюдения на микроуровне. Авторы применили SfM-MVS и LiDAR для регистрации деформации поверхности при повторном прохождении и показали, что особенности контакта обуви и дополнительное использование треккинговых палок влияют на латеральное смещение грунта. Для Ольхона непосредственный перенос полученных численных значений был бы неправомерен, но методический результат важен: ширина и глубина тропы являются интегральными последствиями не только количества посетителей, но и характера движения, состояния поверхности и микрорельефа.

В 2024 г. N. Bruno, A. Valletta, A. Segalini и R. Roncella продемонстрировали возможности относительно недорогих фотограмметрических и лазерных методов для повторного контроля эрозии горных троп [18]. Авторы отмечают, что разные масштабы нарушения требуют различного пространственного разрешения: небольшие деформации поверхности рационально измерять наземными методами, тогда как протяженные участки удобнее обследовать посредством БПЛА.

Отдельное направление последних исследований связано с цифровыми следами посетителей. J. Zink и соавторы [6] использовали данные outdoor-

платформ для обнаружения отклонений от разрешенных маршрутов и оценки соблюдения ограничений в охраняемых природных территориях. Подобные данные перспективны и для Прибайкалья, однако они не заменяют прямой учет. Пользователи цифровых сервисов образуют селективную часть посетительского потока, поэтому треки целесообразно применять для поиска пространственных очагов и неофициальных путей, но не как единственный источник абсолютной численности.

Места стоянок представляют собой отдельную форму рекреационного воздействия. J.L. Marion и N. Maretzki [8], анализируя интенсивно используемые участки природной территории, предлагают начинать управление с полной инвентаризации стоянок: необходимо зафиксировать их количество, площадь, состояние, степень использования и устойчивость местоположения. После этого часть площадок может быть закреплена и оборудована, а экологически неудачные — закрыта и восстановлена. Этот подход представляется особенно продуктивным для прибрежных территорий Ольхона, поскольку пространственная концентрация отдыха при правильно выбранных площадках способна уменьшить суммарную площадь нарушения.

Наконец, геоэкологическую проблему острова нельзя полностью изолировать от институциональной среды. A. Shkaruba, R. Mnatsakanian, I. Molodikova, V. Kireyeu и K. Sepp [17] на примере Ольхона показали, что экологические риски прибрежной зоны связаны не только с физическим воздействием туристов, но и с несогласованностью мер управления, землепользования, коммунальной инфраструктуры и контроля. Вместе с тем в рамках настоящей статьи эти факторы рассматриваются как контекст.

Анализ литературы позволяет сформулировать основной пробел. Современные источники дают надежную информацию либо о посетительской нагрузке, либо о состоянии отдельных компонентов окружающей среды, либо о практике управления. Для выявления экологически обоснованного порога необходимо синхронизировать эти данные в единой пространственно-временной

схеме исследования. Такая схема лежит в основе предлагаемой методики.

Научная новизна исследования определяется переходом от описательной оценки «рекреационно нарушенных» участков к количественной модели, в которой нагрузка измеряется непосредственно и рассматривается как непрерывная переменная. Такой подход исключает ситуацию, когда площадку заранее относят к определенной стадии дигрессии, а затем отбирают показатели, подтверждающие уже принятое решение.

Второе отличие состоит в ландшафтной сопоставимости наблюдений. Фоновая площадка подбирается не по принципу максимальной удаленности от туристов, а как участок той же фации с близкими условиями рельефа, субстрата, экспозиции и исходной растительности. Если сравнивается прибрежно-степной участок, его контроль должен принадлежать той же группе геосистем; сосновое редколесье или дюнный комплекс не могут служить корректным фоном только потому, что туда реже заходят люди.

Третье положение связано с пониманием порога. В работе не вводится произвольная универсальная норма, одинаковая для всей территории острова. Порог устойчивости определяется статистически как диапазон нагрузки, после которого зависимость между интенсивностью посещения и выбранным откликом меняет наклон либо начинается устойчивое расхождение с сопоставимым контролем. Для разных компонентов один и тот же участок может иметь разные чувствительные точки: растительный покров способен реагировать раньше, чем появляется измеримая эрозионная врезка.

Наконец, стадии дигрессии предлагается выделять после получения данных. Входными признаками становятся фактически измеренные характеристики почвы, растительности и троп. Многомерная классификация группирует близкие состояния, после чего группы сопоставляются с нагрузкой, сезонной восстановимостью и пространственным положением. Таким образом, стадии определяются на основе наблюдаемых показателей и перестают зависеть исключительно от экспертной шкалы.

Организация и методология исследования. Настоящая работа выполнена как аналитико-методическое геоэкологическое исследование. Численные сведения о современном рекреационном использовании Ольхона заимствованы только из публикаций 2024–2026 гг.; полевые показатели, которых нет в открытых источниках, не подменяются расчетными или вымышленными значениями. На основе выявленного информационного разрыва разработан дизайн синхронного мониторинга, пригодный для последующей полевой реализации и статистической проверки.

Территориальное ядро исследования образуют прибрежные участки острова в пределах Прибайкальского национального парка, находящиеся под неодинаковой интенсивностью рекреационного использования. При этом градиент формируется внутри повторяющихся ландшафтных типов. Сарайский залив, Хужир и маршрут северной части острова рассматриваются как ключевые пункты учета посетительского потока и размещения управленческой инфраструктуры, но при статистическом сравнении каждая опытная площадка должна иметь контроль в той же фациальной группе.

Исходная нагрузка Ольхона характеризуется несколькими опубликованными параметрами, приведенными в табл. 1.

Таблица 1 — Параметры рекреационного использования Ольхона, пригодные для формирования исходной модели нагрузки

Показатель	Опубликованное значение / характеристика	Геоэкологическое значение
Годовой поток в Хужирском муниципальном образовании	200–500 тыс. туристов и отдыхающих; постоянное население около 2 тыс. человек [3]	Показывает многократное сезонное превышение временного населения над постоянным
Сезонность	Летний максимум в июле–августе, зимний — в феврале–марте [3]	Требует минимум трех повторов мониторинга в теплый сезон и отдельного зимнего дизайна
Пространственная структура	Концентрация размещения в Хужире и окрестностях; тяготение автотуристов к Хужирскому заливу [3]	Обосновывает пространственно неодинаковое давление на береговые комплексы

Совокупная единовременная емкость Прибайкальского национального парка	5285 человек на 93 участках и тропах [1]	Дает управленческий фон, но не заменяет локального экологического порога
Сарайский залив	350 человек единовременно [1]	Участок с высокой посещаемостью и развитой направляющей инфраструктурой
Мыс Хобой	150 человек единовременно [1]	Высокая концентрация потока на ограниченном природном объекте
Роль инфраструктуры	Устройство настилов, площадок и ограничение движения транспорта позволяли увеличить пропускную способность без пропорционального роста воздействия [1]	Подтверждает необходимость отделять число посетителей от фактической площади контакта с природной поверхностью
Отходы на туристических маршрутах	Зафиксирована нестабильная динамика; расчетный показатель авторов — 0,38 ± 0,06 кг на туриста в принятой системе учета [5]	Используется как вспомогательный индикатор интенсивности и качества управления

Источник: составлено автора по данным [1], [3], [5].

Посещаемость целесообразно регистрировать автоматическими счетчиками с контрольной ручной калибровкой. На ключевых площадках ручной учет проводится в заранее заданные временные окна, охватывающие будние и выходные дни. Одновременно фиксируются длительность пребывания групп, число палаток и занятых мест стоянок. GPS-треки и обезличенные данные outdoor-платформ могут выявлять повторяемые сходы с официальной сети, однако абсолютная численность посетителей по ним не рассчитывается вследствие селективности пользователей цифровых сервисов [6].

Экологический отклик предлагается исследовать на парных или многократно сопоставленных площадках. В каждой фации закладывается серия трансект от зоны максимального контакта с туристами к участку с минимальным использованием. При этом трансекта не должна пересекать резкую границу почвы, экспозиции или растительного сообщества. Если такое условие невыполнимо, исследуемые фрагменты относятся к разным блокам анализа.

Состав измерений представлен в табл. 2.

Таблица 2 — Система показателей для оценки зависимости «рекреационная нагрузка — геоэкологический отклик»

Компонент	Показатель	Единица / форма учета	Способ получения	Диагностический смысл
Рекреационная нагрузка	Интенсивность посещения	посетитель-ч/га/сут	счетчики + натурный учет	Интенсивность площадного использования
	Число проходов	проходов/сут	счетчик на тропе	Кумулятивное механическое воздействие
	Плотность стоянок	объектов/га	GPS-инвентаризация	Степень пространственного распространения рекреационной нагрузки
	Удаленность от подъезда / официальной тропы	м	ГИС	Фактор пространственной доступности
Почва	Плотность сложения	г/см³	цилиндр известного объема	Уплотнение верхнего горизонта
	Сопротивление проникновению	МПа	полевой пенетрометр	Механическое уплотнение и ограничение корнеобитаемого слоя
	Влажность	% или м³/м³	гравиметрически / TDR	Контроль природной изменчивости уплотнения
	Мощность подстилки	см	линейное измерение	Сохранность органогенного покрова
Поверхность	Доля оголенного грунта	%	площадочная съемка	Потеря защитного покрова
Растительность	Проективное покрытие	%	площадки / фотофиксация	Интегральная реакция растительного покрова
	Видовое богатство	видов/площадку	геоботаническое описание	Упрощение сообщества
	Доля рудеральных видов	%	геоботаническое описание	Замещение исходной растительности
	Повреждение кустарников и подроста	% особей	натурный учет	Механическое воздействие вне троп
Тропа	Ширина	м	повторные створы / ортофото	Латеральное расширение
	Максимальная глубина	см	профиль	Врезание поверхности

	Площадь поперечного сечения потери грунта	см²	профиль / 3D-модель	Количественная оценка эрозии
	Параллельные ответвления	число, длина, площадь	GPS + БПЛА	Формирование неофициальной сети
Отходы	Число предметов / масса	шт./100 м²; кг/100 м²	стандартизованный сбор	Дополнительная характеристика использования и управления

Источник: разработано автора с учетом [2], [4], [6], [7], [8], [10], [12], [14], [16], [18].

Для почвенных измерений особенно важна повторяемость. Плотность сложения следует определять в одном и том же горизонте, предпочтительно в верхних 0–5 см, где механическая реакция проявляется наиболее быстро. Сопротивление проникновению существенно зависит от влажности, поэтому значения пенетрометра интерпретируются только совместно с измерением влажности. Иначе сухой контрольный участок способен ошибочно выглядеть более уплотненным, чем влажная рекреационная площадка.

Растительность оценивается на стационарных квадратах. Прибрежные степные сообщества и участки редколесья должны анализироваться раздельно, поскольку их естественная структура и способность восстанавливаться неодинаковы. Помимо общего покрытия, необходимо учитывать появление рудеральных видов. Такой признак особенно значим для Ольхона: исследования отходов на острове указывают на риск распространения синантропной и рудеральной биоты в связи с рекреационно-коммунальным воздействием [5].

Для троп применяются два уровня морфометрии. На всех маршрутах через фиксированный шаг выполняется стандартное измерение ширины и максимальной глубины. На участках, где наблюдается активное врезание или расширение, создается повторная трехмерная модель. Исследования 2024-2026 гг. показывают, что SfM-фотограмметрия, БПЛА и лазерное сканирование позволяют выявлять малые пространственные изменения, которые сложно надежно оценить визуально [10], [16], [18].

Неформальные тропы картируются полностью в пределах выбранных

полигонов. Для каждой фиксируется длина, средняя ширина, площадь оголенного грунта, связь с официальной сетью и объектом притяжения. Повторная съемка в одинаковой системе координат позволяет установить, возникло ли новое ответвление в текущем сезоне, расширилась ли прежняя тропа или, наоборот, восстановилась после ограничения доступа.

Временная организация наблюдений должна соответствовать сезонности острова. Минимальная схема теплого периода включает обследование до массового наплыва посетителей, в июле–августе и после завершения пикового периода в сентябре. Именно летний максимум подтверждается современными данными по структуре туристического потока Ольхона [3].

Наиболее информативно сопоставление состояния участка в период максимальной нагрузки с его состоянием после завершения пикового сезона и перед началом следующего сезона. Если проективное покрытие в августе снизилось, но к следующему предпиковому обследованию восстановилось и не сопровождается ростом оголенной поверхности, говорить о устойчивой деградации преждевременно. Иная ситуация складывается, когда участок сохраняет повышенную плотность почвы, расширенную тропу и оголенный грунт после окончания сезона. В таком случае воздействие вышло за пределы кратковременной деформации и приобрело накопительный характер.

Для статистической оценки порога предлагается кусочно-линейная регрессия.

Если функция остается плавной и статистически значимой точки перелома не обнаружено, искусственно вводить порог не следует. Тогда управленческий стандарт определяется по пределу приемлемого состояния выбранного индикатора. Для нелинейных зависимостей дополнительно применима обобщенная аддитивная модель, позволяющая проверить, не маскирует ли линейная аппроксимация более сложную реакцию.

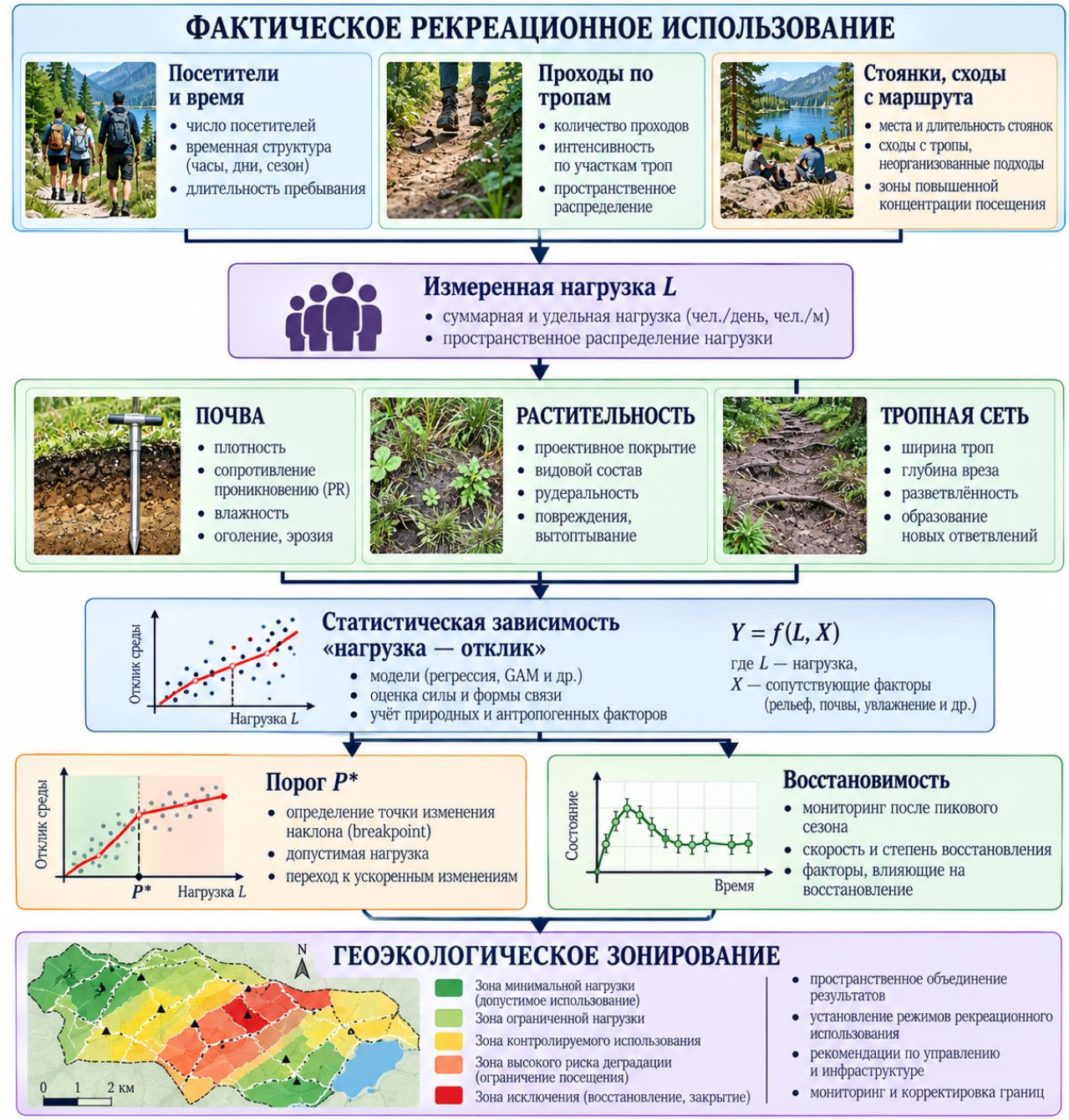


Рисунок 1 — Схема совмещенного мониторинга нагрузки и геоэкологического отклика (источник: разработано автором)

Стадии дигрессии формируются на следующем шаге. Показатели стандартизируются, а признаки, отражающие один и тот же процесс и имеющие крайне высокую взаимосвязь, не дублируются. После этого проводится многомерная классификация. Число устойчивых групп выбирается по качеству кластеризации, а не задается заранее как обязательные четыре или пять стадий. Затем группы упорядочиваются по медианной нагрузке, площади оголенного

грунта, устойчивости растительного покрова и способности к послесезонному восстановлению.

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ публикаций 2024–2026 гг. позволяет прежде всего уточнить сам характер рекреационной проблемы Ольхона. Она не состоит в том, что «слишком много туристов» воздействуют на остров как на единое пространство. Нагрузка локализована. Ее основная доля стягивается к населенным пунктам, автомобильным подъездам, известным природным объектам, пляжам и нескольким экскурсионным направлениям. Такая структура означает, что средний показатель посещаемости на площадь острова будет систематически сглаживать наиболее важные для управления локальные максимумы.

Особенно показателен Сарайский залив. В опубликованной оценке на участке зафиксированы элементы направляющей инфраструктуры: настильная кольцевая тропа, смотровые площадки, ответвления к берегу, информационные объекты и ограничение въезда транспорта. При этом авторы исследования приводят конкретные индикаторы состояния, включая места схода с настила на травяной покров, а общую текущую рекреационную емкость оценивают в 350 человек [1]. Для геоэкологии важен не сам показатель 350, а то, каким образом достигается его экологическая приемлемость. Значительная часть потока удерживается на устойчивой или специально оборудованной поверхности.

Мыс Хобой демонстрирует другой тип пространственной организации. Допустимая единовременная нагрузка в рассматриваемой методике составляет 150 человек, а опубликованная оценка состояния объекта характеризовалась как «удовлетворительная». Вместе с тем развитие инфраструктуры позволило повысить пропускную способность по сравнению с прежним состоянием без сопоставимого роста воздействия [1]. Это еще раз подтверждает: прямой перенос численного лимита между Сарайским заливом, Хобоем и любым третьим участком не имеет научного основания. У каждого объекта свой микрорельеф, пространственная конфигурация движения и доля контакта посетителя с

незащищенной природной поверхностью.

Отсюда вытекает первое содержательное положение предлагаемой модели: единицей управления должен быть не остров и даже не крупный маршрут, а экологически однородный участок контакта рекреации с ландшафтом. Для Сарайского залива одним таким объектом может стать сама оборудованная тропа, другим — участок растительного покрова возле неофициального схода, третьим — зона пребывания на прибрежном песке. Их нагрузка и отклик должны анализироваться раздельно.

Второй результат связан с различием между концентрацией и расползанием воздействия. Высокая посещаемость необязательно означает большую нарушенную площадь. Организованная инфраструктура способна концентрировать интенсивное использование на небольшой устойчивой поверхности. Напротив, сравнительно скромный поток на участке без четко заданного маршрута может создавать разветвленную сеть параллельных троп. Именно поэтому число посетителей необходимо рассматривать вместе с площадью их фактического контакта с почвой и растительностью.

Современные исследования мест стоянок подтверждают данное положение. J.L. Marion и N. Maretzki показали, что при интенсивном кемпинге задача управления заключается не в максимально широком рассредоточении любого количества площадок, а в сохранении ограниченного числа правильно расположенных устойчивых мест и восстановлении избыточных либо экологически неблагоприятных [8].

Третий результат касается почвенного блока. Почва реагирует на механическое воздействие раньше, чем формируются крупные эрозионные формы. Первоначальное уплотнение меняет поровое пространство, затем — условия инфильтрации и развития корней. Это хорошо согласуется с данными Q. Shang с соавторами о физических изменениях почвы под действием вытаптывания [2] и российскими результатами О. Gordienko с соавторами по уплотнению почв вдоль рекреационной тропы [14]. Поэтому плотность

сложения и сопротивление проникновению следует рассматривать как ранние диагностические признаки, но только после поправки на естественную влажность и свойства субстрата.

На Ольхоне такая поправка имеет особое значение. Сухой открытый участок и более увлажненный фрагмент растительности способны различаться по сопротивлению проникновению без какой-либо рекреации. Сравнение средних значений по острову эту неоднородность не устраняет. Более надежен парный дизайн, в котором нагруженная и контрольная площадки расположены в одной фациальной обстановке.

Четвертый результат связан с растительностью. Проективное покрытие остается одним из самых наглядных показателей, но без видового анализа оно недостаточно. Стабильное общее покрытие может скрывать замену исходных видов более устойчивыми к нарушению рудеральными растениями. Исследование T. Chisholm и J.L. McCune подтверждает, что влияние троп на состав растительных сообществ меняется в зависимости от типа растительности и вида рекреационного использования [12]. Для острова этот вывод согласуется с работой по отходам и синантропизации [5], где распространение рудеральной растительности рассматривается как один из сопутствующих экологических рисков.

Следовательно, геоботанический блок должен отвечать на два разных вопроса. Первый — сколько растительного покрова утрачено. Второй — сохранилась ли исходная структура сообщества на той площади, где растительность еще присутствует. Эти процессы могут идти с разной скоростью, поэтому объединять их в один условный балл до анализа нецелесообразно.

Пятый результат касается тропной эрозии. Расширение тропы, потеря растительности, поверхностное врезание и перенос грунта находятся в значительно более непосредственной связи с повторным механическим воздействием.

Современная методическая база позволяет измерять эти изменения с

необходимой точностью. M.V.R.C. Simão с соавторами в 2026 г. сравнили традиционные профили и максимальную глубину с TLS, наземной SfM-съемкой и БПЛА, показав пригодность многократных высокоточных обследований для оценки динамики эрозии [16]. N. Bruno с соавторами подчеркивают возможность подбирать относительно недорогой метод под масштаб нарушения [18]. Для регулярного мониторинга Ольхона это практичнее, чем попытка выполнять максимально детальную съемку всей маршрутной сети: массовые створы могут измеряться простыми средствами, а БПЛА используется на проблемных фрагментах.

Здесь проявляется еще одно методическое преимущество повторной съемки. Однократная трехмерная модель показывает состояние, но не скорость процесса. Глубокая тропа может быть старой и относительно стабильной, тогда как неглубокое ответвление, быстро расширившееся за один сезон, представляет более актуальную угрозу. Управленческое решение должно учитывать не только величину накопленного нарушения, но и его текущую динамику.

Шестой результат относится к сезонной обратимости. Наиболее посещаемый теплый период Ольхона приходится на июль–август [3]. Если обследование проводить только в конце августа, исследователь увидит максимум нарушения, но не узнает, какая его часть исчезает после прекращения интенсивного воздействия. Поэтому послесезонное и следующее предпиковое обследование имеют диагностическое значение. Способность системы возвращаться к исходному диапазону состояния входит в само понятие устойчивости.

В этой связи предлагается различать нарушение и деградацию. Под нарушением понимается статистически обнаружимое изменение состояния в период воздействия, которое может быть обратимым. Деградация диагностируется тогда, когда изменение сохраняется после окончания пикового использования либо проявляет накопительную отрицательную динамику в последовательных циклах. Это разграничение уменьшает риск завышать степень

неблагополучия только по летней картине.

Седьмой результат связан с мусором. Данные по Ольхону подтверждают реальность проблемы отходов [5], но в системе оценки дигрессии этот показатель следует оставить вспомогательным. Причина состоит в том, что значение этого показателя зависит не только от посещаемости, но и от частоты уборки. Поэтому количество предметов или масса отходов должны фиксироваться после стандартизованного интервала, а сведения о проведенной уборке заноситься в протокол. Без этого сравнение участков может привести к ошибочному выводу.

Восьмой результат затрагивает рекреационную емкость. Исследования Прибайкальского национального парка показывают практическую полезность расчетных лимитов [1], [19], однако современный международный подход требует рассматривать емкость как адаптивный показатель [15]. В настоящей работе предлагается разграничить три понятия.

Физическая вместимость описывает, сколько людей реально помещается на объекте при заданной организации пространства. Управленческая емкость отражает число посетителей, допускаемое при действующей инфраструктуре и режиме. Геоэкологический порог характеризует такую интенсивность воздействия, после которой наблюдаемые природные показатели начинают устойчиво выходить из диапазона приемлемых изменений. Эти величины могут совпадать, но их совпадение должно быть результатом измерений, а не исходным предположением.

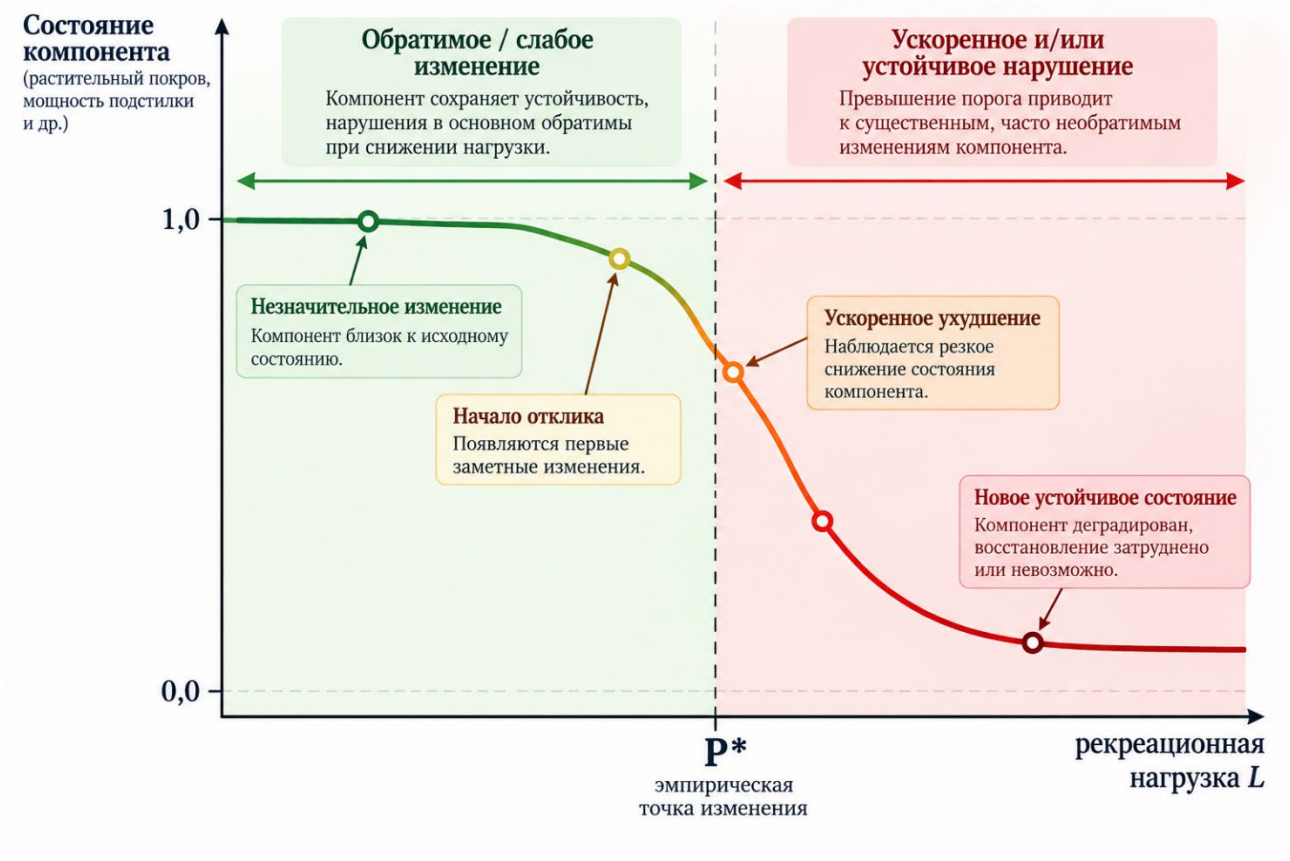


Рисунок 2 — Концептуальная зависимость между рекреационной нагрузкой и состоянием чувствительного компонента ландшафта (источник: разработано автором)

Для выявления устойчивой рекреационной дигрессии предлагается использовать согласованную оценку нескольких независимых характеристик состояния ландшафта. В обычном случае основанием для отнесения участка к категории выраженного нарушения является устойчивое ухудшение не менее двух групп показателей, например состояния почвы и растительного покрова либо растительности и морфометрии тропы. Вместе с тем отдельные нарушения могут требовать управленческого реагирования независимо от состояния остальных компонентов. К таким случаям относятся активная эрозия с превышением заранее установленного критического предела, быстрое расширение оголённой поверхности или развитие процесса, создающего непосредственную угрозу необратимого повреждения участка.

Рекреационную ёмкость острова Ольхон целесообразно рассматривать как совокупность ограничений, устанавливаемых для отдельных ландшафтно

однородных участков с различной чувствительностью к механическому воздействию. Физическая вместимость, управленчески допустимое число посетителей и геоэкологический порог нарушения представляют собой разные показатели. Их значения зависят от организации маршрутов, состояния почв и растительности, наличия направляющей инфраструктуры и сезонного режима использования.

Разработанная логика зонирования приведена в табл. 3.

Таблица 3 — Геоэкологическое зонирование по результатам мониторинга

Функциональное состояние	Диагностические признаки	Режим использования
Устойчивое использование	Показатели находятся в диапазоне сопоставимого контроля либо отклонения малы и восстанавливаются после сезона; активной эрозии нет	Сохранение текущего режима; стандартный мониторинг
Регулируемая нагрузка	Устойчиво изменяется один блок показателей либо нагрузка приближается к найденной точке P*; появляются локальные сходы и расширение троп	Локализация движения, настилы, ограждение чувствительных фрагментов, перераспределение потока
Восстановление	Порог превышен; изменения подтверждаются несколькими блоками; нарушение сохраняется после пикового сезона	Закрытие неофициальных троп и избыточных стоянок, восстановительные работы, перенос точек притяжения
Временное ограничение посещения	Наблюдается продолжающееся увеличение площади оголенного грунта, активная эрозия либо отсутствие восстановления в последовательных циклах мониторинга	Сезонное или локальное закрытие до достижения заранее определенного состояния восстановления

Источник: разработано автором с учетом [4], [8], [15], [16].

Цифровое картирование способно существенно снизить трудоемкость этой работы. ГИС-моделирование туристских территорий Байкальской природной территории уже используется для объединения разнородных пространственных данных [13]. Применительно к Ольхону в единой системе целесообразно связать официальную маршрутную сеть, фактические GPS-треки, автоматические счетчики, ортофотопланы БПЛА, расположение стоянок, участки почвенных измерений и результаты геоботанических описаний. Тогда разрозненные полевые протоколы превращаются в многолетнюю пространственную модель

состояния.

При этом дистанционные данные не должны заменять полевые наблюдения. По снимку можно достаточно надежно определить расширение открытой тропы, но нельзя непосредственно получить плотность сложения почвы или видовое богатство травостоя. Геоэкологический мониторинг эффективен именно в сочетании масштабов: спутниковые и ГИС-данные показывают территориальную конфигурацию, БПЛА — детальную структуру поверхности, а стационарные площадки раскрывают механизм изменения компонентов.

Аналогичная осторожность необходима при интерпретации больших массивов пользовательских треков. Исследование «digital ranger» демонстрирует их способность обнаруживать нарушения режима и сходы с разрешенных маршрутов [6]. Однако отсутствие цифрового трека не означает отсутствия человека. Поэтому данные платформ служат дополнительным пространственным слоем, который помогает размещать счетчики и полевые площадки, но не заменяет репрезентативный учет посетителей.

Совокупность рассмотренных результатов позволяет предложить для Ольхона не еще одну статичную карту «нарушенных территорий», а динамическую систему наблюдения. Единицей ее обновления становится сезонный цикл. В начале теплого периода фиксируется состояние после восстановления, в пик — максимальный отклик, осенью — остаточное нарушение. Через год выясняется, накопился ли эффект. Если одновременно известна фактическая нагрузка, можно ответить на наиболее важный для управления вопрос: не просто где стало хуже, а при какой интенсивности и каком пространственном типе использования это произошло.

Подобная информация делает природоохранное решение проверяемым. Ограничение посещения, новый настил, перенос стоянки или закрытие неофициального ответвления должны сопровождаться последующим измерением. Если экологический показатель возвращается к контрольному

диапазону, мера работает. Если улучшения нет, необходимо искать другую причину либо менять способ управления. Такая логика ближе к адаптивному управлению, чем к однократному установлению численного лимита [15].

Следует подчеркнуть и ограничения предложенного подхода. Во-первых, разные компоненты восстанавливаются с разной скоростью. Почва после уплотнения может сохранять измененное состояние дольше, чем надземный травостой. Во-вторых, экстремально сухой или влажный сезон способен изменить чувствительность участка независимо от посещаемости. В-третьих, на части Ольхона рекреационное воздействие накладывается на выпас и транспортную нагрузку, о чем свидетельствуют современные исследования природопользования острова [11]. В таких местах причинное выделение туристического фактора требует либо исключения смешанных площадок, либо отдельного учета сопутствующей нагрузки.

Еще одно ограничение связано с временной глубиной. Публикация 2026 г., посвященная истории освоения Ольхона, показывает, что современное состояние острова формировалось под действием длительного хозяйственного использования, а не только туризма последних лет [9]. Поэтому современный «фон» не равнозначен первозданному состоянию. В настоящей методике он понимается как наименее рекреационно нагруженный аналог в пределах той же современной ландшафтной системы. Такое определение скромнее, но научно корректнее.

Для научно обоснованного регулирования необходима система локальных порогов, связанных с конкретными геосистемами и типами использования. Существующие показатели рекреационной емкости Прибайкальского национального парка дают важный управленческий каркас, а предлагаемая схема «нагрузка — отклик» добавляет к нему экологическую проверку.

Выводы. Рекреационная дигрессия прибрежных ландшафтов острова Ольхон должна исследоваться как пространственно неоднородный процесс, а не как прямое следствие общей годовой туристической посещаемости.

Современные материалы показывают сильную концентрацию потока в Хужире, его окрестностях, на популярных береговых объектах и маршрутах. В результате средние показатели по острову скрывают локальные участки, где механическая нагрузка многократно выше фоновой. Данные 2025 г. о 200–500 тыс. туристов и отдыхающих в год при постоянном населении около 2 тыс. человек подтверждают масштаб сезонного давления, но сами по себе не характеризуют степень экологического нарушения [3].

Опубликованная оценка рекреационной емкости Прибайкальского национального парка доказывает эффективность объектного подхода. Единовременная емкость 5285 человек распределена между 93 участками и тропами, причем Сарайский залив и мыс Хобой существенно различаются по допустимому числу посетителей и организации рекреационного пространства [1]. Еще важнее, что направляющая инфраструктура на ряде объектов позволяла повышать пропускную способность без соответствующего расширения воздействия. Следовательно, число посетителей нельзя использовать в качестве самостоятельной меры экологического давления.

Для установления собственно рекреационной дигрессии необходимо синхронно измерять нагрузку и ответ природного комплекса. В качестве базовых параметров нагрузки обоснованы посетитель-часы на единицу площади, число проходов по тропе, плотность мест стоянок и пространственная удаленность от официальной сети. Экологический отклик целесообразно характеризовать плотностью и сопротивлением почвы проникновению, влажностью, мощностью подстилки, площадью оголенной поверхности, проективным покрытием и структурой растительности, параметрами тропной морфометрии и признаками поверхностной эрозии.

Фоновый контроль должен быть ландшафтно сопоставим с рекреационной площадкой. Простая удаленность от туристического объекта не делает участок корректным контролем, если меняются почва, экспозиция, рельеф или тип растительности. Такой принцип особенно важен на Ольхоне, где на небольшом

расстоянии соседствуют степные участки, песчаные поверхности, редколесья и скальные комплексы.

Представление о единой геоэкологической емкости всего острова методически неоправданно. Для каждого типа прибрежного ландшафта требуется эмпирически устанавливать положение точки, после которой реакция выбранных показателей ускоряется либо возникает устойчивое расхождение с контролем. При отсутствии статистически обнаружимого перелома допустимый уровень воздействия должен определяться по состоянию самого индикатора. Современные исследования управления также свидетельствуют о преимуществе динамического подхода, связывающего показатели, стандарты состояния, мониторинг и управленческую реакцию, перед поиском одной неизменной предельной численности [15].

Стадии рекреационной дигрессии целесообразно выделять после получения данных путем многомерной классификации измеренных состояний. Это позволяет отказаться от экспертного присвоения стадии до анализа. Дополнительным критерием выступает послесезонная восстановимость: кратковременное снижение растительного покрытия в пик посещаемости и устойчивое сохранение оголенной поверхности после окончания сезона имеют разный геоэкологический смысл.

Для тропной сети приоритетным экзогенным процессом следует считать поверхностную и тропную эрозию. Современная SfM-фотограмметрия, БПЛА и наземная высокоточная съемка позволяют количественно измерять расширение и врезание поверхности при повторных наблюдениях [10], [16], [18]. Причинные выводы о рекреационном происхождении оползней без отдельного геологического и гидрогеологического исследования, напротив, не имеют достаточного основания.

Практическим итогом предлагаемой системы является геоэкологическое зонирование. Участки, где отклик остается в диапазоне контроля и восстанавливается после сезона, могут сохранять действующий режим. При

приближении к установленному порогу необходимо направлять движение, укреплять наиболее уязвимую поверхность и устранять стихийные сходы. Устойчивое превышение порога по нескольким независимым группам индикаторов требует восстановления нарушенных участков, а продолжающаяся эрозия и отсутствие послесезонного восстановления — временного ограничения посещения.

Таким образом, геоэкологическое регулирование рекреации на Ольхоне целесообразно строить вокруг более конкретного вопроса: какую фактическую нагрузку способен выдержать определенный природный комплекс при заданном типе использования и существующей инфраструктуре, не переходя к устойчивой деградации.

Список литературы

1. Калихман А. Д., Калихман Т. П. Оценка посетительских нагрузок и предельно допустимые нормы в Прибайкальском национальном парке // География и природные ресурсы. 2024. Т. 45, № 1. С. 164–177. DOI: 10.15372/GIPR20240116.

2. Shang Q., Li C., Liu Y. The Negative Effects of Tourist Trampling on the Soil Physical Properties and Microbial Community Composition in a Natural Oak Forest // Forests. 2024. Vol. 15, No. 8. Art. 1419. DOI: 10.3390/f15081419.

3. Евстропьева О. В., Заборцева Т. И., Рогов П. В., Игнатова О. А., Дуля К. В. Структурный анализ туристического потока и прогноз антропогенного воздействия: на примере острова Ольхон (Байкал, Иркутская область) // География и природные ресурсы. 2025. Т. 46, № 1. С. 84–94. DOI: 10.15372/GIPR20250108.

4. Simão M. V. R. C., Farías-Torbidoni E. I., Llena M. Management of Degraded Trails in Protected Natural Areas Worldwide: A Systematic Review of Scientific Literature // Land Degradation & Development. 2025. Vol. 36. P. 3279–3293. DOI: 10.1002/ldr.5579.

5. Соловьева Е. Н., Эпова Л. А., Подлипский И. И. Проблема обращения с

отходами при развитии туристско-рекреационной деятельности на особо охраняемых природных территориях (Прибайкальский национальный парк, о. Ольхон) // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2024. Т. 49. С. 130–145. DOI: 10.26516/2073-3402.2024.49.130.

6. Zink J., Mangold M., Porst F., Steinbauer M., Heurich M. Towards a Digital Ranger: Using Data from Outdoor Platforms to Detect Rule Violations in Protected Areas and Improve Visitor Management // Journal of Outdoor Recreation and Tourism. 2024. Vol. 48. Art. 100835. DOI: 10.1016/j.jort.2024.100835.

7. Балсанова Л. Д. Экологическая устойчивость почв рекреационных зон восточного побережья озера Байкал // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология». 2024. Т. 49. С. 52–66. DOI: 10.26516/2073-3372.2024.49.52.

8. Marion J. L., Maretzki N. A Management Process for Improving the Resource and Social Sustainability of Camping: A Case Study in the US Desolation Wilderness // Land. 2025. Vol. 14, No. 11. Art. 2264. DOI: 10.3390/land14112264.

9. Соловьева Е. Н., Калихман А. Д. Остров Ольхон: от антропогенного освоения до формирования режима особо охраняемой природной территории // Региональные геосистемы. 2026. Т. 50, № 2. С. 245–260. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-2-245-260.

10. Hayakawa Y. S., Gomez C., Watanabe T., Wang T., Kobayashi Y., Inomata M., Sakai T., Imagawa S. Effects of Ground-Contacting Gear on Trail Surface Deformation from Trampling // Environmental Challenges. 2025. Vol. 18. Art. 101107. DOI: 10.1016/j.envc.2025.101107.

11. Соловьева Е. Н., Подлипский И. И., Стронская А. М. Состояние и лимитирующие факторы использования территории острова Ольхон (Прибайкальский национальный парк) // Известия Байкальского государственного университета. 2024. Т. 34, № 1. С. 122–133. DOI: 10.17150/2500-2759.2024.34(1).122-133.

12. Chisholm T., McCune J. L. Vegetation Type and Trail Use Interact to Affect the

Magnitude and Extent of Recreational Trail Impacts on Plant Communities // Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 351. Art. 119817. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119817.

13. Евстропьева О. В., Бардаш А. В., Лесных С. И., Распутина Е. А., Цыганкова М. В. Геоинформационное моделирование туристских территорий с особыми условиями природопользования на примере центральной экологической зоны Байкальской природной территории // Геодезия и картография. 2025. № 9. С. 25–34. DOI: 10.22389/0016-7126-2025-1023-9-25-34.

14. Gordienko O., Mitrofanova A., Novák T. J. Recreational Load as a Factor of Soil Compaction in Protected Landscapes // Eurasian Journal of Soil Science. 2026. Vol. 15, No. 3. P. 335–347. DOI: 10.18393/ejss.1920975.

15. Sakrak Ekin G., Ekin Y., Akbulut O., Celik T. Carrying Capacity and Adaptive Visitor Use Management for Sustainable Parks and Protected Recreation Areas: A Critical Narrative Review // Sustainability. 2026. Vol. 18, No. 16. Art. 8037. DOI: 10.3390/su18168037.

16. Simão M. V. R. C., Farías-Torbidoni E. I., Dorado V. et al. Trail Erosion Assessment and Monitoring in Natural Areas: A Comparison of Traditional and High-Resolution Topographic Surveying Methods // Environmental Monitoring and Assessment. 2026. Vol. 198. Art. 423. DOI: 10.1007/s10661-026-15212-5.

17. Shkaruba A., Mnatsakanian R., Molodikova I., Kireyeu V., Sepp K. Why Is the Eutrophication Governance over the Lake of Baikal Failing? Land Use Governance Solutions Need to Account for Barriers across Sectors, Scales, and Actor Groups // Land Use Policy. 2024. Vol. 141. Art. 107136. DOI: 10.1016/j.landusepol.2024.107136.

18. Bruno N., Valletta A., Segalini A., Roncella R. Low-Cost Techniques for Soil Erosion Monitoring on Mountain Trails // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2024. Vol. XLVIII-2/W8-2024. P. 53–60. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W8-2024-53-2024.

19. Соловьева Е. Н., Бабина С. Г. Практика применения правил расчета предельно допустимой рекреационной емкости на территории Прибайкальского национального парка // 2024. Вып. 8. С. 232–241. DOI: 10.55959/MSU012129-2-2024-8-232-241.

References

1. Kalixman A. D., Kalixman T. P. Ocenka posetitel`skix nagruzok i predel`no dopustimy`e normy` v Pribajkal`skom nacional`nom parke // Geografiya i prirodny`e resursy`. 2024. T. 45, № 1. S. 164–177. DOI: 10.15372/GIPR20240116.

2. Shang Q., Li C., Liu Y. The Negative Effects of Tourist Trampling on the Soil Physical Properties and Microbial Community Composition in a Natural Oak Forest // Forests. 2024. Vol. 15, No. 8. Art. 1419. DOI: 10.3390/f15081419.

3. Evstrop`eva O. V., Zaborceva T. I., Rogov P. V., Ignatova O. A., Dulya K. V. Strukturny`j analiz turisticheskogo potoka i prognoz antropogennogo vozdejstviya: na primere ostrova Ol`xon (Bajkal, Irkutskaya oblast`) // Geografiya i prirodny`e resursy`. 2025. T. 46, № 1. S. 84–94. DOI: 10.15372/GIPR20250108.

4. Simão M. V. R. C., Farías-Torbidoni E. I., Llena M. Management of Degraded Trails in Protected Natural Areas Worldwide: A Systematic Review of Scientific Literature // Land Degradation & Development. 2025. Vol. 36. P. 3279–3293. DOI: 10.1002/ldr.5579.

5. Solov`eva E. N., E`pova L. A., Podlipskij I. I. Problema obrashheniya s otxodami pri razvitii turistsko-rekreacionnoj deyatel`nosti na osobo oxranyaemy`x prirodny`x territoriyax (Pribajkal`skij nacional`ny`j park, o. Ol`xon) // Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle». 2024. T. 49. S. 130–145. DOI: 10.26516/2073-3402.2024.49.130.

6. Zink J., Mangold M., Porst F., Steinbauer M., Heurich M. Towards a Digital Ranger: Using Data from Outdoor Platforms to Detect Rule Violations in Protected Areas and Improve Visitor Management // Journal of Outdoor Recreation and Tourism. 2024. Vol. 48. Art. 100835. DOI: 10.1016/j.jort.2024.100835.

7. Balsanova L. D. E`kologicheskaya ustojchivost` pochv rekreacionny`x zon

vostochnogo poberezh`ya ozera Bajkal // Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Biologiya. E`kologiya». 2024. T. 49. S. 52–66. DOI: 10.26516/2073-3372.2024.49.52.

8. Marion J. L., Maretzki N. A Management Process for Improving the Resource and Social Sustainability of Camping: A Case Study in the US Desolation Wilderness // Land. 2025. Vol. 14, No. 11. Art. 2264. DOI: 10.3390/land14112264.

9. Solov`eva E. N., Kalixman A. D. Ostrov Ol`xon: ot antropogennogo osvoeniya do formirovaniya rezhima osobo oxranyaemoj prirodnoj territorii // Regional`ny`e geosistemy`. 2026. T. 50, № 2. S. 245–260. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-2-245-260.

10. Hayakawa Y. S., Gomez C., Watanabe T., Wang T., Kobayashi Y., Inomata M., Sakai T., Imagawa S. Effects of Ground-Contacting Gear on Trail Surface Deformation from Trampling // Environmental Challenges. 2025. Vol. 18. Art. 101107. DOI: 10.1016/j.envc.2025.101107.

11. Solov`eva E. N., Podlipskij I. I., Stronskaya A. M. Sostoyanie i limitiruyushhie faktory` ispol`zovaniya territorii ostrova Ol`xon (Pribajkal`skij nacional`ny`j park) // Izvestiya Bajkal`skogo gosudarstvennogo universiteta. 2024. T. 34, № 1. S. 122–133. DOI: 10.17150/2500-2759.2024.34(1).122-133.

12. Chisholm T., McCune J. L. Vegetation Type and Trail Use Interact to Affect the Magnitude and Extent of Recreational Trail Impacts on Plant Communities // Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 351. Art. 119817. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119817.

13. Evstrop`eva O. V., Bardash A. V., Lesny`x S. I., Rasputina E. A., Cygankova M. V. Geoinformacionnoe modelirovanie turistskix territorij s osoby`mi usloviyami prirodopol`zovaniya na primere central`noj e`kologicheskoj zony` Bajkal`skoj prirodnoj territorii // Geodeziya i kartografiya. 2025. № 9. S. 25–34. DOI: 10.22389/0016-7126-2025-1023-9-25-34.

14. Gordienko O., Mitrofanova A., Novák T. J. Recreational Load as a Factor of Soil Compaction in Protected Landscapes // Eurasian Journal of Soil Science. 2026. Vol.

15, No. 3. P. 335–347. DOI: 10.18393/ejss.1920975.

15. Sakrak Ekin G., Ekin Y., Akbulut O., Celik T. Carrying Capacity and Adaptive Visitor Use Management for Sustainable Parks and Protected Recreation Areas: A Critical Narrative Review // Sustainability. 2026. Vol. 18, No. 16. Art. 8037. DOI: 10.3390/su18168037.

16. Simão M. V. R. C., Farías-Torbidoni E. I., Dorado V. et al. Trail Erosion Assessment and Monitoring in Natural Areas: A Comparison of Traditional and High-Resolution Topographic Surveying Methods // Environmental Monitoring and Assessment. 2026. Vol. 198. Art. 423. DOI: 10.1007/s10661-026-15212-5.

17. Shkaruba A., Mnatsakanian R., Molodikova I., Kireyeu V., Sepp K. Why Is the Eutrophication Governance over the Lake of Baikal Failing? Land Use Governance Solutions Need to Account for Barriers across Sectors, Scales, and Actor Groups // Land Use Policy. 2024. Vol. 141. Art. 107136. DOI: 10.1016/j.landusepol.2024.107136.

18. Bruno N., Valletta A., Segalini A., Roncella R. Low-Cost Techniques for Soil Erosion Monitoring on Mountain Trails // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2024. Vol. XLVIII-2/W8-2024. P. 53–60. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W8-2024-53-2024.

19. Solov`eva E. N., Babina S. G. Praktika primeneniya pravil rascheta predel`no dopustimoj rekreacionnoj emkosti na territorii Pribajkal`skogo nacional`nogo parka // 2024. Vy`p. 8. S. 232–241. DOI: 10.55959/MSU012129-2-2024-8-232-241.

Статья поступила в редакцию 06.08.2026; одобрена после рецензирования 03.09.2026; принята к публикации 12.10.2026.

The article was submitted 06.08.2026; approved after peer review 03.09.2026; accepted for publication 12.10.2026.

CONTENTS

1.6.13. Economic, social, Political and recreational Geography 9

Gakaev R. A., Stashko A.V. A METHODOLOGICAL FRAMEWORK FOR ASSESSING SPATIAL ACCESSIBILITY AND DISTRIBUTIVE JUSTICE OF URBAN GREEN SPACES IN MOSCOW 9

Voronina Yu. S. BARRIER AND CONTACT FUNCTIONS OF THE RUSSIAN-CHINESE STATE BORDER: SPATIAL ASSESSMENT OF CROSS-BORDER INTEGRATION OF BLAGOVESHCHENSK AND HEIHE 39

Streltsov M. A. MIGRATION NETWORKS AND HUMAN CAPITAL LEAKAGE FROM RUSSIAN REGIONS 73

Gatsaeva L. S., Tatarintsev S. A. ACCESSIBILITY OF THE MEDICAL INFRASTRUCTURE OF PERIPHERAL TERRITORIES IN THE CONTEXT OF TERRITORIAL JUSTICE 91

1.6.21. Geoecology 110

Pryadilina A.V., Golovan E. V. GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF POST-FIRE PINE FOREST RECOVERY IN THE TUNKA DEPRESSION USING PUBLISHED SATELLITE AND FIELD DATA 110

Khotyanovskaya Yu. V. DIFFUSE REMOVAL OF BIOGENIC ELEMENTS AND EUTROPHICATION OF WATER OBJECTS IN THE RIVER BASIN... 141

Sedykh V. A. INFLUENCE OF HOLLOW RELIEF AND TEMPERATURE INVERSIONS ON THE ACCUMULATION OF POLLUTANTS IN THE SURFACE LAYER OF THE ATMOSPHERE OF KRASNOYARSK 160

Topchaya V. Y. GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF RECREATIONAL DIGRESSION OF COASTAL LANDSCAPES OF OLKHON ISLAND BY THE GRADIENT OF TOURIST LOAD 188