ISSN 2410-8553

2026

Том 12, № 2

ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

PERM STATE UNIVERSITY

АНТРОПОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

ANTHROPOGENIC TRANSFORMATION OF NATURE

Volume 12, Issue 2

ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Антропогенная трансформация природной среды

Рецензируемый научный журнал

Том 12, № 2
2026

PERM STATE UNIVERSITY

Anthropogenic Transformation of Nature

Peer reviewed scientific journal

Volume 12, Issue 2
2026

Пермский государственный национальный исследовательский университет

Антропогенная трансформация природной среды

Рецензируемый научный журнал

В журнале рассматриваются геоэкологические проблемы, научные результаты исследований взаимодействия человека и природы.
Журнал включен в национальную информационно-аналитическую систему «Российский индекс научного цитирования».
Миссия журнала – распространение результатов исследовательской деятельности российских и зарубежных ученых в области изучения антропогенной трансформации природной среды, геоэкологии.
В журнале публикуются работы по трем тематическим разделам: Трансформация природной среды; Сохранение природной среды; Палеоэкология и палеогеография.
Журнал принимает к публикации: оригинальные и обзорные статьи, а также краткие сообщения.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Сергей Алексеевич Бузмаков, д-р геогр. наук,
Пермский государственный национальный исследовательский университет

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР

Павел Юрьевич Санников, канд. геогр. наук,
Пермский государственный национальный исследовательский университет

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕКРЕТАРЬ

Юлия Владимировна Хотяновская, канд. геогр. наук,
Пермский государственный национальный исследовательский университет

КОМПЬЮТЕРНАЯ ВЕРСТКА

Светлана Денисовна Мельникова,
Пермский государственный национальный исследовательский университет

ДИЗАЙН

Павел Юрьевич Санников, канд. геогр. наук,
Пермский государственный национальный исследовательский университет

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Валентина Сергеевна Артамонова, д-р биол. наук
Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
Александр Николаевич Бармин, д-р геогр. наук,
Астраханский государственный университет
Елена Ильинична Голубева, д-р биол. наук,
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Дарья Олеговна Егорова, д-р биол. наук,
Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН
Маргарита Михайловна Редина, д-р эконом. наук,
Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
Андрей Владимирович Соромотин, д-р биол. наук,
Тюменский государственный университет
Юрий Александрович Федоров, д-р геогр. наук,
Южный федеральный университет,
Александр Петрович Хаустов, д-р геол.-мин. наук,
Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
Вера Павловна Чижова, канд. геогр. наук,
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Андрей Николаевич Шихов, д-р геогр. наук,
Пермский государственный национальный исследовательский университет
Людмила Сергеевна Шумиловских, канд. биол. наук,
Гёттингенский университет имени Георга-Августа

ISSN	2410-8553
Периодичность	2 раза в год
Учредитель и издатель	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»
Адрес учредителя, издателя и редакционной коллегии	614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15
Сайт	https://press.psu.ru/index.php/atps/
Email	ant.tr.nat@gmail.com
Типография	Типография ПГНИУ
Адрес типографии	614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15. Тел: +7 (342) 239 65 47
Распространение	Распространяется бесплатно
Тираж	100 экз.
Заказ	129
Подписано в печать	30.10.2026
Дата публикации	10.11.2026

© Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2026

Perm State University

Anthropogenic Transformation of Nature

Peer reviewed scientific journal

Addressed to geoecological problems, scientific questions of interaction of Man and Nature. Articles on a geoecological, geographical, ecosystem, biogeochemical, biological and palaeoecological basis are preferred.
The Journal is included in the Russian Index of Scientific Citation
The Journal's mission is to disseminate the newest scientific knowledges of Russian and foreign scientists in the study of anthropogenic transformation of nature and geoecology.
The Journal publishes papers in three thematic sections: Nature and Landscape Conservation; Pollution; Earth-Surface Processes
The Journal publishes: original papers, review papers and short communications articles.

EDITOR-IN-CHIEF

Sergei A. Buzmakov, Doctor of Sciences in Geography, Perm State University

EXECUTIVE EDITOR

Pavel Yu. Sannikov, PhD in Geography, Perm State University

TECHNICAL SECRETARY

Yulia V. Khotyanovskaya, PhD in Geography, Perm State University

COMPUTER LAYOUT

Svetlana D. Melnikova, Perm State University

DESIGN

Pavel Yu. Sannikov, PhD in Geography, Perm State University

EDITORIAL BOARD

Valentina S. Artamonova, Doctor of Sciences in Biology, Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS

Alexander N. Barmin, Doctor of Sciences in Geography, Astrakhan State University

Elena I. Golubeva, Doctor of Sciences in Biology, Lomonosov Moscow State University

Darya O. Egorova, Doctor of Sciences in Biology, Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms UB RAS

Margarita M. Redina, Doctor of Economic Sciences, Patrice Lumumba People's Friendship University

Andrey V. Soromotin, Doctor of Sciences in Biology, University of Tyumen

Yuri A. Fedorov, Doctor of Sciences in Geography, Southern Federal University

Alexander P. Khaustov, Doctor of Sciences in Geology, Patrice Lumumba People's Friendship University

Vera P. Chizhova, PhD in Geography, Lomonosov Moscow State University

Andrey N. Shikhov, Doctor of Sciences in Geography, Perm State University

Lyudmila S. Shumilovskikh, PhD in Biology, Georg-August-University of Göttingen

ISSN	2410-8553
Publication Frequency	Semiannually
Founder and Publisher	Perm State University
Postal address	15, Bukireva street, Perm, 614068, Russia
Website	https://press.psu.ru/index.php/atps/
Email	ant.tr.nat@gmail.com
Printing House	Printing house of PSU
Postal address of Printing House	15, Bukireva str., Perm, 614068, Russia. Phone: +7 (342) 239 65 47
Subscription	Free distribution
Circulation	100 copies.
Order	129
Signed to press date	30.10.2026
Release date	10.11.2026

© Perm State University, 2026

Содержание

Раздел 1. СОХРАНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

ОРИГИНАЛЬНАЯ (ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ) СТАТЬЯ
Андреева И.В. Рыбкина И.Д. Экотуристский каркас как экологический ориентир в развитии туризма на Алтае...7

ОРИГИНАЛЬНАЯ (ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ) СТАТЬЯ
Соловьева Е.Н., Рыжов Ю.В., Штельмах С.И. Сезонное содержание Cu, Zn, Pb в придорожных почвах острова Ольхон (2023-2025 гг.) 19

Раздел 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

ОРИГИНАЛЬНАЯ (ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ) СТАТЬЯ
Алтухов М.И., Медведков А.А. Геоэкологическое зонирование Норильского промышленного района для управления рисками освоения его территории 26

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ
Иванов Р.Э. Оценка техногенного воздействия добычи нефти и газа на природную среду по данным ДЗЗ: обзор исследований 34

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ
Костылева Н.В. Проблема методического обеспечения расчета вреда атмосферному воздуху от взрывов и пожаров, вызванных военными действиями 48

ОРИГИНАЛЬНАЯ (ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ) СТАТЬЯ
Цешковская Е.А., Цой Н.К., Голубева Е.И., Цешковский В.М., Карсанова Л.М., Матонин В.В. Эколого-экономическое сопровождение промышленных объектов как инновационный инструмент управления..57

Contents

Section 1. NATURE AND LANDSCAPE CONSERVATION

ORIGINAL PAPER
Andreeva I.V., Rybkina I.D. Ecotourism framework as an ecological reference point in the development of tourism in Altai 7

ORIGINAL PAPER
Solovyova E.N., Ryzhov Yu.V., Shtelmakh S.I. Seasonal content of Cu, Zn, and Pb in roadside soils on Olkhon Island (2023-2025) 19

Section 2. POLLUTION

ORIGINAL PAPER
Altukhov M.I., Medvedkov A.A. Geoecological zoning of the Norilsk industrial region to manage territorial development risks 26

REVIEW PAPER
Ivanov R.E. Assessment of the anthropogenic impact of the oil and gas industry on the natural environment based on remote sensing data 34

SHORT COMMUNICATIONS ARTICLE
Kostyleva N.V. The problem of methodological support for calculating damage to atmospheric air by explosions and fires caused by military actions 48

ORIGINAL PAPER
Tseshkovskaya Ye.A., Tsoy N.K., Golubeva E.I., Tseshkovskiy V.M., Karsanova L.M., Matonin V.V. Environmental and economic support for industrial facilities as an innovative management tool 57



Представленные работы поражают глубиной проработки и свежестью идей.

Исследование И.В. Андреевой и И.Д. Рыбкиной может стать настоящим открытием в области экотуризма на Горном Алтае. Авторы не просто выявляют конфликты при выборе формата экотуризма на охраняемых территориях, но и предлагают изящное, компенсаторное решение в форме экотуристского каркаса. Экотуризм рассмотрен как сложная природно-социально-экономическая среда, а каркас как отраслевая и территориальная структура. Для Алтайской краевой части разработана оригинальная архитектура регионального каркаса. Это исследование отличается редкой концептуальной ясностью и практической ценностью.

Работа Е.Н. Соловьевой, Ю.В. Рыжова и С.И. Штельмах впечатляет точностью и экологической остротой. Изучение накопления тяжелых металлов в верхних горизонтах придорожных почв выполнено на высоком уровне: определены концентрации Pb, Zn, Cu, выявлена сезонная изменчивость. Высокие уровни в песчаных почвах убедительно указывают на антропогенное происхождение. Данные о трансформации почв на границах парка звучат как тревожный сигнал и требуют пересмотра регламента маршрутов. Исследование выполнено с завидной методической строгостью.

Исследование М.И. Алтухова и А.А. Медведкова можно считать прорывом в оценке уязвимости территории Норильского района к освоению в условиях потепления климата. Составлена карта уязвимости с четырьмя категориями, показана мозаичная структура этого явления. Наименее уязвимы трапповые массивы, наиболее – озёрные и речные террасы. Авторы убедительно доказывают необходимость системы индикаторов для мониторинга криогенных геосистем. Работа отличается оригинальностью пространственного анализа и высокой прогностической значимостью.

Обзор Р.Э. Иванова по методам дистанционного зондирования для оценки воздействия нефтегазодобычи содержит много современных решений. Рассмотрены критерии дешифрирования битумизации, галогенеза, механогенеза и атмосферного загрязнения. Для нефтяных загрязнений почв информативен NDVI, на воде снимки Sentinel-1, для засоления применяется NDSI, механогенез оценивается по SAVI, NDVI, NDBI, BSI, а мониторинг атмосферы включает выявление метана и сажи.

Работа Н.В. Костылевой привлекает смелостью и актуальностью. Анализ методического обеспечения расчёта вреда атмосферному воздуху при военных действиях как тема исключительно сложная, но автор блестяще проанализировал 17 методик и сделал принципиально важный вывод о необходимости совершенствования нормативной базы. Исследование отличается критической глубиной и гражданской ответственностью.

Исследование Е.А. Цешковской, Н.К. Цой, Е.И. Голубевой, В.М. Цешковского, Л.М. Карсановой и В.В. Матонина представляет собой образец эколого-экономического сопровождения промышленных объектов. Актуальность работы подчёркнута переходом к превентивному управлению рисками и внедрению наилучших доступных технологий. Трёхэтапная модель сопровождения исследована с исключительной тщательностью. Предложенный показатель эффективности «зелёных» решений оригинален и практичен, а вывод о том, что внедрение НДТ снижает экологические риски и издержки, звучит убедительно и вдохновляюще.

Все представленные статьи объединяет редкое сочетание научной строгости, оригинальности замысла и высокой практической отдачи. Это существенный вклад в геоэкологию, сохранение природы, природопользование и устойчивое развитие.

Главный редактор, С.А. Бузмаков

Раздел 1. СОХРАНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Оригинальная (исследовательская) статья
УДК 502.5; 504.062
https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-7-18
https://elibrary.ru/hogxyn

Экотуристский каркас как экологический ориентир в развитии туризма на Алтае

Ирина Владимировна Андреева ✉, **Ирина Дмитриевна Рыбкина**
Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия
✉ direction-altai@yandex.ru

Аннотация. Постановка научной проблемы и её актуальность. Исследование посвящено вопросам системного развития экологического туризма (экотуризма). На примере экотуристской локации Горный Алтай обозначены конфликты, заложенные выбором формата экотуризма на территории сохраняемого природного наследия. Предложена компенсаторная территориально-управленческая структура для их нивелировки – экотуристский каркас. Материал и методы. Теоретические построения основаны на результатах обобщения и анализа положений системных и каркасных концепций в геоэкологии, туризме и рекреации, заповедном деле. Больше чем в 4,4 тыс. источников обнаружены идеи, полезные для каркасной теории экотуризма. Среди них как фундаментальные разработки рекреационной географии Б.Б. Родомана, А.И. Зырянова, В.М. Котлякова, В.И. Кружалина, Л.Ю. Мажар, так и поисковые мультидисциплинарные рассуждения о разных формах природообусловленных каркасных структур: ландшафтно-экологических, эколого-рекреационных, природно-рекреационных. Результаты и их обсуждение. Переосмысление их позволило рассмотреть систему экотуризма как природно-социально-экономическую среду для ведения экотуристской деятельности, а экотуристский каркас – как отраслевую и территориальную структуру, состоящую из физических объектов различных природообусловленных каркасов (природного, туристско-рекреационного, экологического). Узловые точки каркаса концентрируют ресурсы разной природы и при смене масштаба (от локального к региональному и межрегиональному) демонстрируют многоуровневость и дублирующее устройство пространственной организации: от объектов «*in situ*» (фокусных точек) до особо охраняемых природных территорий (ООПТ) и их групп в одной природной или туристско-ресурсной зоне. Кинетическая роль в каркасе отведена разноуровневой линейной инфраструктуре: экотропам, путепроводным отрезкам рек, участкам федеральных и региональных трасс, соединяющим региональные и районные центры. На основе теоретических рассуждений для Алтайской краевой части туристского региона Горный Алтай предложена архитектура регионального экотуристского каркаса, выполнено фактическое наполнение разработанных и рекомендуемых к реализации структур.

Ключевые слова: экологический туризм (экотуризм), система экотуризма, программирование экотуризма, управление экотуризмом, элементы экотуристского каркаса

Для цитирования: Андреева И.В. Рыбкина И.Д. Экотуристский каркас как экологический ориентир в развитии туризма на Алтае // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2026. Т. 12. № 2. С. 7-18. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-7-18. EDN HOGXYN.

Section 1. NATURE AND LANDSCAPE CONSERVATION

Original Paper

Ecotourism framework as an ecological reference point in the development of tourism in Altai

Irina V. Andreeva ✉, **Irina D. Rybkina**
Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia
✉ direction-altai@yandex.ru

Abstract. Relevance and problem formulation. The study is devoted to issues related to the systematic development of ecological tourism (ecotourism). Using the example of the ecotourism location in the Altai Mountains, the conflicts inherent in choosing the format of ecotourism in a territory of preserved natural heritage are identified. A compensatory territorial and managerial structure for mitigating these conflicts – an ecotourism framework – is proposed. Materials and Methods. The theoretical constructs are based on the results of generalizing and analyzing the provisions of systemic and framework concepts in geoecology, tourism and recreation, and nature conservation. Ideas useful for the framework theory of ecotourism have been identified in more than 4,400 sources. Among them are both the fundamental

© Андреева И.В., Рыбкина И.Д., 2026

developments in recreational geography by Boris Rodoman, Aleksandr Zyrianov, Vladimir. Kotlyakov, Viktor Kruzhalin, and Larisa Mazhar, as well as exploratory multidisciplinary reflections on landscape-ecological, ecological-recreational, and natural-recreational framework structures. Results and discussion. Rethinking them made it possible to view the ecotourism system as a natural, socio-economic environment for carrying out ecotourism activities. The ecotourism framework is considered as an industry – and territorial structure consisting of physical objects of various nature-driven frameworks (natural, tourist-recreational, ecological). The key points of the framework concentrate resources of different natures. When the scale changes from local to regional and interregional, they demonstrate multi-level structure and a duplicative spatial organization. At the local level, the framework includes «*in situ*» objects (focal points); at the regional and interregional levels, it includes protected areas (PA) and groups of such areas within a single natural or tourist-resource zone. The kinetic role in the framework is assigned to multi-level linear infrastructure. These are eco-trails, river crossing sections, and sections of federal and regional highways connecting regional and district centres. Based on theoretical reasoning, an architecture of a regional ecotourism framework has been proposed for the Altai regional part of the Gorny Altai tourist region. The actual implementation of the developed and recommended structures has been carried out.

Keywords: ecological tourism (ecotourism), ecotourism system, ecotourism programming, ecotourism management, elements of the ecotourism framework

For citation: Andreeva I.V., Rybkina I.D. Ecotourism framework as an ecological reference point in the development of tourism in Altai. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2026. Vol. 12. Iss. 1. P. 7-18. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-7-18. EDN HOGXYN. (in Russian)

Введение

Алтай – географически (Алтайские горы) и политико-административно (Большой Алтай) устойчивое понятие, применяемое к горной системе на юге Сибири и в Центральной Азии. Сибирская часть Алтая административно поделена между регионами России: Алтайским краем, республиками Алтай и Тыва. Центрально-Азиатская – принадлежит Казахстану, Китаю и Монголии. В статье речь пойдет о той части горной страны, которая понимается под Алтаем в контексте российского туризма. Она локализована в границах горной части Алтайского края (преобладающая часть которого равнинная) и Республики Алтай (целиком горная). В плане туризма Алтайский край и Республика Алтай осваивались и развиваются как единая локация, в местной (южносибирской) топонимике именуемая Горным Алтаем.

Крупные государственные проекты по превращению Алтая в общероссийский туристский регион стартовали в 2005 г. с создания особых экономических зон туристско-рекреационного типа (ОЭЗ ТРТ) «Бирюзовая Катунь» в Алтайском крае[1,2] и «Алтайская долина» в Республике Алтай[3]. Первая действует и развивается и поныне. По данным Управления Алтайского края по развитию туризма и курортной деятельности на 3,3 тыс. га «Бирюзовой Катуни» зарегистрировано 33 резидента с заявленным инвестиционным капиталом 24,1 млрд руб. и общим номерным фондом 1150 мест. В 2023 г. ее посетили свыше 550 тыс. туристов[4]. Вторая, исчерпав 8 млрд руб. государственных инвестиций и 13-15 млрд руб. привлеченного частного капитала, преодолев лишь этап проектирования, прекратила свое существование в 2016 г.[5]

На месте последней остались точечные проекты, в том числе всесезонный горнолыжный спортивно-оздоровительный комплекс «Манжерок» на одноименном озере в 36 км от столицы республики – города Горно-Алтайска. Концептуальные, архитектурные и технические решения, прошедшие процедуру оценки воздействий проекта на окружающую среду в рамках «Алтайской долины» в 2007 г., унаследованы современной инфраструктурой курорта «Манжерок», развиваемого ныне Сбербанком. В строительство комплекса на территории площадью 1,65 тыс. га, по словам Г. Грефа, на сегодняшний день вложено 130 млрд руб., создано 400 номеров уровня 3 и 5 звезд, проложено 50 км горнолыжных трасс и 13,5 км экотроп[6, 7]. Площадь застройки (гостиницы, парковки, сервис, спортивные и технические сооружения) составляет 180,5 га.

«Бирюзовая Катунь» и «Манжерок» располагаются в 7 км друг от друга на разных берегах реки Катунь. Они являются ядрами региональных программных

[1] О создании на территории Алтайского края особой экономической зоны туристско-рекреационного типа: постановление Правительства Российской Федерации № 69 от 03.02.2007.

[2] Об особых экономических зонах: федеральный закон РФ № 116-ФЗ от 22.07.2005.

[3] О создании на территориях муниципального образования «Майминский район» и муниципального образования «Чемальский район» Республики Алтай особой экономической зоны туристско-рекреационного типа: постановление Правительства Российской Федерации № 67 от 03.02.2007.

[4] Более 550 тысяч туристов посетили особую экономическую зону туристско-рекреационного типа «Бирюзовая Катунь» в 2023 году [Электронный ресурс]. URL: https://tourism.alregn.ru/upravlenie/press-sluzhba/novosti/bolee-550-tysyauristov-posetili-osobuyu-ekonomicheskuyu-zonu-turistsko-rekreatsionnogo-tipa-biryu/ (дата обращения: 29.05.2026).

[5] О досрочном прекращении существования особых экономических зон: постановление Правительства Российской Федерации № 978 от 28.09.2016.

[6] Греф презентовал Путину новый курорт в Горном Алтае [Электронный ресурс]. URL: https://yandex.ru/video/preview/4241742622130606978 (дата обращения: 29.05.2026).

[7] Карта курорта. Летний сезон 2025 [Электронный ресурс]. URL: https://манжерок.рф/uploads/images/page/he8h0jHtOnazGw5xeCcZI2ixouvMej3iuVwtvrPr.jpg (дата обращения: 29.05.2026).

[8] Об утверждении Положения и границ памятника природы республиканского значения «Озеро Манжерокское»: приказ Министерства природных ресурсов, экологии и туризма Республики Алтай № 416 от 06.05.2019.

концептов в области туризма и формируют единый трансрегиональный туристский продукт с высочайшей за Уралом степенью благоустроенности и сервиса. За пределами обозначенной локации в обоих регионах имеется ряд более мелких туристско-рекреационных местностей с менее развитой инфраструктурой. Все они преимущественно сосредоточены вдоль главной туристкой оси региона – параллельно идущих Чуйского тракта и реки Катунь – и транспортных ответвлений на курорт Белокуриху (Алтайский край), Чемал и внутренние районы Алтая (Республика Алтай).

В июле 2025 г. в Республике Алтай под эгидой Правительства России и участии делегаций 8 стран (Россия, Армения, Беларусь, Казахстан, Киргизия, Таджикистан, Туркменистан, Узбекистан) прошел международный экологический форум. На нем обсуждались вопросы трансграничного сохранения водных ресурсов, флоры и фауны, развития экологического туризма. В рамках туристской тематики как флагманский проект представлен всесезонный курорт «Манжерок». Создаваемая для него инфраструктура презентовалась как экологически и этнически дружественная.

По словам Г. Грефа, на развитие курорта в дополнение к потраченным 130 млрд руб. планируется добавить минимум столько же. Номерной фонд предполагается увеличить с нынешних 400 до 5 тыс. номеров (1500 – уровня три звезды, 1000 – четыре звезды, 3000 – пять звезд), не считая двухзвездочных глэмпингов на сопредельных территориях. Длину горнолыжных трасс планируется довести до 250 км, вооружив трассы 870 снежными пушками и продлив горнолыжный сезон сверх 150 дней. Эти параметры сделают «Манжерок» самым большим горнолыжным курортом в стране и самым энерговооруженным в мире.

Кроме того, природное озеро Манжерокское – ядро территории и с 1978 г. по настоящее время памятник природы республиканского значения[8], целью создания которого заявлено сохранение уникального природного комплекса в естественном состоянии, по словам руководителя Сбербанка, очищено. На его побережье строятся 3-х километровый променад и пять зон с 13 шале в антураже стран Большого Алтая. С запуска международного терминала в аэропорту Горно-Алтайска и начала безвизового обмена туристскими группами (Россия–Китай, Россия-Иран) планируется загрузка курорта в 2,5 млн гостей в год, а численность персонала – до 15 тыс. человек[9, 10].

Озвученные проектные решения трудно представить (вовсе невозможно) в концепте экологического туризма. Из зонтичного определения следует, что «*экологический туризм (экотуризм) – путешествия по девственным, либо малоизмененным ландшафтам, с целью наслаждения их красотой, знакомства с объектами, обитателями и явлениями природы, в ходе которых негативное влияние на природу отсутствует, либо сведено к минимуму*» (Дорофеев, 2025). Иными словами, экотуризм – явление преимущественно созерцательное. Очевидно, что туризм, продвигаемый в ключевых локациях Алтая, диаметрален экотуризму.

При этом экосистемная значимость, уникальность, разнообразие и исключительная сохранность горных ландшафтов Алтая, а также неизбежность их дальнейшего преобразования (включая ландшафт памятника природы «Озеро Манжерокское») обязывают к введению хотя бы на сопредельных территориях балансировочного механизма с функциями нивелировки вмешательств в природную среду. Таковым может выступать экотуристский каркас – комплекс территорий и объектов для специфичной формы рекреационного природопользования – экологического туризма. В статье представлен авторский взгляд на экотуристский каркас и его региональную архитектуру.

Материалы и методика

Комплексный характер исследования, сочетающий теоретико-методические и практические разработки, предопределил выбор материалов и методов. Построение концепции экотуристского каркаса потребовало обобщения теоретических представлений о природообусловленных каркасах (протокаркасах): природном, экологическом и туристско-рекреационном. Для этого среди массива русскоязычных научных работ (электронная библиотека eLibrary) проведен поиск по ключевым словам: экологический туризм, экологический каркас, природно-экологический каркас, туристско-рекреационный каркас и смежным. Всего отобрано более 4 тыс. источников.

В анализе источников применен междисциплинарный подход, а также положения и комплекс методов геоэкологии и рекреационной географии. С их помощью обобщена первичная теоретическая информация и разработаны основы формируемой научной парадигмы. С позиции системности проанализированы композиционные, функциональные и планировочные элементы, применяемые в проектировании протокаркасов, разработана типовая модель экотуристского каркаса.

Экспертным методом определена толерантность структур разнотипных каркасов в рамках экотуризма. Структуры протокаркасов оценены на сопоставимость и способность взаимно усиливать эффект от управленческих технологий, прогнозирования, планирования и программирования экотуризма.

В практической части исследования проанализированы элементы природного, экологического и туристско-рекреационного каркасов Алтайского края, установлены взаимосвязи между блоками и внешние взаимосвязи природоохранных территорий и объектов с туристско-рекреационными ресурсами. Разработан вариант региональной организации экотуризма и его отраслевая территориальная структура. Предложен комплекс ресурсов экотуризма, экологических маршрутов (экомаршрутов), центров и зон природного туризма, отвечающий сущностным положениям зонтичного определения.

[9] Герман Греф о новом горнолыжном курорте на Алтае [Электронный ресурс]. URL: https://yandex.ru/video/preview/3042678858410132428 (дата обращения: 29.05.2026).

[10] Курорт Манжерок будет принимать более 2,5 млн туристов в год – Греф [Электронный ресурс]. URL: https://yandex.ru/video/preview/4688584375429751467 (дата обращения: 29.05.2026).

Результаты и их обсуждение

Как специфичная институция экологический туризм рассмотрен одновременно с нескольких ракурсов: как собственно системное образование и как контактная область региональных туристско-рекреационной и природоохранной систем. Парадигма его основана на системных концепциях туризма и особо охраняемых природных территорий, теории функционального зонирования природоохранных территорий, положениях о туристско-рекреационном каркасе, разработках по дифференциации форм и видов туризма на ООПТ. Необходимую научную новизну создаваемым конструктам обеспечила специфика объекта исследования: от сущностных характеристик до территориальных отношений с ООПТ (Андреева и др., 2025). При этом в исследовании природно-экологические условия и туристско-рекреационная специфика Алтая не позволили жестко связать экологический туризм с особо охраняемыми природными территориями. Экосистемная значимость региона, высокая доля сохранных природных ландшафтов, плотность и разветвленность природоориентированных туристских потоков потребовали расширить географию и функции экотуризма за границы сети ООПТ.

Очерчен круг и уточнен ряд понятий. Помимо самого «экологического туризма», общепризнанных дефиниций «познавательный туризм», «особо охраняемая природная территория» и ее категориальные единицы, «экологический тур (программа)», «туристско-рекреационная тропа (экологическая тропа)» и других, согласованных с национальными госстандартами в области экотуризма, предложены определения:

- «система экотуризма» – природно-социально-экономическая среда для осуществления экотуристской деятельности; взаимосвязанная совокупность ресурсов экотуризма, объектов туристской индустрии и акторов туризма, в том числе специфично мотивированных потребителей;

- «экотуристский каркас ООПТ» – синтетическая модель природобусловленных протокаркасов (природного, туристско-рекреационного, экологического); отраслевая и территориальная структура, сформированная физическими объектами: центрами, зонами и местностями природного туризма, экологическими маршрутами, принимающими, обслуживающими и распределяющими турпотоки между населенными пунктами, элементами транспортной и управляющей инфраструктуры; инструмент регулирования экотуризма, специализированная структура для практики территориального планирования и развития территорий;

- «экологический тур (экотур)» – посещение ООПТ, их окрестностей и других природных местностей для осмотра достопримечательностей;

- «экотуристская программа» – комплекс логически и логистически взаимоувязанной краеведческой информации, преподносимой экотуристу в рамках экологического тура (экотура);

- «экологический маршрут (экомаршрут)» – путь следования группы или туриста по программе экотура, носитель регионально-контекстной (географически репрезентативной) информации и туристских предложений;

- «экологическая тропа (экотропа)» – элемент туристской инфраструктуры на ООПТ, обеспечивающий пребывание и перемещение посетителей на территории;

- «природная тропа» – пути пешего маршрутного передвижения по природной территории.

Рассуждения о пространственной основе экотуризма построены на представлениях о туристском пространстве[11] А.Н. Дунца (2015), А.И. Зырянова (2005), В.М. Котлякова с соавторами (2020), В.И. Кружалина и Л.Ю. Мажар (Кружалин, Мажар, 2023; Мажар, 2014), А.И. Тарасенка (2010). Об экотуристском каркасе – на актуальной теории и методологии природообусловленных каркасов: природного (ландшафтного), экологического в представлении А.В. Елизарова (2008), П.П. Каваляускаса[12], Б.Б. Родомана (1984), Н.В. Стоящевой (2012) и туристско-рекреационного в изложении Д.В. Амелькиной (2020), Д.М. Астанина (2017), В.П. Преображенского с соавторами[13]. Так, экотуристское пространство определено как составная часть геопространства, включающая девственные или малоизмененные информационно насыщенные геосистемы (как пространственная, идеологическая и мотивационная основа) и элементы туристско-рекреационной среды (как необходимая в обществе потребления основа сервиса, территориальной организации и управления). С одной стороны, такое представление связало базовую мотивировочную материальную основу экотуризма как сложного географического явления с геосистемой и обеспечило возможности для геосистемного анализа в его познании. С другой – погрузило экотуризм в привычную для социально-ориентированной деятельности инфраструктурно-обслуживающую среду и соответствующие методы изучения и планирования.

В экотуристском каркасе конструкты протокаркасов не суммированы механически, а показаны как синтез концептов и элементов каркасов в приложении к экотуризму в понимании, близком к зонтичному (Дорофеев, 2025). Он состоит из узловых точек с концентрацией ресурсов разной природы: ландшафтов и их участков, природных и других достопримечательностей – элементов природного каркаса, населенных пунктов, объектов рекреационной инфраструктуры и сервиса – элементов туристско-рекреационного каркаса. Взаимная интеграция каркасов учитывает разнородность их элементов, но закрепляет приоритет за

[11] Пирожник И.И. Структурно-функциональные особенности рекреационного пространства и формирование туристского продукта Беларуси // Туризм и региональное развитие / отв. ред. Л.Ю. Мажар. Смоленск: Универсум, 2008. С. 124-136.

[12] Каваляускас П. Геосистемная концепция планировочного природного каркаса // Теоретические и прикладные проблемы ландшафтоведения: тезисы XIII Всесоюзного совещания по ландшафтоведению. Л.: ГО АН СССР, 1988. С. 102-104.

[13] Об особо охраняемых природных территориях: федеральный закон №33-ФЗ от 14.03.1995.

элементами природного каркаса – геосистемами и их компонентами – ввиду мотивационной первоосновы и правового природоохранного статуса территории (Зырянов, 2018; Исаченко, 2016). При утрате или отсутствии статуса, а также при недостаточности режимных ограничений (как в заказнике или памятнике природы), значимость геосистем сохраняется по причине их хронологического первенства и большей устойчивости во времени по сравнению с создаваемыми на них социально-экономическими конструктами.

В зависимости от состава и концентрации функций эти элементы имеют разный уровень, иерархически соподчинены и взаимосвязаны транспортными (преимущественно автомобильными (Родоман, 2021)) путями и программными маршрутами на региональном уровне, тропами и экскурсионными программами – на локальном (табл. 1 / tabl. 1). Каждый из элементов включен в экотуристский каркас с учетом изначальной соподчиненности каркасов между собой, места и роли элемента в изначальном каркасе.

Таблица 1

Элементы территориальных конструктов экотуризма

Table 1

Elements of ecotourism territorial constructs

Типовые блоки элементов // Standard element blocks	*Элементы // Elements*	
	Системы экотуризма // Ecotourism systems	*Экотуристского каркаса // Ecotourism framework*
Ресурсы // Resources	Природное разнообразие и своеобразие; экологическое качество ландшафтов // Natural diversity and uniqueness; ecological quality of landscapes	Зоны и центры (участки) природного туризма; природные и культурные достопримечательности // Zones and centers (areas) of natural tourism; natural and cultural attractions
Индустрия и инфраструктура // Industry and infrastructure	Совокупность средств размещения, обслуживания, развлечений и информирования // A set of accommodation, service, entertainment, and information facilities	Индивидуальные объекты размещения и обслуживания экотуристов, в т.ч. автодороги, экологические и природные тропы // Individual accommodation and service facilities for ecotourists, including roads, ecological and nature trails.
Управление, организация и потребление // Management, organization, and consumption	Потенциалы социально-демографический, административный и предпринимательский; потребительская активность // Socio-demographic, administrative, and entrepreneurial potentials; consumer activity	Программы экотуров, маршруты; экотуристская емкость экологических и природных троп // Ecotourism programs, routes; ecotourism capacity for ecological and natural trails

Особенна роль экологического каркаса в создаваемом конструкте. Она заложена в многоуровневости и дублирующем устройстве пространственной организации. Верхний уровень обусловлен региональными отраслевыми структурами: ООПТ и целепригодными ландшафтами, населенными пунктами и иными локациями туризма и рекреации. Его физическая (материальная) основа – совокупность ООПТ – определяет укрупненную пространственную схему. За век формирования национальной природоохранной системы ООПТ распределились в регионах практически равномерно. Для экотуризма это обеспечивает максимальную природную представленность, а также доступность для потребителя и организаторов через системы расселения и транспорта.

Ниже следует уровень групп ООПТ со схожими условиями, располагающимися в одной природной или туристско-ресурсной зоне. Группа ООПТ выступает здесь как специальная компенсаторная структура (буфер, экологический каркас), обеспечивающая экологическую безопасность (приемлемость) рекреационных практик при их организации на ООПТ. Отдельные ООПТ в группе, повторяющиеся элементы ландшафтов, подобные достопримечательности служат дубликатами для снижения рекреационной нагрузки за счет сходства ресурса и реверса турпотоков.

Конфигурацию локальной пространственной организации определяют объекты «*in situ*» – фокусные (наиболее впечатляющие) точки с оптимальным сочетанием ресурсов и придающие маршруту логическую завершенность. В ней сочетаются элементы протокаркасов: природного (ядрами в нем служат типичные, уникальные, экосистемно и экологически значимые природные комплексы и объекты, коридорами – пути миграции вещества и биоты), туристско-рекреационного (ядра – объекты туризма и экскурсионных программ, коридоры – маршруты и тропы) и экологического (ядра – дублирующие туристские объекты, коридоры – альтернативные (компенсаторные) маршруты). Пространственно-функциональную уникальность экотуризма обеспечивает расширение классической туристско-рекреационной модели сферой природоохранного производства: специфичными производственными доминантами (объекты или процессы) вне заповедного ядра, но соответствующие ему по сути и содержанию.

Акцентна роль водных объектов в пространственном каркасе экотуризма. В общих туристско-рекреационных практиках отдых у водоема или реки доминирует в структуре современных рекреационных предпочтений. Водные объекты, где бы они не располагались: на ООПТ или вне их, фокусируют внимание отдыхающих и в зависимости от содержания деятельности предстают в совокупности разных качеств: медико-биологических, пейзажно-эстетических, информационно-познавательных. В пределах и вблизи населенных пунктов превалирует пляжный и пикниковый отдых. На ООПТ туристские потоки четко локализуются в пределах русел рек, пойм и надпойменных террас, коренных склонов и прибрежных скал (Мышлявцева, 2019). В этой связи принципиально содержательное разграничение туристских активностей с ними связанных.

Так, абсолютно недопустима деятельность промысловая (добыча биоты, сбор коллекций и т.д.) и вносящая возмущения в природную среду (пикник, купание и т.д.). Исключительными видами использования являются транзитное перемещение по специальным маршрутам и тропам, знакомство, наблюдение и познание окружения. В отличие от селитебных и приближенных к ним пространств, где в выборе водного объекта для отдыха превалируют медико-биологические и геолого-геоморфологические (с позиции комфортности для человека) характеристики, на особо охраняемых и иных природных территориях первостепенны пейзажно-эстетические, геолого-геоморфологические, гидрологические и почвенно-биологические условия (с позиции типичности и уникальности, наглядности и удобства перемещения), их символизм. Таким образом, водные объекты в экотуризме на ООПТ служат либо информационной целью путешествия (фокусными точками), либо комплексным объектом с информационно-путепроводными функциями.

Из сказанного следует, что маршрутный принцип и пешее передвижение принципиальны в организации экотуризма и предопределяют локальную территориальную структуру экотуризма. Маршрутность обеспечивает образ деятельности и отраслевую технологию, взаимоувязывает группы экотуристов, достопримечательности и инфраструктуру, формирует региональный контекст экотуристских предложений, гарантирует управляемость туристскими потоками через их режимность и пропускную способность. Введение (применение) понятия эталонности маршрутов позволяет усложнять программы экотуризма в процессе познания ландшафта отдельной местности, ООПТ, региона, страны.

Пешее – максимально тихое и малоконтактное с окружением (архаичное) перемещение по территории, поэтому пешие самые оптимальные в качестве «быстрых» видов экотуристских маршрутов. Они взаимозаменяемы или сочетаемы с отвечающими тем же требованиям безмоторным вело- или водным весельным передвижениям. В качестве инструмента управления они также ограничивают время пребывания на территории физическими возможностями посетителей.

В любых из перечисленных случаев гидрографическая сеть выступает проводником турпотоков, а непосредственными путями пешего маршрутного передвижения по природной территории служат природные тропы. Важно, что природные тропы не синонимичны экологическим, хотя концептуально и функционально им близки. Главное отличие – отношение к ООПТ. Так, российское законодательство связывает экологические тропы исключительно с ООПТ, трактует их как специально обустроенные маршруты для знакомства посетителей с природными объектами при минимальном на них воздействии. Обязывает включать сведения о тропах в кадастр ООПТ, маркировать тропы по уровню сложности, протяжённости, опасности[13]. Предусматривает наказание за нарушения при посещении экотроп, эквивалентное нарушению режима самой ООПТ[14].

Природные тропы могут находиться вне ООПТ в муниципалитетах, административно подчинены им и установленным ими правилам пребывания. Основная инфраструктура располагается в градостроительных зонах общественной и жилой застройки, что сводит к нулю техногенные воздействия на природу. Необходимая – включает санитарные точки, а дополнительная – создается по мере роста спроса для повышения рекреационной емкости тропы.

Природные тропы на сопредельных с ОЭЗ ТРТ «Бирюзовая Катунь» и курортом «Манжерок» территориях

Развитие массового экологического и пешего туризма поддерживается региональными туристскими ведомствами. По их представлению, тропы должны удовлетворить запрос потребителей на уход из шумных туристических мест и подойти для продвинутых, не впервые посещающих Алтай туристов. Так, из 17 природных маршрутов, предлагаемых Управлением по туризму Алтайского края и объединенных под брендом «Алтайский тропинг», 6 находятся в радиусе дневной посещаемости от «Бирюзовой Катуни» и «Манжерока»: тропы «Бабырган» и «Лебединая» (Советский район), «Бащелак» и «Шинок» (Солонешенский район), «Лог Арбанак» (Алтайский район), «С видами на гору Синюху» (Смоленский район). В Республике Алтай предложения связаны с внутренними районами Алтая вдоль реки Катуни и Чуйского тракта: Камышлинский водопад (Шебалинский район), Каракольские озера и урочище Че-Чкыш («Долина горных духов») (Чемальский район). В представленном исследовании рамки грантовой поддержки ограничивают территорию рассмотрения Алтайским краем.

[14] Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях № 195-ФЗ от 30.12.2001.

Экотуристский каркас Алтайского края – система объектов и разнородных их связей, призванная обеспечивать баланс между природными и антропогенными компонентами, между природоохранной и экотуристской деятельностью, в том числе на ООПТ. Пространственную, материальную и информационно-идеологическую основу его слагают действующие ООПТ. Они различны категориально (режимно), а также по профилю (геоморфологические, гидрологические, биологические, комплексные), местоположению (равнинные, горные), ландшафтной принадлежности и устройству (лесные, лесостепные, степные), внутренней организации (самостоятельные объекты охраны или включенные в границы высших по статусу ООПТ, например, памятники природы в границах заказников). Не все из них в современном состоянии интересны для экотуризма, хотя обладают значительными ресурсами для этого.

В конструкте каркаса учтены фокусные туристские и рекреационные локации. Значение их состоит не столько в оценке обеспеченности действующей инфраструктурой, сколько в обозначении потребительских предпочтений, визуализации современной конфигурации туристско-рекреационного каркаса, популярных туристских мест как потенциальных ядер каркаса, сложившихся туристско-рекреационных потоков. Эти данные послужили для картографического сопоставления разнородных пространственных структур.

Так, в границах рассматриваемой части края, относимой к горам Алтая, наиболее посещаемы с целью туризма и рекреации Алтайский, Красногорский, Смоленский, Советский и Солонешенский районы, города Белокуриха и Бийск. Внутри них узлами (ядрами) притяжения турпотоков служат брендовые туристические локации: особые экономические зоны туристско-рекреационного типа («Бирюзовая Катунь» и «Сибирская монета» в Алтайском районе), туристско-рекреационные кластеры («Белокуриха» в г. Белокуриха, «Золотые ворота Алтая» в г. Бийск), места проведения событийных проектов («Цветение маральника» и «Алтайская зимовка» на Бирюзовой Катуни, «Алтай ФЕСТ» в с. Новотырышкино Смоленского района, «Шукшинские чтения» в с. Сростки Бийского района), брендовые туристические маршруты («Большое золотое кольцо Алтая», «Малое золотое кольцо Алтая»). Помимо собственно ландшафтных (экосистемных) туристских ресурсов (49% регионального ландшафтного разнообразия, 193 вида растений, 85 – птиц, 31 – млекопитающих и пресмыкающихся, 33 – насекомых и моллюсков, 6 рыб), в том числе природных достопримечательностей (озера, горы, скалы, пещеры, водопады), в границах территории находится 18 объектов историко-культурного наследия (археологические стоянки, курганы, памятники) и 76 средств размещения для туристов.

С позиции потребителя и наряду с брендовыми здесь популярны неофициальные (небрендовые) рекреационные локации – предгорья и низкогорья, традиционные для отдыха местного населения и приезжих: Белокурихинский гранитный массив в окрестностях города-курорта Белокуриха, левобережье реки Катунь, комплексы пещер в Алтайском районе, водопады Солонешенского района, северный фас Алтая. Часть их – памятники природы. Кроме того, условные Алтайская и Смоленская районные, а также Белокурихинская городская туристско-рекреационные локации четко связаны с водозависимыми рекреационными практиками. Локации представляют собой местности с развитой рекреационной инфраструктурой, различаются специализацией, приурочены к проявлениям национально значимых рекреационных ресурсов (радоновые воды курорта Белокурихи, сплавные реки горной части региона) и знаковым для региона водным объектам.

Исходя из полученных теоретических представлений, фактических региональных условий и проектных целевых установок экотуристский каркас Алтайского края представляет собой мыслимую, иерархически устроенную территориальную сеть, состоящую из актуальных и потенциальных объектов:

- на региональном уровне – из особо охраняемых (всех категорий и специализаций) и сопредельных с ними природных территорий, отражающих природное своеобразие (типичные и уникальные природные комплексы и их компоненты) и разнообразие региона (узлы, ядра), территориально соотносимых с ними брендовых туристских локаций (буферные зоны), регионально значимых инфраструктурных объектов и коммуникаций (коридоры);

- на субрегиональном уровне – из групп ООПТ со сходными экотуристскими ресурсами (буферные зоны) и территориально сопряженных с ними объектами инфраструктуры и сервиса (коридоры); особенности природного устройства территории и местоположения туристских достопримечательностей позволяют дифференцировать ООПТ в укрупненные группы: условно «горную», «лесную» и «степную» в соответствии со схемой физико-географического районирования региона;

- на локальном уровне – из индивидуальных ООПТ (узлы, ядра) и сопредельных с ними местностей с расположенными внутри них фокусными точками (типичные, уникальные, экосистемно и экологически значимые природные комплексы и объекты – узлы, ядра), путями миграции вещества и биоты и маршрутной сетью (коридоры). Роль буферных зон выполняют вмещающие административные районы (муниципальные образования) с имеющейся инфраструктурой.

Систематизация и структурирование актуальных данных об условиях и ресурсах рассматриваемой территории, ее природном и административном устройстве, транспортной инфраструктуре позволили наполнить структуру каркаса фактическими объектами (табл. 2 / tabl. 2). Дальнейшее картирование, идеологическая и логистическая увязка фактуры обеспечивают последующие мероприятия по формированию тематики и программному наполнению экотуристских маршрутов.

Таблица 2

Экотуристский каркас алтайской краевой части Алтая

Table 2

The ecotourism framework of the Altai region of Altai

Буферная зона // Buffer zone		*Ядра / зоны и центры (участки) природного туризма; природные и культурные достопримечательности, индивидуальные объекты размещения и обслуживания экотуристов // Cores / zones and centers (sites) of natural tourism; natural and cultural attractions, individual accommodation facilities and services for ecotourists*	*Коридоры / автодороги, экологические и природные тропы // Corridors / roads, ecological and nature trails*
Район // Distri	*Дублирующие ООПТ // Duplicate protected areas*		
Алтайский	- природный парк «Ая»; - природный парк «Предгорье Алтая»; -Талдинские пещеры; - гора Бобырган; - пещера Грот Ихтиандра; - пещера Каторжная; - пещеры Кыркылинские; - пещеры плато Метлево; - горы Берёзовая и Вересковая; - Лог Арбанак; - долина реки Каменки	*Природные достопримечательности*: реки Катунь, Сосновка, Уба, Б. Щемиловка, Казанда; озеро Ая; зеленая зона «Пихточки»; родники Выпад, Кирьянов; скала Утес; сопка Караульная. *Археологические объекты*: курган Ая; оградка Бирюзовая Катунь-12; памятники эпохи палеолита; памятники археологии Нижняя Каянча; Большая Талдинская пещера, Тавдинский грот; местонахождение эпохи палеолита. *Музеи*: Алтайский районный краеведческий музей; музей писателя Е. Гущина; музей под открытым небом «Перекресток миров»; *Историко-культурные объекты*: участок старого Чуйского тракта; памятники архитектуры XIX-XX вв.; дендрарий «Цветущая долина», горнолыжные комплексы («Бирюзовая Катунь», «Долина Алтая», гора Веселая, гора Горыня и др.); тематические праздники «Сырная деревня», Медово-яблочный спас, Конно-спортивный праздник, «Праздник спорта»; фольклорные, музыкальные и песенные фестивали, Покровская и Михайло-Архангельскую церкви *49 гостиниц, туристических баз*	Р256 «Чуйский тракт»; К-06 (9,2 км); К-10 (71,2 км); К-29 (54 км); К-30 (26 км); природные тропы: - Лог Арбанак (8,4 км); - Чертов палец (3 км); - К усадьбе Сокол (6 км); - Зеленый дракон (1,7 км); - Место силы (1,5 км); - Тропа предков (2 км) (Дунец, 2015)
Красногорский	- заказник «Лебединый» - заказник «Михайловский»	*Природные объекты*: реки Бия, Катунь, Иша; гора Карагайская Синюха; водопад на р. Чапчушка; скала Золотой утес на р. Бия; утес Бийские печи на р. Бия; минеральный источник. *Археологические объекты*: курганы, курганные группы, поселения, городища, могильники, стоянки. *Музеи*: Красногорский районный краеведческий музей. *Историко-культурные объекты*: народные праздники – Масленица, Троица, Иван Купала в селах района; фестиваль бардовской песни в с. Березовка, храмы Свято-Троицкий и Казанской иконы Божьей матери. *4 гостиницы, турбазы*	Р256 «Чуйский тракт»; К-34 (40 км); К-65 (28 км)
город Белокуриха	- скала Четыре брата	*Природные достопримечательности*: белокурихинский гранитный массив, скала Церковка. *Музеи*: Белокурихинский городской музей имени С.И. Гуляева; Музей кузнечного ремесла А. Билецкой; Водяная Мельница; Седой Алтай *74 гостиницы, отеля, санатория*	Р256 «Чуйский тракт»; К-06 (38,8 км) - К вершине горы Круглой (3,5 км); - Старая мельница (1,8 км)

Буферная зона // Buffer zone		*Ядра / зоны и центры (участки) природного туризма; природные и культурные достопримечательности, индивидуальные объекты размещения и обслуживания экотуристов // Cores / zones and centers (sites) of natural tourism; natural and cultural attractions, individual accommodation facilities and services for ecotourists*	*Коридоры / автодороги, экологические и природные тропы // Corridors / roads, ecological and nature trails*
Район // Distri	*Дублирующие ООПТ // Duplicate protected areas*		
Смоленский	- природный парк «Предгорье Алтая»; - низовья реки Сычевки; - слияние рек Бии и Катуни (остров Иконников); - устье реки Песчаной; - Точилинский борок	*Природные достопримечательности*: северный фас Алтая; скалы-останцы в отрогах Чергинского хребта; родники Степанычевы; урочище Щеки на р. Песчаная; каскад порогов на р. Песчаной; горы Синюха и Черновая; реки Обь, Катунь, Ануй, Песчаная, Белокуриха, Каменка, Поперечная, Черновая, Сычевка. *Археологические объекты*: памятники Иконниково 1-2. *Музеи*: Музей техники; Смоленский историко-мемориальный музей А. П. Соболева; Смоленский районный краеведческий музей; дом-музей сибирского крестьянина; дом-музей сибирского переселенца и алтайский аил; магазин и дом купца Рождественского в с. Смоленском. *Историко-культурные объекты*: старый вольфрамовый рудник Черновский в верховьях р. Осиновка; конный двор ЗАО «Курорт Белокуриха»; стадионы «Победа»; «Старт»; культурно-спортивные праздники памяти М.С. Евдокимова; Соболевские литературные чтения; ежегодный туристский фестиваль на р. Песчаная; конно-спортивные праздники в селах Смоленское и Новотырышкино, храм Александра Невского на слиянии рек Бии и Катуни; часовня святого Михаила-архангела; церкви Смоленской иконы Божьей Матери, Никольская и Святой мученицы Татианы. *10 туристических баз и баз отдыха*	Р256 «Чуйский тракт»; К-06 (38,8 км); К-12 (44,4 км); - С видами на гору Синюху (12,7 км)
Советский	заказник «Лебединый»; - гора Бобырган; - гора Камешок; - следы катастрофического паводка у с. Платово; - сопка Баданья; - сопка Сурья	*Природные достопримечательности*: реки Катунь и Талица; гора Бабырган; сопки Караульная Воструха, Монах, Талицкая и Змеиная; озера Лебединое, Светлое и Кокша; ручей Грязнуха; родники у сопки Змеиной, у оз. Светлого. *Археологические объекты*: стоянки: Садовая Сопка, Урожайная; поселения: Монах, Кокши 1, Карасук 1-5, Синюха 1. *Музеи*: Муниципальный краеведческий музей Советского района; Советский районный краеведческий музей. *Историко-культурные объекты*: сельские клубы и дома культуры; фольклорные коллективы – детский народный духовой оркестр (с. Урожайное), детский ансамбль гармонистов «Солидные ребята» (с. Красный яр); сельский народный театр; тематические праздники – «Дары полей», «Проводы зимы»; церковь Казанский иконы Божьей матери. *3 гостиницы*	Р256 «Чуйский тракт»; К-10 (30,3 км); Н-4204 (33,0 км); - Лебединая (0,35 км); - на горе Бобырган (3,5 км)
Солонешенский	- природный парк «Предгорье Алтая»; - заказник Бащелакский; - каскад водопадов на реке Шинок; - степи у с. Сибирячиха; - Трошин лог	*Природные достопримечательности:* пещеры Денисова, Окладникова, Искра, Сибирячихинские; горные вершины – Будачиха, Плешивая, Загриха, Тележиха; ущелье и каскад водопадов на р. Шинок; р. Ануй с притоками (Шинок, Карама, Сибирячиха, Аскаты); р. Песчаная; кедровые массивы в верховьях рек Аскаты и Шинок; Мульчихинское месторождение вольфрама. *Археологические объекты*: памятник Пещера им. Окладникова; курганная группа Сибирка 5; курганы, курганные группы, могильники, древние поселения. *Музеи*: Солонешенский районный краеведческий музей; «Русская горница»; музей истории и старообрядчества; база археологического лагеря Института археологии и этнографии СО РАН. *Историко-культурные объекты*: палеолитическая стоянка человека Карама; Денисова пещера; пещерные стоянки Сибирячихинская, Окладникова, Искра; природно-археологический парк «Колыбель человечества, фольклорный фестиваль празднование дня Святой Троицы; конноспортивный праздник, храмы Святителя Николая Чудотворца и старообрядческий Никольский. *13 гостиниц, гостевых домов*	Р256 «Чуйский тракт»; К-12 (97,1) - К гроту Махам (0,8 км); - Иван-чай (0,8 км); - Шинок (4,5 км)

Заключение

Активное развитие и самобытность отечественной доктрины экологического туризма актуализируют теоретизацию и разработку практикоориентированных инструментов его пространственной организации и управления. Особенности современного спроса и допуск посетителей к ранее неприкосновенным экосистемам формируют запрос на особый регулятор. Имеющиеся в этой связи идеи и концепции пока не совершенны: представления об экотуризме не системны, теория аспектно раздроблена, а управляющие функции администрирования, законов и правил не всегда подходят и эффективны из-за прямых запретов, противоречащих принципу общедоступности общественных пространств. Решение заложено в развитии концепций туристско-рекреационной и природоохранной систем, плановом освоении территории экотуризма на основе нормирования рекреационной нагрузки, программировании экотуризма (через программы туров и управление туристскими потоками), маршрутизации перемещений по территории (через системы пеших природных и экологических троп). Предложенные теоретические идеи демонстрируют системный потенциал экотуризма, призывают к обсуждениям в этом направлении и приводят к ряду важных выводов.

Во-первых, в имеющихся разработках в области экологического туризма прослеживается оригинальная структурность, связанная с его базовыми целевыми, ресурсными и технологическими особенностями. Поэтому экотуризм не следует связывать исключительно с первозданными или малоизмененными природными пространствами: ООПТ, их окрестностями, экотропами и природными достопримечательностями. Они являются лишь главной целевой локацией с концентрацией информационных функций. Современные форматы туризма, основанные на клиповом мышлении, комфортном и благоустроенном размещении, автомобильной доставке к началу/окончанию маршрута, общественном питании и стремлении к максимальным впечатлениям за короткое время, обусловливают включение в структуру экотуризма более широких пространств: всех имеющихся публичных инфраструктур с функциями потребления, обслуживания и распределения.

Во-вторых, основополагающие цели экотуризма – природоведческие и краеведческие – обеспечивают экотуризму континуальность как на разнородных пространствах (природных, урбанизированных), так и на любом из уровней рассмотрения (локальном, региональном). Структура экотуризма при этом расширяется содержательно специфичными объектами: типичными и уникальными ландшафтами и местностями, историко-культурными объектами, учреждениями и мероприятиями, характерными хозяйственными и производственными процессами. Связанность разнородных и разноуровневых элементов обеспечивают идеологизация, последовательное и усложняющееся программирование экотуров, использование целесообразных для конкретных локаций техник и технологий (способ передвижения, форма подачи информации, условия проживания, степень обустройства маршрутов).

В-третьих, в смежной краевой и республиканской частях Горного Алтая сконцентрировано значительное разнообразие, многообразие и наличие дублирующих ландшафтов с разными статусами, а также слабо освоенных в плане туризма объектов культурного и исторического наследия. Это позволяет эффективно расширять экотуристские предложения, отводя массовые потоки от мест с чрезмерной рекреационной нагрузкой.

Разработанные структуры экокаркаса и успешная апробация их практического использования позволяют утверждать о типовом характере разработок и рекомендовать их для планирования экотуризма на любых территориях.

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 25-27-20032 «Оценка потенциала и возможностей реализации эколого-приемлемых принципов развития водно-зависимых рекреационных практик на особо охраняемых природных территориях (ООПТ) Алтайского края».

Funding

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-27-20032 «Assessment of the potential and possibilities for the implementation of environmentally friendly principles for the development of water-dependent recreational practices in specially protected natural areas of the Altai Territory».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of interest

The authors declare no conflicts of interest.

Сведения об авторском вкладе

И.В. Андреева – идея исследования, разработка концепции и структуры статьи, сбор и анализ материала, текст рукописи.

И.Д. Рыбкина – идея исследования, разработка концепции и структуры статьи, авторский надзор идей и этики исследования.

Contribution of the authors

I.V. Andreeva – the idea of the research, the development of the concept and structure of the article, the collection and analysis of the material, the text of the manuscript.

I.D. Rybkina – the idea of research, the development of the concept and structure of the article, the author's supervision of the idea of research.

Список источников

1. Амелькина Д.В. Современные теоретические подходы к пониманию и актуальная проблематика исследований территориальной организации рекреации и туризма // *Вестник ТвГУ. Серия «География и геоэкология».* 2020. №2(30). С. 43-59. https://doi.org/10.26456/2226-7719-2020-2-43-59
2. Андреева И.В., Головин А.В., Рыбкина И.Д. Водно-рекреационные и природоохранные структуры в экотуристском каркасе особо охраняемой природной территории // *Юг России: экология, развитие*. 2025. № 4. С. 155-166. https://doi.org/10.18470/1992-1098-2025-4-15
3. Астанин Д.М. Использование каркасного метода в планировании и функциональном зонировании территорий, благоприятных для организации экотуризма (на примере центральной части Восточного Саяна) // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2017. № 3. С. 51-60.
4. Дунец А.Н. Туристское пространство как научная категория в исследованиях туризма // *Ползуновский альманах.* 2015. № 3. С. 86-90.
5. Дорофеев А.А. О зонтичном определении экотуризма // *Вестник Тверского государственного университета. Серия «География и геоэкология»*. 2025. № 2(50). С. 61-76. https://doi.org/10.26456/2226-7719-2025-2-61-76
6. Елизаров А.В. Экологический каркас – стратегия степного природопользования XXI в. // *Самарская Лука.* 2008. Т. 17. № 2(24). С. 289-317.
7. Зырянов А.И. Региональная топология туризма // География и туризм. Пермь, 2005. С. 81-99.
8. Зырянов А.И. Дробное районирование и площадное развитие туризма // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2018. № 5. С. 44-51.
9. Исаченко А.Г. Формирование историко-географических краев Европейской России в XVI-XVII вв. // *Известия Русского географического общества*. 2016. Т. 148. Вып. 2. С. 1-21.
10. Котляков В.М., Кружалин В.И., Мажар Л.Ю. Теоретические основы развития туризма на межрегиональном уровне // *Туризм и региональное развитие.* 2020. № 1. С. 17-30.
11. Кружалин В.И., Мажар Л.Ю. Геосистемный подход к освоению туристского пространства в контексте устойчивого развития внутреннего туризма в России // *Географическая среда и живые системы.* 2023. № 4. С. 7-19. https://doi.org/10.18384/2712-7621-2023-4-7-19
12. Мажар Л.Ю. Туризм в пространстве и времени: взгляд географа // *Современные проблемы сервиса и туризма.* 2014. № 1. С. 16-23.
13. Мышлявцева С.Э., Семенов В.В. Мониторинг туристских маршрутов природного парка «Пермский» // *География и туризм*. 2019. № 2. С. 96-101.
14. Родоман Б.Б. Поляризация ландшафта как средство сохранения биосферы и рекреационных ресурсов // Ресурсы, среда, расселение. М.: Наука, 1974. С. 150-162.
15. Родоман Б.Б. Поляризованный ландшафт: полвека спустя // *Известия РАН. Серия географическая.* 2021. Т. 85. № 3. С. 467-480. https://doi.org/10.31857/S2587556621030122
16. Стоящева Н.В. Экологический каркас как основа оптимизации территориальной организации природопользования (на примере Алтайского края) // *Проблемы региональной экологии*. 2012. № 3. 186-191.
17. Тарасенок А.И. Новые подходы к структурированию туристского пространства: от рекреационных районов к геоэкономическим системам // *Вестник БГУ. Сер. 2. Химия. Биология. География.* 2010. № 1. С. 95-98.

References

1. Amelkina, D.V. Modern theoretical approaches to understanding and topical issues of research on the territorial organization of recreation and tourism. *Herald of Tver state university. Series: Geography and geoecology*, 2020. Vol. 2. Iss. 30. P. 43-59. https://doi.org/10.26456/2226-7719-2020-2-43-59 (in Russian)
2. Andreeva I.V., Golovin A.V., Rybkina I.D. Water-recreational and nature conservation structures in the ecotourism framework of a specially protected natural area. *South of Russia: ecology, development*. 2025. Iss. 4. P. 155-166. https://doi.org/10.18470/1992-1098-2025-4-15 (in Russian)
3. Astanin D.M. Application of network method in the planning and functional zoning of territories favorable for the organization of ecotourism (case study of the central part of the Eastern Sayan mountains). *Lomonosov geography journal*. 2017. Iss. 3. P. 51-60 (in Russian)
4. Dunetc A.N. Tourist space as a scientific category in tourism research. *Polzunovsky almanac*. 2015. Iss. 3. P. 86-90 (in Russian)
5. Dorofeev A.A. On the umbrella definition of ecotourism. *Herald of Tver state university. Series: Geography and geoecology,* 2025. Iss. 2. P. 61-76. https://doi.org/10.26456/2226-7719-2025-2-61-76 (in Russian)
6. Elizarov A.V. Ecological framework – strategy of steppe nature management in the 21st century. *Samarskaya Luka*. 2008. Vol. 17. Iss. 2. P. 289-317 (in Russian)
7. Zyrianov A.I. Regional tourism topology. In: Geography and tourism. Perm, 2005. P. 81-99 (in Russian)
8. Zyrianov A.I. Districting and areal development of tourism. *Lomonosov geography journal*. 2018. Iss. 5. P. 44-51 (in Russian)
9. Isachenko A.G. Formaton of the historical-geographic territories in European Russia in the XVI-XVII Centuries. *Bulletin of the Russian geographical society*. 2016. Iss. 2. P. 1-21 (in Russian)
10. Kotlyakov V.M., Kruzhalin V.I., Mazhar L.Yu. Theoretical framework for tourism development at the interregional level. *Tourism and regional development*. 2020. Iss. 1. P. 17-30 (in Russian)

11. Kruzhalin V.I., Mazhar L.Yu. Geosistem approach to the exploration of tourist space in the context of sustainable development of domestic tourism in Russia. *Geographical environmental and living systems.* 2023. Iss. 4. P. 7-19. https://doi.org/10.18384/2712-7621-2023-4-7-19 (in Russian)

12. Mazhar L.Yu. Tourism over a distance and time: thegeographer's view. *Service and tourism: current challenges*. 2014. Iss. 1. P. 16-23 (in Russian)

13. Myshlyavtseva S.E., Semenov V.V. Tourist routes monitoring in the nature park Permskii. *Geography and tourism.* 2019. Iss. 2. P. 96-101 (in Russian)

14. Rodoman B.B. Landscape polarization as a means of preserving the biosphere and recreational resources. In: Resources, environment, settlement. Moscow, Russia: Nauka, 1974. P. 150-162 (in Russian)

15. Rodoman B.B. Polarized landscape: half a century later. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya,* 2021. Vol. 85. Iss. 3. P. 467-480. https://doi.org/10.31857/S2587556621030122 (in Russian)

16. Stoyashcheva N.V. The ecological framework as a basis for optimizing the territorial organization of environmental management (using the example of the Altai Territory). *Problems of regional ecology*. 2012. Iss. 3. P. 186-191 (in Russian)

17. Tarasenok A.I. New approaches to structuring the tourist space: from recreational areas to geo-economic systems. *Journal of the Belarusian State University. Chemistry. Biology. Geography*. 2010. Iss. 1. P. 95-98 (in Russian)

Поступила в редакцию / Received: 10.04.2026
Поступила после рецензирования / Revised: 03.09.2026
Принята к публикации / Accepted: 10.10.2026

Оригинальная (исследовательская) статья
УДК 502.4; 504.054
https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-19-25
https://elibrary.ru/joetib

Сезонное содержание Cu, Zn, Pb в придорожных почвах острова Ольхон (2023-2025 гг.)

Екатерина Николаевна Соловьева[1,2] ✉, **Юрий Викторович Рыжов**[2], **Светлана Ивановна Штельмах**[2]
[1] ФГБУ «Заповедное Прибайкалье», Иркутск, Россия
[2] ФГБУН «Институт земной коры СО РАН», Иркутск, Россия
✉ soloveva@baikal-1.ru

Аннотация. Постановка научной проблемы и её актуальность. В работе исследовано влияние экскурсионного автотранспортного потока на территорию Прибайкальского национального парка. Цель – оценить накопление Pb, Zn, Cu в придорожных почвах и выявить механизмы их латеральной миграции. Установление ведущих факторов загрязнения необходимо для разработки мер по минимизации антропогенной нагрузки на границах особо охраняемой природной территории федерального значения. Материал и методы. В течение 2023-2025 гг. отобрано 168 проб почвы в 10-метровой зоне от дорог на глубине до 20 см. Концентрации Pb, Zn, Cu определены рентгенофлуоресцентным методом. На основе среднемесячных данных рассчитаны коэффициенты кларка ($К_к$) и регионального фона ($К_с$). Пространственно-временная динамика проанализирована с учетом интенсивности трафика, дорожных работ, рельефа и литологии острова. Результаты и их обсуждение. Выявлена выраженная сезонная изменчивость геохимического профиля. В летний период по коэффициентам кларка ($К_к$) приоритетными поллютантами выступают Cu (0,98-3,70) и Zn (1,56-3,39), тогда как при анализе относительно регионального фона ($К_с$) ведущим элементом становится Pb (1,18-2,89), зафиксированный во всех 100% проб. К октябрю концентрации Pb снижаются, тогда как Zn и Cu демонстрируют слабую тенденцию к росту. Высокие уровни накопления в песчаных почвах с низким естественным фоном указывают на преимущественно антропогенное происхождение поллютантов. Основными источниками могут служить выхлопные газы, продукты износа тормозных накладок и покрышек, а также пыление при дорожно-ремонтных работах. Латеральное распределение металлов на поперечном профиле склона асимметрично и может определяться сочетанием воздушных и водных потоков. Zn и Cu достигают максимума в верхней по склону точке вероятно из-за осаждения воздушно-капельных фракций доминирующими ветрами. Напротив, Pb аккумулируется в нижней точке вероятно в результате гравитационного и дождевого стока. При этом пик Cu в верхней части склона может быть обусловлен наложением современного техногенного загрязнения на остаточный агрохимический фон от распашки земель в советский период. Полученные данные свидетельствуют о трансформации почвенного покрова на границах парка, где вклад экскурсионного автотранспорта сопоставим с влиянием исторического землепользования. Это требует пересмотра регламента туристических маршрутов для защиты экосистем Прибайкалья.

Ключевые слова: тяжелые металлы, придорожные грунты, рентгенофлуоресцентный анализ, особо охраняемые природные территории, остров Ольхон, Прибайкальский национальный парк

Для цитирования: Соловьева Е.Н., Рыжов Ю.В., Штельмах С.И. Сезонное содержание Cu, Zn, Pb в придорожных почвах острова Ольхон (2023-2025 гг.) // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2026. Т. 12. № 2. С. 19-25. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-19-25. EDN JOETIB.

Original Paper

Seasonal content of Cu, Zn, and Pb in roadside soils on Olkhon Island (2023-2025)

Ekaterina N. Solovyova[1,2]✉, **Yuriy V. Ryzhov**[1], **Svetlana I. Shtelmakh**[1]
[1] FGBI Baikal protected areas, Irkutsk, Russia
[2] FGBUN Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia
✉ soloveva@baikal-1.ru

Abstract. Relevance and problem formulation. The paper examines the impact of vehicle traffic from auto-excursions on the territory of the Baikal National Park. The aim is to assess the accumulation of Pb, Zn, and Cu in roadside soils and to identify the mechanisms of their lateral migration. Identifying the leading pollution factors is necessary for developing measures to minimize anthropogenic pressure on the boundaries of the specially protected natural territory of federal significance. Materials and Methods. Between 2023 and 2025, 168 soil samples were collected in a 10-meter zone from roads at a depth of up to 20 cm. Concentrations of Pb, Zn, and Cu were determined using the X-ray fluorescence method.

© Соловьева Е.Н., Рыжов Ю.В., Штельмах С.И., 2026

Based on average monthly data, the Clarke coefficient (C_c) and the regional background coefficient (C_b) were calculated. The spatio-temporal dynamics were analysed taking into account the intensity of traffic, road works, the island's relief, and lithology. Results and discussion. A pronounced seasonal variability in the geochemical profile was identified. During the summer period, based on the Clarke coefficient (C_c), the priority pollutants are Cu (0.98-3.70) and Zn (1.56-3.39), while when analyzing them relative to the regional background (C_b), the leading element becomes Pb (1.18-2.89), which was recorded in 100% of the samples. By October, Pb concentrations decrease, whereas Zn and Cu show a slight upward trend. High levels of accumulation on sandy soils with a low natural background indicate a predominantly anthropogenic origin of pollutants. The main sources may include exhaust gases, wear products of brake linings and tires, as well as dust generation during road repair work. The lateral distribution of metals along the cross-section of the slope is asymmetric and may be determined by a combination of air and water flows. Zn and Cu reach a maximum at the upper point of the slope, likely due to the deposition of airborne droplet fractions by dominant winds. Conversely, Pb accumulates at the lowest point, likely as a result of gravitational and rainfall runoff. At the same time, the peak in Cu in the upper part of the slope may be due to the superposition of modern anthropogenic pollution on the residual agrochemical background from land plowing during the Soviet period. The data obtained indicate a transformation of the soil cover at the park boundaries, where the contribution of excursion vehicles is comparable to the impact of historical land use. This requires a review of the regulations governing tourist routes to protect the ecosystems of the Baikal region.

Keywords: heavy metals, roadside soils, X-ray fluorescence analysis, specially protected natural areas, Olkhon Island, Baikal national park

For citation: Solovyova E.N., Ryzhov Yu.V., Shtelmakh S.I. Seasonal content of Cu, Zn, and Pb in roadside soils on Olkhon Island (2023-2025). *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2026. Vol. 12. Iss. 2. P. 19-25. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-19-25. EDN JOETIB. (in Russian)

Введение

В условиях роста рекреационной нагрузки, вызванной массовыми автомобильными экскурсиями на особо охраняемую природную территорию (ООПТ) федерального значения – Прибайкальский национальный парк (остров Ольхон), актуальность приобретает мониторинг эколого-геохимического состояния придорожных грунтов. Известно, что автотранспорт не только разрушает грунтовые дороги и прилегающие к ним территории (Соловьева, 2026), но и является источником поступления тяжелых металлов (ТМ) в различные компоненты среды (Forman, 1998). Увеличение концентраций ТМ может негативно сказаться на экологическом состоянии экосистем (Теплая, 2013), нарушить природный баланс ООПТ.

Основными ТМ, поступающими от автотранспорта с обязательным контролем в РФ, являются Cu, Zn, Pb[1]. Среди них Zn, Pb относятся к 1 классу опасности, Cu – 2 класс опасности[2]. Оценка накопления ТМ проводится в основном в условиях городской среды, в пределах крупных авто- и ж/д- магистралей или вблизи промышленных предприятий (Вишневская, Попова, 2016; Казакова и др., 2019).

Целью данного исследования является оценка эколого-геохимического состояния придорожных территорий острова Ольхон.

При этом под оценкой эколого-геохимического состояния понимается комплексная характеристика почвенного покрова, отражающая степень его соответствия природно-климатическим условиям и пригодности для устойчивого функционирования экосистем с учетом содержания химических элементов.

В задачи исследования входило: провести количественный анализ автотранспортной нагрузки (общий поток автомобилей на остров Ольхон и тех, что едут с экскурсионными целями на север острова) за период 2023-2025 гг.; определить среднее содержание (*среднее значение концентрации химического элемента в анализируемом образце почвы, рассчитанное как среднее арифметическое результатов определения массовой доли элемента в пробе*) Cu, Zn, Pb относительно кларка и регионального фона в образцах придорожных почв в зависимости за три года наблюдений; оценить пространственно-временную изменчивость концентраций Cu, Zn, Pb придорожных территорий в зависимости от сезона в течение трех лет; провести интерпретацию полученных данных с учетом геохимического фона территории, литологических особенностей территории и характера антропогенного воздействия.

За последние три года среднегодовой поток автомобилей, переправленных паромами на остров Ольхон, составил около 113 тыс. единиц. При этом распределение потока по территории острова крайне неравномерно. Основная нагрузка, примерно 74 тыс. автомобилей (около 65% от общего потока), приходится в летний период на 35-километровый участок дороги «МРС (Маломорская речная станция) – пос. Хужир». Из общего потока транспорта на самый популярный туристический маршрут «Север Ольхона» приходится 8,1%.

Материалы и методы

Статистические данные по автотранспортному потоку на остров Ольхон подготовлены на основе данных АО «ВСРП» и данных ФГБУ «Заповедное Прибайкалье».

Пробоотбор проводился в течении трех лет (2023-2025 гг.) в пиковый туристический сезон (июль–август) и практически по его завершению (октябрь) с целью оценки степени влияния автотранспорта на геохимический состав почв.

[1] Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест: методические указания МУ 2.1.7.730-99. 1999.
[2] СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Утв. Постановлением Глав. гос. сан. врача РФ № 62296 от 29.01.2021 г.

Пробы отбирались методом конверта из 5 точек на площадке 1×1 м на расстоянии 10 м от источника воздействия (дороги) по обеим сторонам и непосредственно на самой дороге в одной точке (рис. 1 / fig. 1). Фоновая площадка заложена в 10 км от дороги общего пользования, вне туристических маршрутов (заповедная зона). Общее количество проб за три года составило 168 шт.

Схематичное распределение геологических пород подготовлено на основе наиболее детализированной «Карты полезных ископаемых» масштаб 1:200 000 серия Прибайкальская 1960 г. Возраст пород уточнен по геологической карте РФ масштаб 1:1 000 000 Ангаро-Енисейской серии (№-48) 2009 г.

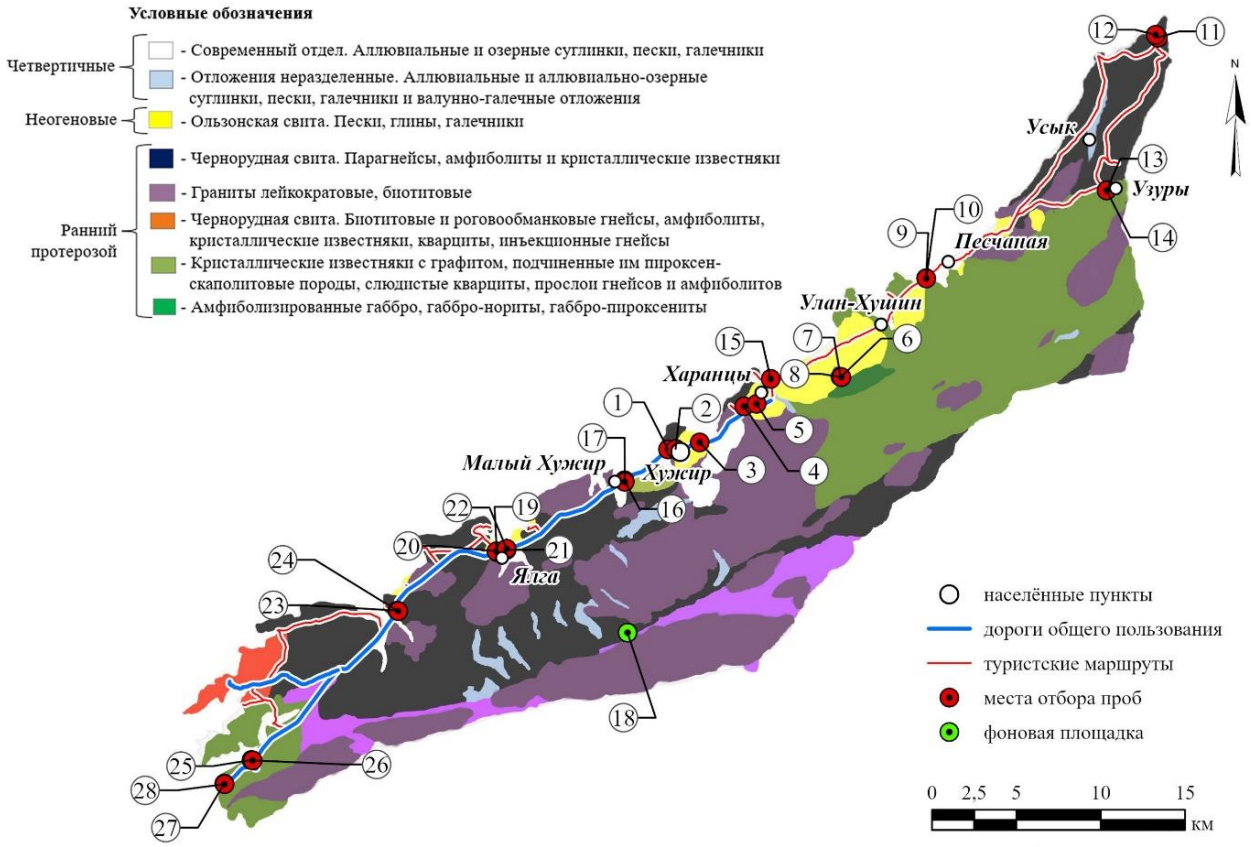


Рис. 1. Схема расположения точек отбора почвенных проб и геологическое строение острова Ольхон
Fig. 1. Layout of soil sampling points and the geological structure of Olkhon Island

Лабораторный анализ образцов осуществлялся рентгенофлуоресцентным методом в Центрах коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН и «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии СО РАН. В качестве индикаторных элементов выбраны медь (Cu), цинк (Zn) и свинец (Pb), являющиеся приоритетными поллютантами от автотранспортного воздействия.

Расчеты базировались на сопоставлении фактических валовых концентраций химических элементов в делювиальных отложениях (гор. А) с их региональными и кларковыми значениями (Гребенщикова и др., 2008; Китаев, Гребенщикова, 2014). Оценка уровня региональных концентраций определялась по формуле:

$$K_c = C_i / C_{fi},$$

где, C_i – фактическое содержание элемента в почве (в мг/кг), C_{fi} – региональное фоновое содержание элемента (в мг/кг). Оценка уровня кларковых концентраций определялась по формуле:

$$K_к = C_i / K_i$$

где, C_i – содержание элемента в изучаемом объекте; К – кларк этого элемента в литосфере (Перельман, 1975).

Полученные результаты анализировались на основе литологических особенностей территории, данных химического анализа водных, солянокислых и щелочных вытяжек. Количество гумуса определялось по методу И.В. Тюрина (Ломтадзе, 1990).

Для расчета коэффициентов кларка ($K_к$) и регионального фона (K_c) сформированы ряды среднемесячных концентраций за период 2023-2025 гг. Каждая точка ряда представляет собой среднее арифметическое по результатам всех проб, отобранных в одноименные месяцы (например, среднее по всем пробам за август 2023, 2024 и 2025 гг.).

Результаты и их обсуждение

Согласно материалам Ю.Н. Водяницкого, основными носителями ТМ в фоновых почвах являются глинистые минералы, (гидр)оксиды железа, марганца, соединения ТМ с серой и органическое вещество. Эти компоненты играют ключевую роль в процессах адсорбции и миграции металлов в почвах (Водяницкий, 2014).

Незасоленные песчаные почвы, как правило, характеризуются низкими значениями емкости катионного обмена (ЕКО), не способны накапливать большие концентрации таких элементов, как Cu и Pb, особенно при низком содержании органического вещества ($C_{орг}$), в отличие от (гидр)оксидов железа и марганца, которые характеризуются очень высокими значениями ЕКО и способны к активной сорбции ТМ (Водяницкий, 2011).

В предгорных сухих степях острова Ольхон преобладают каштановые почвы, в то время как в лесной зоне распространены дерновые лесные. Анализ гранулометрического состава показал, что придорожные почвы в основном состоят из песка средней крупности (0,25-0,5 мм) и крупного песка (0,51 мм). Это связано с эоловыми процессами, автотранспортной нагрузкой и климатическими особенностями, такими как выветривание и аномальные осадки (Соловьева, 2026).

Содержание органического вещества вдоль грунтовых дорог «МРС – пос. Хужир» составляет $C_{орг}$ = 0,7-4,4%, а для туристского маршрута «Север Ольхона» $C_{орг}$ = 0,1-4,6%. Почвы не засолены и характеризуются различными значениями ЕКО, мг-экв на 100 г вещества: для региональной дороги наблюдаются высокие значения (ЕКО = 131-288,2), для маршрута «Север Ольхона» значения варьируют в широком диапазоне (ЕКО = 10,4-225,3). Низкие значения емкости катионного обмена отмечаются на песчаных почвах верхнего горизонта (гор. А), на дорогах, подверженных активным эоловым процессам.

Кроме того, количество оксида железа для региональной дороги составляет Fe_2O_3 = 0,1-9,4%, а для маршрута «Север Ольхона» Fe_2O_3 = 1,0-16,6%. В нескольких точках мониторинга с интенсивным влиянием эоловых процессов отмечается содержание Fe_2O_3 > 2,0%.

Анализ коэффициентов концентраций ($К_к$) тяжелых металлов относительно кларкового содержания в почвах выявил выраженную сезонную изменчивость и пространственную мозаичность загрязнения. В летние месяцы приоритетными поллютантами выступают Cu и Zn. Cu демонстрирует наиболее широкий диапазон варьирования ($К_к$ = 0,98-3,70). Максимальные значения ($К_к$ > 3,0) зафиксированы в точках № 11, 12, 25 и 26, что указывает на формирование локальных геохимических аномалий и может быть связано с литологией острова для точек №11 и 12, а для остальных связано с влиянием автотранспорта в виду того, что в песчаниках данные элементы не повышены (Китаев, Гребенщикова, 2014). Zn характеризуется более стабильным, но повсеместным накоплением ($К_к$ = 1,56-3,39). Пиковые концентрации ($К_к$ > 3,0) отмечаются в точках № 4, 5 и 12. Превышения в первых двух точках могут быть связаны с капитальным благоустройством (укладка асфальта) дороги, начатым в 2024 г., а также возникшим трафиком крупногабаритного транспорта.

Pb в летний сезон проявляет наименьшую миграционную активность ($К_к$ = 0,65-1,59). Его концентрации преимущественно не превышают фоновый уровень (рис. 2 / fig. 2).

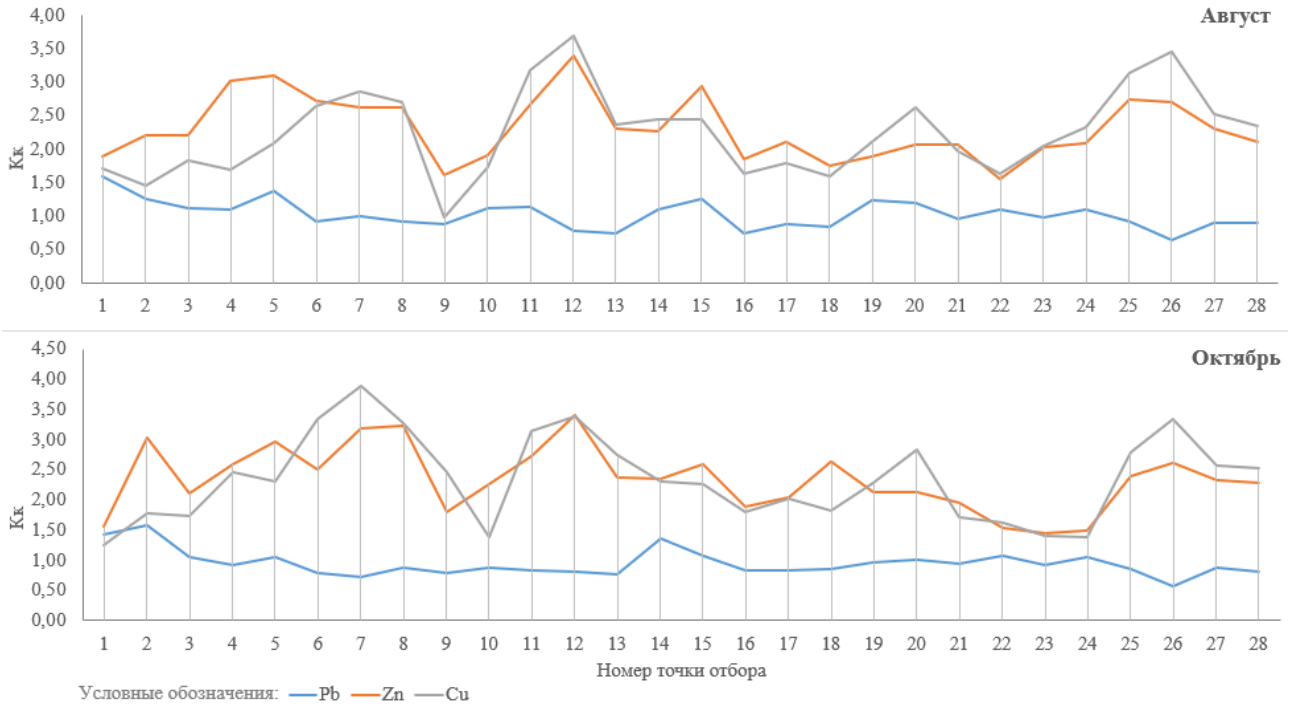


Рис. 2. Среднемесячные кларковые концентрации Pb, Cu, Zn, август и октябрь 2023-2025 гг.
Fig. 2. Average monthly Clarke concentrations of Pb, Cu, and Zn, August and October 2023-2025

Анализ регионального фона ($К_с$) показал, что в летний период ведущим поллютантом выступает Pb, в то время как Zn и Cu отходят на второй план. Pb является единственным элементом, зафиксированным с превышением фона во всех 100% отобранных проб, демонстрируя диапазон варьирования $К_с$ = 1,18-2,89, при этом максимальные значения ($К_с$ > 2,2) зафиксированы в точках № 1, 2, 5, 15 и 19. Zn демонстрирует умеренное накопление (среднее $К_с$ = 1,27) в диапазоне 0,86–1,86; превышение фона наблюдается в 89,3% проб, а наибольшие концентрации ($К_с$ > 1,6) отмечаются в точках № 4, 5, 12 и 15. Средние значения Cu находятся

ниже порога превышения (K_c = 0,98), и лишь в 50% проб (14 из 28) зафиксировано незначительное накопление в диапазоне K_c = 1,01-1,61. К октябрю геохимический профиль трансформируется: Pb демонстрирует общее снижение концентраций, что может указывать на замедление источника эмиссии, в результате чего превышения сохраняются только в точках № 2 и 14. В то же время Zn и Cu показывают слабую тенденцию к росту: превышения по Zn наблюдаются в точках № 2, 8 и 18, но не более чем на 0,4, а Cu аккумулируется в точках № 4, 6-9 с превышением не более чем на 0,6 (рис. 3 / fig. 3).

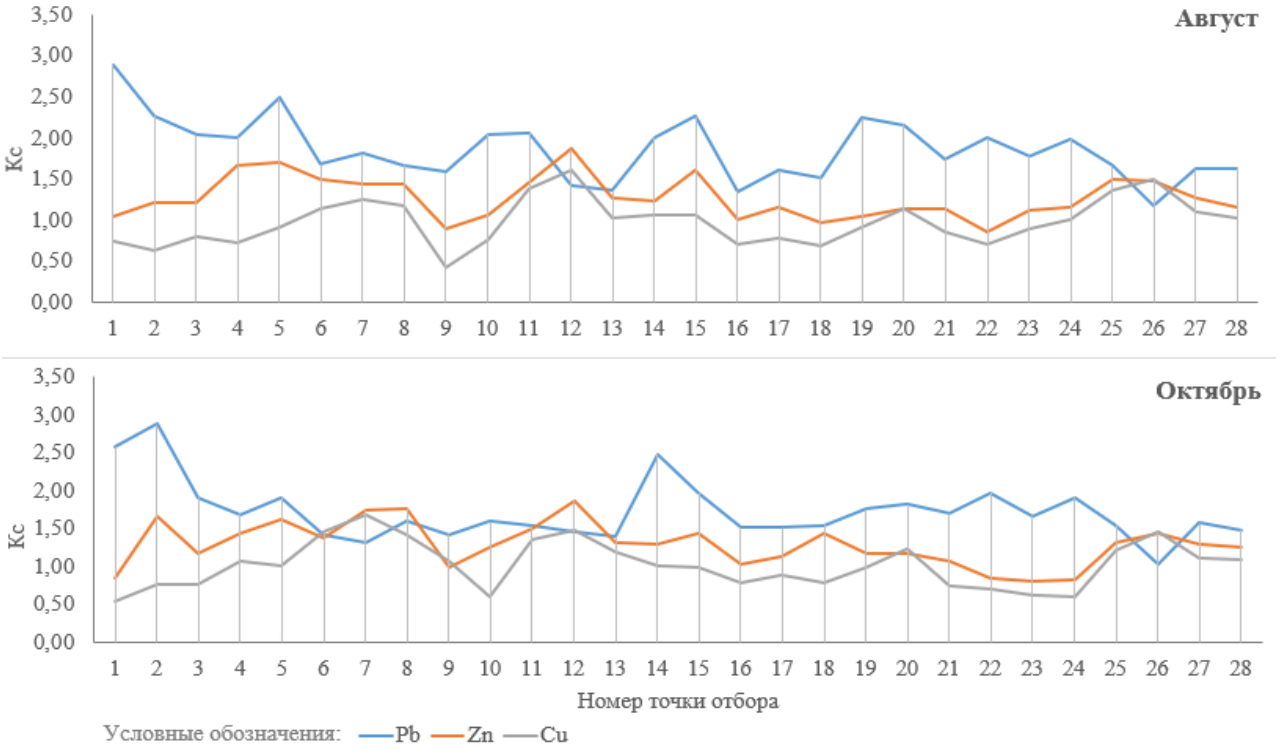


Рис. 3. Среднемесячные региональные концентрации Pb, Cu, Zn, август и октябрь 2023-2025 гг.
Fig. 3. Average monthly regional concentrations of Pb, Cu, and Zn, August and October 2023-2025

Сравнительный геохимический анализ отдельно взятых точек отбора относительно регионального фона (K_c) (рис. 3 / fig. 3) выявил, что высокие концентрации поллютантов наблюдаются на каштановых почвах, сформированных на рыхлых песчаниках и песках, с активным влиянием эоловых процессов: Pb и отмечен в 4 точках (№ 1, 2, 5, 15 и 19), для Zn в 3 точках (№ 4, 5 и 15) (рис. 2 / fig. 2). Согласно материалам Н.А. Китаева с соавторами содержания Pb в песчаниках, как правило, не повышены (Китаев, Гребенщикова, 2014), в свою очередь результаты исследования могут указывать на антропогенное влияние, обусловленное интенсивным автотранспортным потоком в летний период, а также проведением дорожно-ремонтных работ с активным использованием большегрузного транспорта для перевозки строительных материалов.

К осени концентрации Pb незначительно снизились, сохранив значения в пределах 1,76-2,58. Точка №2 демонстрирует тенденцию к увеличению (с K_c=2,27 до K_c=2,88). Следует отметить, что этот наиболее токсичный поллютант может поступать в атмосферу в составе пыли вместе с продуктами изнашивания тормозных накладок, автопокрышек и дорожного покрытия. Кроме этого, Pb может присутствовать в продуктах износа покрытий кузовов и деталей автомобильных двигателей (Вишневая, Попова, 2016). Концентрации Zn демонстрируют тенденцию к снижению за исключением точки №12, сохранившей стабильность (K_c=1,86).

В качестве репрезентативного примера для анализа латерального распределения тяжелых металлов в придорожной зоне рассмотрена серия из трёх проб, отобранных на едином поперечном профиле: непосредственно на дороге (pl 6) и на сопряженных элементах рельефа по обеим сторонам от неё (pl 7, pl 8). Для всех исследуемых ТМ (Cu, Zn, Pb) характерно превышение концентраций в придорожных пробах (pl 7, pl 8) относительно полотна дороги (pl6), что свидетельствует об определяющем влиянии автотранспорта на прилегающие территории. Пространственное распределение элементов демонстрирует выраженную латеральную асимметрию, обусловленную топографией местности: Zn и Cu достигают максимальных значений в верхней по склону точке (pl 8), тогда как Pb аккумулируется в нижней точке (pl 7). Подобная дифференциация объясняется сочетанием абиотических факторов – доминирующей розы ветров, способствующей осаждению воздушно-капельных фракций Zn (продукта истирания шин) на возвышении, и гравитационного перераспределения поллютантов, при котором уклоном дорожного полотна инициируется поверхностный сток Pb с его последующей аккумуляцией в микропонижениях микрорельефа за счет высокой сорбционной способности почв. При этом зафиксированный пик Cu в верхней части склона следует рассматривать как результат остаточного агрохимического фона, поскольку распашка данных земель выше по склону в советский период сопровождалась

интенсивным применением фосфорных минеральных удобрений, а также хлорорганических пестицидов (ДДТ, ГХЦГ) (Соловьева, Калихман, 2026).

Заключение

Анализ выявил выраженную сезонную изменчивость загрязнения тяжелыми металлами: в летние месяцы приоритетными поллютантами выступают Cu ($К_к$ = 0,98-3,70, пик в точках № 11, 12, 25, 26) и Zn ($К_к$ = 1,56-3,39, пик в точках № 4, 5, 12), накопление которых может быть связано с влиянием автотранспорта и капитальным благоустройством дорог (укладка асфальта с 2024 г.), в то время как Pb проявляет наименьшую миграционную активность, преимущественно не превышая фоновый уровень.

Анализ регионального фона ($К_с$) показал, что в летний период ведущим поллютантом выступает Pb, зафиксированный с превышением фона во всех 100% проб ($К_с$ = 1,18-2,89, пик $К_с$ > 2,2 в точках № 1, 2, 5, 15, 19), в то время как Zn (среднее $К_с$ = 1,27, превышение в 89,3% проб) и Cu (среднее $К_с$ = 0,98, накопление лишь в 50% проб) отходят на второй план. К октябрю геохимический профиль трансформируется: концентрации Pb в целом снижаются, и превышения сохраняются только в точках № 2 и 14, тогда как Zn и Cu демонстрируют слабую тенденцию к росту, аккумулируясь в точках № 2, 4, 6-9 и 18.

Высокие концентрации поллютантов зафиксированы на песчаных почвах: Pb – в точках № 1, 2, 5, 15, 19; Zn – в точках № 4, 5, 15. Поскольку фоновые содержания Pb в песчаниках обычно не повышены, это может указывать на антропогенное влияние, обусловленное интенсивным автотранспортом и дорожно-ремонтными работами с использованием большегрузов. Источниками поступления Pb могут служить продукты изнашивания тормозных накладок, автопокрышек, дорожного покрытия и деталей двигателей. К осени концентрации Pb незначительно снизились ($К_с$ = 1,76-2,58), за исключением точки № 2, где показатель вырос с 2,27 до 2,88, в то время как концентрации Zn демонстрируют тенденцию к снижению, кроме точки № 12, сохранившей стабильность (Кс = 1,86).

Для всех исследуемых тяжелых металлов (Cu, Zn, Pb) характерно превышение концентраций на сопряженных элементах рельефа (pl 7, pl 8) по сравнению с дорожным полотном (pl 6), что свидетельствует об определяющем влиянии автотранспорта на прилегающие территории. Пространственное распределение демонстрирует латеральную асимметрию, обусловленную топографией: Zn и Cu достигают максимума в верхней по склону точке (pl 8) из-за осаждения воздушно-капельных фракций доминирующими ветрами, а Pb аккумулируется в нижней точке (pl 7) вероятно в результате гравитационного стока и высокой сорбционной способности почв. При этом пик Cu в верхней части склона объясняется остаточным агрохимическим фоном от распашки земель в советский период с применением фосфорных удобрений и хлорорганических пестицидов.

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность ведущему инженеру Лаборатории инженерной геологии и геоэкологии Института Земной коры СО РАН М.В. Даниловой за помощь при проведении лабораторных исследований.

Acknowledgements

The authors of the article express their gratitude to Lead Engineer at the Laboratory of Engineering Geology and Geoecology, Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences M.V. Danilova for her assistance in conducting the laboratory studies.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of interest

The authors declare no conflicts of interest.

Сведения об авторском вкладе

Е.Н. Соловьева – идея, пробоотбор, расчеты, анализ данных, написание статьи, подготовка графического материала.

Ю.В. Рыжов – анализ данных, вычитка и редактура.

С.И. Штельмах – лабораторный анализ образцов (рентгенофлуоресцентный метод).

Contribution of the authors

E.N. Solovyova – idea, sampling, calculations, data analysis, writing the article, preparing graphical material.

Yu.V. Ryzhov – data analysis, proofreading, and editing.

S.I. Shtelmakh – laboratory analysis of samples (X‑ray fluorescence method).

Список источников

1. Вишневая Ю.С., Попова Л.Ф. Влияние автотранспорта на загрязнение почвенного покрова г. Архангельска тяжелыми металлами // *Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки.* 2016. № 2. С. 32-41. https://doi.org/10.17238/issn2227-6572.2016.2.32

2. Водяницкий Ю.Н. Об опасных тяжелых металлах/металлоидах в почвах // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева.* 2011. № 68. С. 56-82.

3. Водяницкий Ю.Н. Природные и техногенные соединения тяжелых металлов в почвах // *Почвоведение.* 2014. Т. 47. № 4. С. 420. https://doi.org/10.7868/S0032180X14040108

4. Гребенщикова В.И., Лустенберг Э.Е., Китаев Н.А., Ломоносов И.С. Геохимия окружающей среды Прибайкалья (Байкальский геоэкологический полигон). Новосибирск: Гео, 2008. 234 с.

5. Казакова Н.А., Садретдинова Л.Р., Мухаметшин А.А. Исследование почв территорий промышленных предприятий на предмет наличия тяжелых металлов // *Евразийский союз ученых*. 2019. № 12-2(69). С. 9-13.

6. Китаев Н.А., Гребенщикова В.И. Редкие и рудные элементы в окружающей среде Прибайкалья (коренные породы, донные отложения, почвы): монография. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 123 с.

7. Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований. Л.: Недра, 1990. 328 с.

8. Перельман А.И. Геохимия ландшафтов. М.: Высшая школа, 1975. 341 с.

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. https://doi.org/10.52575/2712-7443-2026-50-2-245-260

10. Соловьева Е.Н. Оценка влияния автомобильных экскурсий на устойчивость грунтовых дорог туристических маршрутов острова Ольхон // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2026. № 5. С. 41-51. https://doi.org/10.7868/S3034640126050035

11. Теплая Г.А. Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды (обзор литературы) // *Астраханский вестник экологического образования*. 2013. № 1(23). С. 182-192.

12. Forman R.T.T., Lauren E.A. Roads and their major ecological effects // *Annual review of ecology and systematics*. 1998. Vol. 29. Iss. 1. P. 207-231. https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.207

References

1. Vishneva Yu.S., Popova L.F. The influence of motor transport on the pollution of the soil cover of Arkhangelsk with heavy metals. *Bulletin of the Northern (Arctic) Federal University. Series: Natural Sciences*. 2016. Vol. 2. P. 32-41. https://doi.org/10.17238/issn2227-6572.2016.2.32 (in Russian)

2. Vodyanitsky Yu.N. About hazardous heavy metals/metalloids in soils. *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*. 2011. Iss. 68. P. 56-82. (in Russian)

3. Vodyanitsky Yu.N. Natural and technogenic compounds of heavy metals in soils. *Eurasian Soil Science*. 2014. Vol. 47. Iss. 4. P. 255-265. https://doi.org/10.7868/S0032180X14040108 (in Russian)

4. Grebenshchikova V.I., Lustenberg E.E., Kitaev N.A., Lomonosov I.S. Geochemistry of the environment of the Baikal region (Baikal geoecological polygon). Novosibirsk: Geo, 2008. 234 p. (in Russian)

5. Kazakova N.A., Sadretdinova L.R., Mukhametshin A.A. Investigation of soils of industrial enterprises for the presence of heavy metals. *Eurasian Union of Scientists*. 2019. Vol. 12-2. Iss. 69. P. 9-13. (in Russian)

6. Kitaev N.A., Grebenshchikova V.I. Rare and ore elements in the environment of the Baikal region (bedrock, sediments, soils): the monograph. Irkutsk: IGU Publishing House, 2014. 123 p. (in Russian)

7. Lomtadze V.D. Physical and mechanical properties of rock formations. Laboratory research methods. Leningrad: Nedra, 1990. 328 p. (in Russian)

8. Perel'man A.I. Geochemistry of landscapes. Moscow: Vysshaya shkola, 1975. 341 p. (in Russian)

9. Solovyova E.N., Kalikhman A.D. Olkhon island: from anthropogenic development to the formation of a specially protected natural area regime. *Regional Geosystems*. 2026. Vol. 50. Iss. 2. P. 245-260. https://doi.org/10.52575/2712-7443-2026-50-2-245-260 (in Russian)

10. Solovyova E. N. Assessment of the impact of car excursions on the stability of dirt roads along tourist routes on Olkhon Island. *Geoecology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology.* 2026. No. 5. P. 41-51. https://doi.org/10.7868/S3034640126050035. (in Russian)

11. Teplaya G.A. Heavy metals as a factor of environmental pollution (literature review). *Astrakhan Bulletin of Environmental Education.* 2013. Vol. 1. Iss. 23. P. 182-192. (in Russian)

12. Forman R.T.T., Lauren E.A. Roads and their major ecological effects. *Annual review of ecology and systematics*. 1998. Vol. 29. Iss. 1. P. 207-231. https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.207

Поступила в редакцию / Received: 21.08.2026
Поступила после рецензирования / Revised: 15.10.2026
Принята к публикации / Accepted: 27.10.2026

Раздел 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Оригинальная (исследовательская) статья
УДК 911.2: 911.6
https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-26-33
https://elibrary.ru/pcdvbz

Геоэкологическое зонирование Норильского промышленного района для управления рисками освоения его территории

Михаил Игоревич Алтухов, Алексей Анатольевич Медведков ✉
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия
Институт географии РАН, г. Москва, Россия
✉ a-medvedkov@bk.ru

Аннотация. Постановка научной проблемы и её актуальность. Норильск – крупнейший город Заполярья, располагающийся в условиях сплошного распространения многолетней мерзлоты. Несмотря на эту особенность, территория города неоднородна по своим геолого-географическим условиям, формирующим потенциал для развития неблагоприятных инженерно-геологических процессов, что важно учитывать при освоении новых площадок в границах городского округа. В связи с этим, рассматриваются факторы природной среды, определяющие уязвимость территории Норильского промышленного района к её освоению в условиях потепления климата. Материал и методы. На основе анализа опубликованных и фондовых материалов, а также данных дистанционного зондирования обобщена информация о факторах, определяющих денудационный и средозащитный потенциал территории: морфометрические и литолого-петрографические характеристики, мерзлотные условия, а также особенности почвенно-растительного покрова. Результаты проведенного анализа систематизированы в картографическом виде (составлена карта уязвимости территории к освоению). При разработке карты уязвимости территории все исходные данные были оцифрованы и преобразованы в растровый формат. На основе значений пикселей (разрешением 30×30 м) была проведена классификация территории по четырём категориям уязвимости с присвоением соответствующих баллов. Интегральный индекс уязвимости определялся как сумма баллов по всем учитываемым факторам. Показано, что сочетание разнородных факторов обуславливает мозаичную структуру уязвимости территории к внешним воздействиям. Это обстоятельство требует дифференцированного подхода к хозяйственному освоению территории, первым этапом которого должно стать её специализированное зонирование для оценки геоэкологических ограничений. В пределах городского округа «Норильск» выделены четыре типа территорий, ранжированные по степени уязвимости к освоению (от минимальной до максимальной). Наименее уязвимые участки, отнесённые к I категории, приурочены к трапповым массивам. Территории, отнесённые к III и IV категориям, классифицируются как уязвимые и очень уязвимые. Они локализуются прежде всего на озёрных и речных террасах. Учитывая планы по застройке участков в их пределах, необходимо разработать систему индикаторов для мониторинга состояния криогенных геосистем в условиях антропогенной трансформации.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, риски деградации многолетнемёрзлых пород, уязвимость территории, адаптация к изменениям климата, техногенез, арктические города, г. Норильск

Для цитирования: Алтухов М.И., Медведков А.А. Геоэкологическое зонирование Норильского промышленного района для управления рисками освоения его территории // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2026. Т. 12. № 2. С. 26-33. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-26-33. EDN PCDVBZ.

Section 2. POLLUTION

Original Paper

Geoecological zoning of the Norilsk industrial region to manage territorial development risks

Michael I. Altukhov, Alexey A. Medvedkov ✉
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
✉ a-medvedkov@bk.ru

Abstract. Relevance and problem formulation. Norilsk is the largest city in the Arctic, located in a permafrost zone. Despite this unique feature, the city's territory is heterogeneous in its geological and geographical conditions, creating the potential for unfavorable engineering and geological processes, which is important to consider when developing new sites

© Алтухов М.И., Медведков А.А., 2026

within the city district. Therefore, this paper examines environmental factors that determine the vulnerability of the Norilsk industrial district to development in a warming climate. Materials and Methods. Based on the analysis of published and archived materials, as well as remote sensing data, information on the factors determining the denudation and environmental protection potential of the territory has been summarized: morphometric and lithological-petrographic characteristics, permafrost conditions, as well as features of the soil and vegetation cover. The Results of the analysis have been systematized in cartographic form (a map of the territory's vulnerability to development has been compiled). In developing the vulnerability map, all initial data was digitized and converted to raster format. Based on pixel values (30x30 m resolution), the territory was classified into four vulnerability categories and assigned corresponding scores. The integrated vulnerability index was determined as the sum of scores for all factors considered. It was shown that the combination of diverse factors results in a mosaic structure of the territory's vulnerability to external influences. This circumstance requires a differentiated approach to the economic development of the territory, the first stage of which should be its specialized zoning to assess geoecological constraints. Within the Norilsk urban district, four types of territories have been identified, ranked by their vulnerability to development (from minimal to maximal). The least vulnerable areas, classified as Category I, are located within trap massifs. Areas classified as Categories III and IV are classified as vulnerable and very vulnerable. They are primarily located on lake and river terraces. Given development plans within these areas, it is necessary to develop a system of indicators for monitoring the state of cryogenic geosystems under conditions of anthropogenic transformation.

Keywords: permafrost, risk of permafrost degradation, vulnerability of the territory, adaptation to climate change, technogenesis, Arctic cities, Norilsk

For citation: Altukhov M.I., Medvedkov A.A. Geoecological zoning of the Norilsk industrial region to manage territorial development risks. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2026. Vol. 12. Iss. 2. P. 26-33. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-26-33. EDN PCDVBZ. (in Russian)

Введение

Актуальность исследования. Норильский промышленный район (в административных границах городского округа «Норильск») является крупнейшим центром горнодобывающей и металлургической промышленности в Российской Арктике, расположенный в условиях криолитозоны. На протяжение десятилетий Норильск не терял миграционной привлекательности. Это обстоятельство способствовало развитию массовой застройки городских пространств (Замятина, Пилясов, 2018). Норильск в широком понимании – это группа населённых пунктов (г. Норильск, включая Талнах, Кайеркан, Оганер, а также пос. Снежногорск). Его дальнейшее развитие, особенно той части территории, которая рассматривается в качестве перспективной для застройки, ограничивается геоэкологическими факторами: наличие мёрзлых пород с высокой льдистостью, значительный из-за морфометрических особенностей потенциал для активизации криогенных процессов, заметное ослабление средозащитной функции растительного покрова в условиях накопленного аэротехногенного загрязнения, усиление городского острова тепла и др. В связи с этим представляется актуальным проведение зонирования территории г.о. Норильск по геоэкологическим факторам (Замятина и др., 2023; Медведков, 2021), ограничивающим её освоение. Полученные результаты позволят подойти к обсуждению перспектив освоения столь разнообразной в природном отношении территории с позиции оценки геоэкологических угроз (рисков) и потенциала их развития.

Цель исследования – зонирование территории Норильского промышленного района по опасности развития неблагоприятных экзодинамических процессов при её перспективном освоении в условиях сплошной криолитозоны.

Концептуальные основы исследования

Для выполнения геоэкологического зонирования Норильского промышленного района анализировались факторы, определяющие как литокриогенную устойчивость территории (морфометрические, литолого-петрографические и геокриологические характеристики), так и восстановительную способность ее геосистем (особенности почвенно-растительного покрова). В условиях криолитозоны, помимо морфометрических и литолого-петрографических факторов (состава грунтов на поверхности), важно принимать во внимание и особенности мерзлотных условий (табл. 1 / tabl. 1). Представляется, что из геокриологических факторов на литокриогенную устойчивость территории влияют: льдистость и температура мерзлых пород (Зотова, Мариняк, 2024), а также мощность мерзлых пород (определяет инерционность состояния геосистем при внешних воздействиях). Характеристики растительного покрова определяют не только эффективность теплоизолирующей функции, влияя на особенности теплообмена в условиях криолитозоны, но и позволяют судить о восстановительном потенциале геосистем (Медведков, 2021; Ponomareva et al., 2025).

Важнейшие особенности природно-географических условий в пределах Норильского промышленного района в обобщённом виде, а также общие подходы к их оценке, представлены в табл. 1. Каждому фактору присваивался оценочный балл, характеризующий потенциал развития процессов экзодинамики (потенциальную уязвимость территории к освоению) в условиях криолитозоны, ярусного строения рельефа и пониженной биологической продуктивности фитоценозов. Соответственно, чем более значима роль рассматриваемого фактора в реализации денудационного потенциала территории, тем выше балл. Например, распространение скальных грунтов (базальты, габбро-долериты) оценивалось самым низким баллом (1 балл), а развитие дисперсных отложений аргиллитов и глин, к которым приурочены высокольдистые породы, – самым высоким баллом (4 балла). Аналогично оценивались и другие факторы: чем выше чувствительность конкретного компонента природной среды к внешним воздействия (рыхлые отложения наибольшей мощности; крутые склоны, ориентированные на юг; мерзлые породы с более высокой температурой и др.) или более

замедленная способность к восстановлению растительного сообщества, обладающего более высоким средозащитным потенциалом, тем выше балл. Ниже более подробно рассматривается роль каждого из факторов, представленных в табл. 1 / tabl. 1, в реализации денудационного потенциала территории.

Таблица 1

Природно-географические особенности Норильского промышленного района и общие подходы к их оценке в контексте анализа потенциальной уязвимости территории к освоению

Table 1

Natural and geographical features of the Norilsk industrial region and general approaches to their assessment in the context of the analysis of the potential vulnerability of the territory to development

Типы грунтов // Types of soil	*Мерзлотные условия // Permafrost conditions*	*Рельеф // Relief*	*Почвенный покров // Soil cover*	*Растительные сообщества // Plant communities*	*Потенциал развития процессов экзодинамики // The potential for the development of exodynamics processes*
Базальты, габбродолериты	Сплошное распространение, мощность > 400 м, температура < -4°С, промерзание устойчивое	Пологие выпуклые склоны северной экспозиции	Каменистые россыпи	Мохово-лишайниковые тундры	1 низкий
Туфы, известняки, гравий / дресва с заполнителем	Сплошное распространение, мощность 200-400 м, температура от -3 до -5°С, промерзание длительное устойчивое	Крутые склоны и поверхности выравнивания	Перегнойно-карбонатные, перегнойно-глеевые	Кустарничковые тундры (ерниковые, голубично-брусничные, багульниковые)	2 средний
Песчаники, алевролиты, пески, мергели	Преимущественно сплошное распространение, мощностью 100-200 м, температура от -1 до -3°С, промерзание полу переходное	Крутые склоны южной экспозиции	Подбуры тундровые, глеевые торфянисто-перегнойные	Кустарниковые тундры (ивняки, ольховники), полигональные тундры	3 высокий
Аргиллиты, глины	Несплошное прерывистое распространение мощностью < 150 м, температура от +1 до -2°С	Вогнутые склоны и ложбинные понижения южной экспозиции	Торфянисто-глеевые	Осоково-пушицевые тундры и кочкарные болота, лиственничные редколесья, гигрофитные луговые сообщества, техногенные ландшафты с пионерными сообществами	4 очень высокий

Рельеф (морфометрические характеристики). Большую роль играет экспозиция склонов: северные склоны получают меньше солнечной радиации, что способствует консервации мерзлотных условий, а южные – больше, что при прочих равных условиях увеличивает глубину протаивания. Немаловажным фактором является и крутизна поверхностей – с её увеличением растёт риск интенсивности солифлюкции и оползания. Морфология склонов также влияет на интенсивность криогенных процессов. Опускание кровли мерзлоты наблюдается в понижениях рельефа (хасыреи, ложбины стока, лога), где формируется наиболее мощный снежный покров, препятствующий зимнему охлаждению (Шполянская и др., 2022).

Соответственно, баллы назначались исходя из имеющейся информации о крутизне, экспозиции, кривизне поверхности, а также дополнительно учитывалась абсолютная высота местности. Наименьшая уязвимость – у субгоризонтальных поверхностей с меньшей энергией рельефа (крутизна < 2°), экспозиционно холодных склонов и территорий с наибольшими абсолютными отметками, где мерзлота холоднее и мощнее. Средний балл характерен для склонов, крутизной 2-5°, более высоким баллом оценивались склоны, крутизной 5-10° и вогнутые формы, аккумулирующие влагу и снег. Самым максимальным баллом оценивались склоны с крутизной > 10°, имеющие южную или западную экспозицию, а также плоские территории с гипсометрически низкими отметками (долины, поймы), на которых распространены термокарстовые озёра.

Состав грунтов: скальные грунты. Скальные разности, такие как базальты и габбро-долериты, практически инертны к термическому воздействию, поскольку лёд в них не является структурным элементом, и при оттаивании их свойства остаются неизменными. Менее устойчивы туфы, известняки и гравийно-дресвяные отложения с заполнителем: обладая относительно высокой теплопроводностью, они теряют прочность при таянии льда, заполняющего поры и трещины. Ещё более чувствительными оказываются песчаники и мергели, которые при насыщении льдом глубоко промерзают, но при оттаивании в них формируются и расширяются трещины (Гаврильев, 1998; Ракита, 1983).

Состав грунтов: рыхлые отложения. Тип рыхлых отложений в значительной степени определяет их льдистость. Так, льдистость многолетнемёрзлых пород различается в зависимости от свойств грунтов – типов четвертичных образований: малольдистые, преимущественно пески и скальные породы (содержание льда – менее 20%), среднельдистые суглинки и супеси (содержание льда 20-40%) и сильнольдистые, представленные озёрно-болотными и аллювиальными типами

генетических отложений в форме торфяных масс и суглинистых накоплений (содержание льда – более 40%) (Ракита, 1983). Максимальные проявления деградационных процессов будут приурочены к участкам, сложенным льдистыми суглинками (Ривкин, Булдович, 2025). Таким образом, наиболее уязвимыми являются аргиллиты и глины, характеризующиеся высокой льдистостью за счёт большого объёма связанной воды, что при оттаивании ведёт к полной потере их несущей способности (Гаврильев, 1998).

Балльная оценка уязвимости грунтов основывалась на учёте сочетания следующих характеристик: теплопроводности, льдистости и трещиноватости. Наиболее устойчивыми признаны базальты и габбро-долериты, т.к. высокая плотность и массивная текстура обеспечивают низкую пористость и льдистость. В таких условиях лёд не является структурным элементом этих грунтов, поэтому оттаивание не меняет их свойства – им присвоен минимальный балл. Известняки и гравийно-дресвяные отложения с ледовым заполнителем получили средний балл, т.к. при относительно высокой теплопроводности они теряют прочность, это происходит при таянии льда в порах и трещинах. Песчаники, алевролиты и мергели оценены как более уязвимые – при насыщении льдом они глубоко промерзают, но при оттаивании в них формируются и расширяются трещины. Максимальный балл присвоен аргиллитам и глинам: тонкодисперсный состав и большой объём связанной воды обусловливают высокую льдистость, и при оттаивании они полностью теряют свою несущую способность.

Геокриологические условия. Исходное состояние мёрзлой толщи определяет её инерционность. Там, где температуры пород крайне низки (ниже -4°C ... -5°C), а мощность весьма значительна, многолетняя мерзлота более устойчива к внешним воздействиям. При температурах, близких к 0°C (от -1°C до -3°C), и малой мощности мёрзлых пород, толща находится в состоянии неустойчивого равновесия: наличие таликов и незамёрзшей воды делает её крайне чувствительной к любому тепловому импульсу (French, 2018).

Баллы определялись исходя из совокупного анализа геокриологических характеристик: температуры, льдистости и мощности многолетней мерзлоты, типа промерзания и глубины сезонного протаивания. Наиболее низким баллом были оценены участки с температурой пород ниже -4…-5 °C и мощностью 300-500 м – их инерционность максимальна. Повышение балла следовало при приближении температуры к 0°C (от -1 до -3°C) и уменьшении мощности мёрзлых пород до 50-100 м, особенно в зонах тектонических нарушений с таликами, где толща находится в неустойчивом равновесии. Толщи с массивной криогенной текстурой оценивались более низким баллом, как менее уязвимые, тогда как отложения с высокой льдистостью и повторно-жильными льдами – максимальным баллом. Глубина сезонного протаивания также учитывалась: минимальные значения (0,3-0,8 м) свидетельствовали о пониженной уязвимости, а максимальные (4,5-5,5 м) – о повышенной.

Почвенный покров также вносит вклад в регулирование теплового режима дневной поверхности. Каменистые россыпи из-за высокой теплопроводности и низкой влагоёмкости не выполняют термоизолирующую функцию. Перегнойно-карбонатные и арктотундровые почвы обеспечивают слабую изоляцию, но их высокая щебнистость и близость льдистой мерзлоты создают предпосылки для пучения и термокарста при антропогенных нарушениях. Наибольшее защитное значение имеют подбуры и торфянисто-перегнойные глеевые почвы: органические горизонты этих типов почв эффективно изолируют мерзлоту, однако при их разрушении защитный эффект исчезает, и оглеенные горизонты, насыщенные влагой, начинают активно проводить тепло, провоцируя деградацию мерзлоты. В аквальных обстановках мерзлота практически отсутствует (He et al., 2022).

Оценка основана на учёте мощности органогенного горизонта. Косвенно эта информация позволяет судить о теплопроводности, влагоёмкости и фильтрационной способности этого типа почвогрунтов. Самый низкий балл присвоен каменистым суглинистым почвам и каменным россыпям, они индицируют «сухую» мерзлоту и стабильный режим благодаря дренированности. Торфянисто-глеевые почвы с мощным торфяным горизонтом за счёт высокой пористости и низкой теплопроводности торфа, консервирующего мерзлоту, оценены невысоким баллом, но в данном случае следует сказать о важной теплоизолирующей роли торфяного горизонта. При его нарушении уязвимость территории возрастает. Промежуточный балл – у перегнойно-карбонатных почв и подбуров. Максимально уязвимыми признаны техногенно-нарушенные участки, где почвенный покров сильно нарушен или уничтожен. Это особенно актуально для территорий, попадающих в ареал торфяно-глеевых почв.

Растительность выступает мощным терморегулятором мёрзлых пород: затеняет почвы и обеспечивает изолирующий слой, который уменьшает летний поток тепла. Мхи и органическое вещество в почве увеличивают водоудерживающую способность, влияя на гидрологические свойства. Мощные моховые покровы и органические горизонты почвы способствуют уменьшению толщины деятельного слоя (Walker et al., 2003). Кустарничковые тундры в летнее время создают затенение, но зимой задерживают снег, что несколько повышает температуру мёрзлых пород. Высокие кустарники эффективно аккумулируют снег, создавая мощный теплоизолирующий слой, который препятствует глубокому промерзанию почвогрунтов, что повышает уязвимость мёрзлых пород. Наибольшую опасность представляют переувлажненные участки и лиственничные редколесья с глубоким протаиванием грунтов, и техногенные ландшафты, где из-за отсутствия теплоизолирующего покрова грунт максимально прогревается.

Присваиваемые баллы отражали анализ следующих характеристик: теплоизоляционных свойств фитомассы, альбедо поверхности, глубину корневой системы и влияние растительности на снегонакопление. Минимальная уязвимость – у мохово-лишайниковых тундр: сплошной моховой ярус до 10 см с низкой теплопроводностью и высоким альбедо дают наименьшее

сезонное протаивание. Кустарничковые тундры оценены более высоким баллом из-за наличия отепляющего эффекта снегозадержания. Лиственничные редколесья получили промежуточный балл: летнее затенение и зимнее снегонакопление создают сложный тепловой режим, а глубокие корни способствуют локальному растеплению. Осоково-пушицевые тундры и кочкарные болота – наиболее уязвимы, они оценены наиболее высоким баллом из-за экстремальной льдистости, активного льдообразования и интенсивного термокарста при нарушении напочвенного покрова. Техногенные пионерные сообщества с низким проективным покрытием оценены максимальным баллом, поскольку отсутствие теплоизоляции увеличивает сезонное протаивание в 1,5-3 раза.

Хозяйственная деятельность коренным образом трансформирует тепловой режим почвогрунтов. На фоновых территориях и под уплотнёнными покрытиями возможна даже аггредация мерзлоты. Линейные сооружения создают контраст: под насыпью мерзлота может сохраняться, но у откосов из-за снегонакопления начинается её деградация. На селитебных территориях комплексное воздействие (тепловыделение зданий, утечки из коммуникаций) ведет к формированию техногенных таликов и просадкам (Shiklomanov et al., 2017). Наибольшую опасность представляют горно-промышленные комплексы и хвостохранилища, где мерзлота уничтожается на значительную глубину, а отвалы становятся очагами развития активных криогенных процессов.

Материалы и методы исследования

Для сбора первичного материала с целью последующего зонирования рассматриваемой территории по важнейшим параметрам природной среды использованы следующие картографические материалы: карты дочетвертичных и четвертичных образований РФ масштаба 1: 1 000 000 (Государственная геологическая карта РФ, 2016); ландшафтно-геоэкологическая карта Норильского промышленного района масштаба 1: 500 000[1] (Горшков, 1988); геокриологическая карта СССР масштаба 1: 2 500 000[2]; а также почвенная карта РФ масштаба 1: 2 500 000 (1988).

С целью индикации разного состояния почвенно-растительного покрова рассчитывались NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDWI (Normalized Difference Water Index) и LST (Land Surface Temperature). Эти показатели характеризуют экологически значимые свойства ландшафта и учитывают специфику криолитозоны (Высоцкая, Медведков, 2023). Для их расчета на рассматриваемую территорию использованы космические снимки Landsat 8-9 за 2025 г. и высокоточная цифровая модель рельефа ArcticDEM с 30-метровым разрешением, на основе которой рассчитаны морфометрические характеристики: крутизна склонов, форма поверхности и экспозиция. Количественные данные, полученные с использованием упомянутых материалов, использовались в данной оценке с целью дифференциации влияния природно-географических факторов на пространственном уровне (в т.ч. для уточнения границ растительных сообществ с разной биологической продуктивностью и выделения участков с наибольшим потенциалом для развития денудации).

Информация об антропогенной нагрузке на рассматриваемой территории, представленной в виде таких объектов инфраструктуры, как селитебная застройка, горнодобывающие и обрабатывающие предприятия, их хвостохранилища, а также транспортные пути сообщения, получена с использованием генерального плана г. Норильска, а также данных OSM.

Карта уязвимости территории Норильского промышленного района к освоению (рис. 1 / fig. 1) разработана на основе использования указанных выше картографических материалов, снимков Landsat 8-9 и ЦМР ArcticDEM с учётом экспертной оценки роли факторов (табл. 1 / tabl. 1), определяющих потенциал развития неблагоприятных инженерно-геокриологических процессов. Из технических инструментов использовались переклассификация растров и получение взвешенной суммы в программе ArcGIS PRO.

Таким образом, в ходе построении итоговой карты (рис. 1/ fig. 1), все имеющиеся материалы были оцифрованы и конвертированы в растровое изображение. После этого, была проведена классификация по значению пикселя растра (30х30 м), что позволило выделить области, относящиеся к четырём категориям уязвимости с присвоением соответствующего балла. Интегральный индекс уязвимости рассчитывался как сумма баллов за оцениваемые особенности каждого из рассматриваемых факторов. Таким образом, с использованием экспертного подхода, были выделены следующие категории (градации), позволяющие говорить о дифференциации территории по сложности (опасности) её освоения (табл. 1 / tabl. 1):

- I категория *(устойчивые / низкая уязвимость)*: 15-20 баллов;
- II категория *(относительно устойчивые / средняя уязвимость)*: 20-24 баллов;
- III категория *(уязвимые / высокая уязвимость)*: 24-28 баллов;
- IV категория *(особо уязвимые / очень высокая уязвимость)*: 28-35 баллов.

Основные результаты исследования

Карта уязвимости территории Норильского промышленного района (масштаб 1: 300 000) к освоению, разработанная на основе рассмотренных выше подходов, представлена на рис. 1 / fig.1.

На основе проведённого анализа и разработанного зонирования, выявлены следующие закономерности:

I категория – это наиболее благоприятные для техногенного освоения территории с позиции их литокриогенной устойчивости. Такие участки приурочены к выровненным поверхностям трапповых плато (северо-восток и юго-запад Норильского промышленного района), где распространены скальные породы с каменистой тундрой и/или разреженной мохово-лишайниковой растительностью. Здесь фиксируются наиболее

[1] Эколого-географическая карта Российской Федерации. М 1:4 000 000. М.: ФСГК, 1996. 4 л.

[2] Геокриологическая карта СССР. М 1:25 000000. М.: Гидроспецгеология, 1991. 16 л.

низкие температуры мёрзлых пород (ниже -5°C) с невысокой льдистостью и минимальной глубиной сезонного протаивания.

II категория – относительно благоприятные для освоения. Такие территории включают склоновые поверхности плато с кустарничковой растительностью. Мерзлота здесь сохраняет устойчивость, но чувствительна к возможным нарушениям. Заметим, что именно к этим участкам приурочена техногенная нагрузка в форме горной добычи, что негативно влияет на состояние многолетнемерзлых пород и активизирует деградационные процессы.

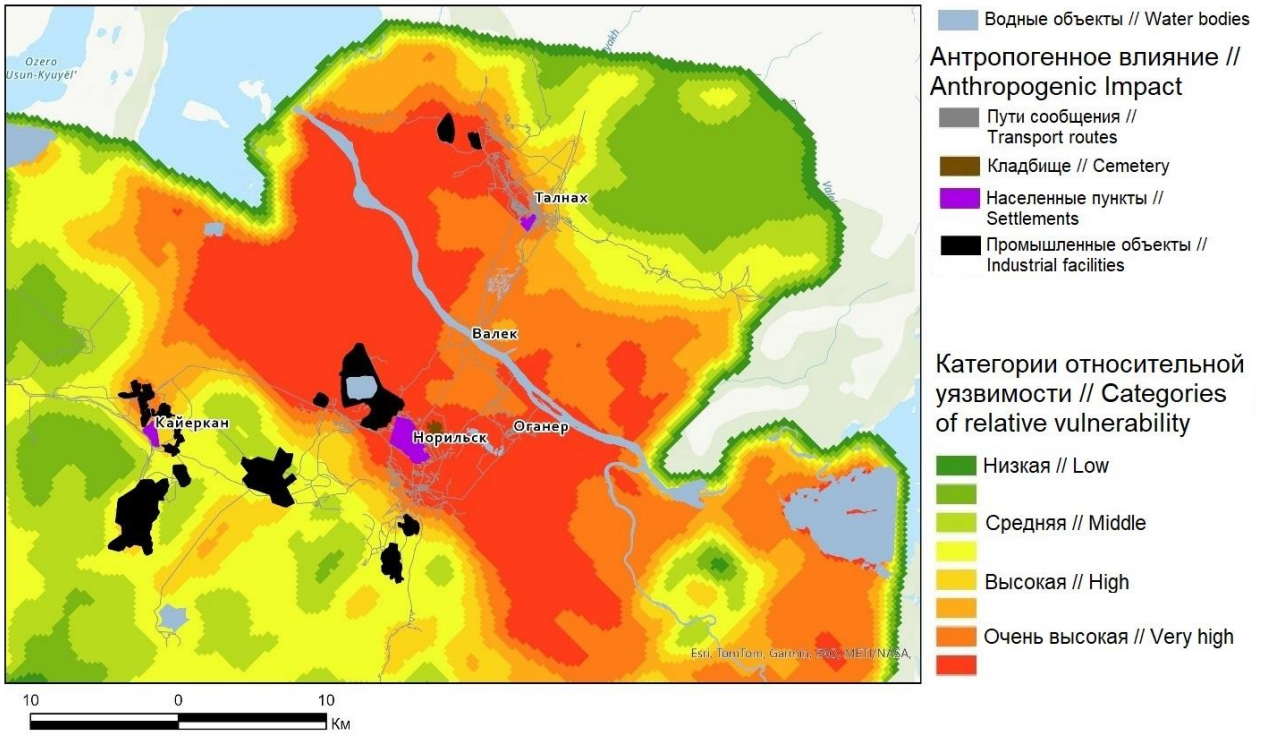


Рис. 1. Уязвимость территории Норильского промышленного района к освоению
Fig. 1. Vulnerability of the Norilsk Industrial Region to Development

III категория с уязвимыми природными комплексами представлена плоскими участками речных и озёрных террас, а также ложбинами стока талых ледниковых вод, по которым заложены малые реки. Участки перекрыты маломощными торфяниками, подстилаются льдистыми осадочными породами (алевритами и известняками).

IV категория – наиболее проблемная. Она включает пойменные участки с погребёнными льдами. Типичен активный термокарст.

Территории, отнесённые к двум категориям (III и IV), планируется активно застраивать, поэтому их освоение требует особого внимания и разработки индикаторов (в т.ч. с использованием ДДЗ), позволяющих судить о состоянии геосистем в нарушенных условиях.

Выводы

1. Важнейшими параметрами, требующими учёта при зонировании территории по геоэкологическим ограничениям освоения, применительно к природным условиям Норильского промышленного района, являются: льдистость и температура мёрзлых пород, а также характер их распространения; мощность органогенного горизонта почв и литолого-петрографический состав грунтов; состав и структура растительного покрова (наличие и мощность мохово-торфяного покрова, наличие кустарников и т.д.), запасы живой фитомассы, а также морфометрические характеристики поверхности (крутизна, кривизна и экспозиция).

2. Наиболее устойчивые участки (с минимальными геоэкологическими ограничениями для рассмотренных природных условий) приурочены к трапповым поверхностям (массивам) под каменистой тундрой и разреженной мохово-лишайниковой растительностью, а наименее устойчивые (уязвимые и очень уязвимые) локализуются на озёрных и речных террасах под маломощными торфяными накоплениями, а также и на пойменных участках с погребённым жильным льдом.

3. Основные рекомендации по управлению инженерно-геокриологическими рисками на территории Норильского промышленного района, которые применимы и для других районов арктической криолитозоны: интеграция геоэкологического зонирования в систему принятия решений; расширение сети геокриологического мониторинга в пределах ландшафтных урочищ, характеризующихся высокой репрезентативностью для освоенной и осваиваемой территории; планирование работ по вывозу и ликвидации снегоотвалов на урбанизированных территориях; обязательное страхование геокриологических рисков для населения и хозяйственных объектов; введение системы субсидий и налоговых льгот для предприятий, направляющих инвестиции в обеспечение экологической (в т.ч. и геокриологической) безопасности.

Финансирование

Основная часть исследования выполнялась при финансовой поддержке гранта Минобрнауки РФ «Глобальные климатические вызовы на территории России: ретроспективный анализ, прогноз и механизмы адаптации» (соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024).

Funding

The study was supported by a grant from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation «Global Climate Challenges in Russia: Retrospective Analysis, Forecast, and Adaptation Mechanisms» (agreement No. 075-15-2024-554 dated April 24, 2024).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии оснований, способных повлиять на объективное отражение результатов проведённого исследования.

Conflicts of interest

The authors declare that there are no grounds that could influence the objective reflection of the results of the study.

Сведения об авторском вкладе

М.И. Алтухов – сбор и обработка данных дистанционного зондирования, расчёт индекса уязвимости, картографическая визуализация результатов исследования, подготовка первого (чернового) варианта рукописи статьи.

А.А. Медведков – формулирование идеи и научной гипотезы, разработка концепции исследования, постановка исследовательских задач, поиск картографических материалов, использованных в ходе исследовательского анализа, научное редактирование текста статьи и подготовка его финального варианта.

Contribution of the authors

M.I. Altukhov – collection and processing of remote sensing data, vulnerability index calculation, cartographic visualization of research results, preparation of the first draft of the article.

A.A. Medvedkov – formulation of the idea and scientific hypothesis, research concept development, setting research objectives, search for cartographic materials used in the research analysis, scientific editing of the article, and preparation of its final version.

Список источников

1. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны / под ред. В.Т. Балобаева. Новосибирск: СО РАН, 1998. 280 с.
2. Горшков С.П. Концептуальные основы геоэкологии. Смоленск: СГУ, 1998. 447 с.
3. Высоцкая А.А., Медведков А.А. Информационные ресурсы для оценки экологического потенциала геосистем (на примере территории Енисейского Севера) // *ИнтерКарто. ИнтерГИС*, 2023. Т. 29. № 1. С. 20-33. https://doi.org/10.35595/2414-9179-2023-1-29-20-33
4. Замятина Н.Ю., Клюева В.П., Гончаров Р.В., Бурцева А.В., Котов Е.А., Медведков А.А., Молодцова В.А., Никитин Б.В., Пилясов А.Н., Поляченко А.Е., Стрелецкий Д.А., Шамало И.А. Жизнестойкость арктических городов: теория, комплексный анализ и примеры трансформации: коллективная монография / под ред. Н.Ю. Замятиной. М.: Изд. решения, 2023. 206 с.
5. Замятина Н.Ю., Пилясов А.Н. Российская Арктика: к новому пониманию процессов освоения. М.: ЛЕНАНД, 2018. 400 с.
6. Зотова Л.И., Мариняк С.В. Геоэкологические аспекты мерзлотно-ландшафтной дифференциации территории Российской Арктики // *Проблемы региональной экологии*. 2024. № 1. С. 44-49. https://doi.org/10.24412/1728-323X-2024-1-44-49
7. Медведков А.А. Геоэкологические факторы жизнестойкости арктических городов в криолитозоне: теоретические подходы к изучению // *Известия РАН. Серия географическая. 2021*. Т. 85. № 5. С. 726-739. https://doi.org/10.31857/S2587556621050071
8. Ракита С.А. Природа и хозяйственное освоение Севера. М.: МГУ, 1983. 190 с.
9. Ривкин Ф.М., Булдович С.Н. Закономерности формирования криогенного рельефа как результат парагенезиса оттаивания и промерзания грунтов // *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*. 2025. № 12. С. 372-380.
10. Шполянская Н.А., Осадчая Г.Г., Малкова Г.В. Современное изменение климата и реакция криолитозоны (на примере Западной Сибири и Европейского Севера России) // *Географическая среда и живые системы.* 2022. № 1. С. 6-30. https://doi.org/10.18384/2712-7621-2022-1-6-30
11. French H.M. The Periglacial Environment. Fourth Edition. Chichester, UK; Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 2018. 515 p.
12. He R., Jin H., Jia N., Wang H., Jin X., Li X. Thermal conductivity contrast effect of organic soils and its environmental implications // *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 196: 103485. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103485
13. Medvedkov A.A., Vysotskaya A.A., Olchev A.V. Detection of Geocryological Conditions in Boreal Landscapes of the Southern Cryolithozone Using Thermal Infrared Remote Sensing Data: A Case Study of the Northern Part of the Yenisei Ridge // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. Iss. 2. 291. https://doi.org/10.3390/rs15020291

14. Walker D.A., Jia G.J., Epstein H.E., Raynolds M.K., Chapin F.S, Copass C., Hinzman L.D., Knudson J.A., Maier H.A., Michaelson G.J., Nelson F., Ping C.L., Romanovsky V.E., Shiklomanov N. Vegetation Soil Thaw Depth Relationships along a Low-Arctic Bioclimate Gradient, Alaska: Synthesis of Information from the ATLAS Studies // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2003. Vol. 14. P. 103-123. https://doi.org/10.1002/ppp.452

15. Ponomareva T.V., Litvintsev K.Y., Finnikov K.A., Yakimov N.D., Ponomarev G.E., Ponomarev E.I. The Variability in the Thermophysical Properties of Soils for Sustainability of the Industrial Affected Zone of the Siberian Arctic // *Sustainability*. 2025. Vol. 17. Iss. 19. 8892. https://doi.org/10.3390/su17198892

16. Shiklomanov N., Streletskiy D., Grebenets V., Suter L. Conquering the permafrost: urban infrastructure development in Norilsk, Russia // *Polar Geography.* 2017. Vol. 40. P. 273-290. https://doi.org/10.1080/1088937X.2017.1329237

References

1. Gavriliev R.I. Thermophysical Properties of Rocks and Soil Covers of the Cryolithozone. In: Balobaev V.T. (ed.). Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1998. 280 p. (in Russian)

2. Gorshkov S.P. Conceptual Foundations of Geoecology. Smolensk: Saratov State University publ. 1998. 447 p. (in Russian)

3. Vysotskaya A.A., Medvedkov A.A. Information Resources for Assessing the Environmental Potential of Geosystems (on the example of the territory of the Yenisei North). *InterCarto. InterGIS*. 2023. Vol. 29. Iss. 1. P. 20-33. https://doi.org/10.35595/2414-9179-2023-1-29-20-33 (in Russian)

4. Zamyatina N.Yu., Klyueva V.P., Goncharov R.V., Burtseva A.V., Kotov E.A., Medvedkov A.A., Molodtsova V.A., Nikitin B.V., Pilyasov A.N., Polyachenko A.E., Streletsky D.A., Shamalo I.A. Resilience of Arctic Cities: Theory, Comprehensive Analysis, and Transformation Examples: collective Monograph. In: by Zamyatina, N.Yu. (ed.). Moscow: Resheniya Publishing House, 2023. 206 p. (in Russian)

5. Zamyatina N.Yu., Pilyasov A.N. Russian Arctic: Toward a New Understanding of Development Processes. Moscow: LENAND publ., 2018. 400 p. (in Russian)

6. Zotova L.I., Marinyak S.V. Geoecological Aspects of Permafrost-Landscape Differentiation of the Russian Arctic. *Problems of Regional Ecology*. 2024. Iss.1. P. 44-49. https://doi.org/10.24412/1728-323X-2024-1-44-49 (in Russian)

7. Medvedkov A.A. Geoecological Factors of Resilience of Arctic Cities in the Cryolithozone: Theoretical Approaches to the Study. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series.* 2021. Vol. 85. Iss. 5. P. 726-739. https://doi.org/10.31857/S2587556621050071 (in Russian)

8. Rakita S.A. Nature and Economic Development of the North. Moscow: Moscow State University publ., 1983. 190 p. (in Russian)

9. Rivkin F.M., Buldovich S.N. Patterns of Cryogenic Relief Formation as a Result of Soil Thawing and Freezing Paragenesis. *Relief and Quaternary Formations of the Arctic, Subarctic, and Northwest Russia.* 2025. Iss. 12. P. 372-380. (in Russian)

10. Shpolyanskaya A.A., Osadchaya G.G., Malkova G.V. Modern Climate Change and the Response of the Cryolithozone (using Western Siberia and the European North of Russia as an Example). *Geographical Environment and Living Systems*. 2022. Iss. 1. P. 6-30. https://doi.org/10.18384/2712-7621-2022-1-6-30 (in Russian)

11. French H.M. The Periglacial Environment. Fourth Edition. Chichester, UK; Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 2018. 515 p.

12. He R., Jin H., Jia N., Wang H., Jin X., Li X. Thermal conductivity contrast effect of organic soils and its environmental implications. *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 196: 103485. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103485

13. Medvedkov A.A., Vysotskaya A.A., Olchev A.V. Detection of Geocryological Conditions in Boreal Landscapes of the Southern Cryolithozone Using Thermal Infrared Remote Sensing Data: A Case Study of the Northern Part of the Yenisei Ridge. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. Iss. 2. 291. https://doi.org/10.3390/rs15020291

14. Walker D.A., Jia G.J., Epstein H.E., Raynolds M.K., Chapin F.S, Copass C., Hinzman L.D., Knudson J.A., Maier H.A., Michaelson G.J., Nelson F., Ping C.L., Romanovsky V.E., Shiklomanov N. Vegetation Soil Thaw Depth Relationships along a Low-Arctic Bioclimate Gradient, Alaska: Synthesis of Information from the ATLAS Studies. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2003. Vol. 14. P. 103-123. https://doi.org/10.1002/ppp.452

15. Ponomareva T.V., Litvintsev K.Y., Finnikov K.A., Yakimov N.D., Ponomarev G.E., Ponomarev E.I. The Variability in the Thermophysical Properties of Soils for Sustainability of the Industrial Affected Zone of the Siberian Arctic. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. Iss. 19. 8892. https://doi.org/10.3390/su17198892

16. Shiklomanov N., Streletskiy D., Grebenets V., Suter L. Conquering the permafrost: urban infrastructure development in Norilsk, Russia. *Polar Geography.* 2017. Vol. 40. P. 273-290. https://doi.org/10.1080/1088937X.2017.1329237

Поступила в редакцию / Received: 17.03.2026
Поступила после рецензирования / Revised: 29.06.2026
Принята к публикации / Accepted: 15.08.2026

Обзорная статья
УДК 502.175:528.8
https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-34-47
https://elibrary.ru/qgwwix

Оценка техногенного воздействия добычи нефти и газа на природную среду по данным ДЗЗ: обзор исследований

Роман Эдуардович Иванов✉
Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия
✉ rivanov044@gmail.com

Аннотация. Настоящая работа представляет собой обзор методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для оценки и мониторинга техногенного воздействия добычи нефти и газа на природную среду. Подробно рассмотрены спектральные и радиолокационные критерии дешифрирования основных видов геохимических и физических нагрузок: битумизация (нефтяные загрязнения), галогенез (засоление), механогенез (механическое нарушение ландшафтов) и атмосферное загрязнение. Показано, что для выявления нефтяных загрязнений почв наиболее информативен индекс NDVI, где значения от -0,25 до 0,15 достоверно указывают на наличие нефтяных пленок; на водных объектах нефтяные «слики» детектируются по радиолокационным снимкам Sentinel-1 в поляризации VV, как зоны пониженного обратного рассеяния. Для идентификации техногенного галогенеза (засоления) применяется индекс NDSI: значения <0,02 соответствуют фоновым почвам, 0,08-0,15 – среднезасоленным, а >0,25 – солончакам с мощной солевой коркой. Оценка механогенеза базируется на индексах SAVI (деградированные почвы: от -0,1 до 0,1), NDVI (отсутствие растительности: 0,133-0,166), NDBI (степень запечатывания почв инфраструктурой) и BSI (выделение обнаженных грунтов). Мониторинг атмосферного загрязнения включает выявление шлейфов метана по мультиспектральным данным Sentinel-2 (SWIR-каналы) и фиксацию осаждения сажи на снежном покрове в зимний период.

Ключевые слова: механогенез, битумизация, галогенез, вегетационный индекс, Sentinel, Landsat, экологический мониторинг

Для цитирования: Иванов Р.Э. Оценка техногенного воздействия нефтегазовой отрасли на природную среду по данным ДЗЗ // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2026. Т. 12. № 2. С. 34-47. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-34-47. EDN QGWWIX.

Section 1. POLLUTION

Review Paper

Assessment of the anthropogenic impact of the oil and gas industry on the natural environment based on remote sensing data

Roman E. Ivanov✉
Perm State University, Perm, Russia
✉ rivanov044@gmail.com

Abstract. This review examines Earth remote sensing methods for assessing and monitoring the anthropogenic impact of oil and gas extraction on the natural environment. It details the spectral and radar interpretation criteria for identifying key types of geochemical and physical stressors: bitumenization (oil contamination), halogenesis (salinization), mechanogenesis (mechanical landscape disturbance), and atmospheric pollution. The study demonstrates that the NDVI index is the most informative tool for detecting oil contamination in soils, with values between -0.25 and 0.15 reliably indicating the presence of oil films; in water bodies, oil slicks are detected via Sentinel-1 radar imagery (VV polarization) as zones of reduced backscatter. The NDSI index is used to identify anthropogenic halogenesis (salinization): values <0.02 correspond to background soils, 0.08-0.15 to moderately saline soils, and >0.25 to salt flats with thick salt crusts. Assessment of mechanogenesis relies on the SAVI index (degraded soils: -0.1 to 0.1), NDVI (absence of vegetation: 0.133-0.166), NDBI (degree of soil sealing by infrastructure), and BSI (identification of exposed soil). Monitoring of atmospheric pollution involves detecting methane plumes using Sentinel-2 multispectral data (SWIR channels) and tracking soot deposition on snow cover during the winter season.

Key words: mechanogenesis, bituminization, halogenesis, vegetation index, Sentinel, Landsat, environmental monitoring

For citation: Ivanov R.E. Assessment of the anthropogenic impact of the oil and gas industry on the natural environment based on remote sensing data. *Anthropogenic Ttransformation of Nature*. 2026. Vol. 12. Iss. 2. P. 34-47. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-34-47. EDN QGWWIX. (in Russian)

© Иванов Р.Э., 2026

Введение

В наше время ведется активная добыча нефти и газа, которая играет важную роль в энергетике. Но добыча нефти сопровождается загрязнением экосистем, что являлось и до сих пор является одной из главных экологических проблем. На каждом этапе производства нефтепродуктов, происходят утечки и разливы, связанные с авариями или нарушениями эксплуатации, что приводит к геохимическим (галогенез, битумизация, атмосферное загрязнение) и физическим (механогенез) нагрузкам на природную среду (Бузмаков и др., 2021). К основным источникам загрязнения относятся нефтесодержащие породы, минерализованные пластовые воды, буровые растворы, химические реагенты и кислоты, горюче-смазочные материалы. Кроме того, с выходом высокоминерализованных пластовых вод в природную среду попадают тяжелые металлы такие, как Cd, Cu, Hg, Mo, Pb, Sb, Zn (Чайкин и др., 2025). Глубина проникновения загрязняющих веществ зависит от нескольких факторов: механического состава почв, степени нарушенности, вида загрязняющего вещества и объема выброса, уровня грунтовых вод, рельефа местности и др.

При полноценном мониторинге загрязнения нефтесодержащими продуктами необходимо использовать системный мониторинг (подземный, наземный и дистанционный). Основным способом получения информации, является дистанционный метод диагностики при помощи мультиспектральных и радиолокационных снимков, а подземные и наземные исследования служат для отбора проб и уточнения информации, полученной дистанционно (Остах и др., 2020).

Цель данной работы – проанализировать современные подходы к применению данных дистанционного зондирования Земли (на примере спутниковых группировок Landsat, Sentinel, SPOT, NOAA) для выявления и оценки последствий пяти основных видов техногенного воздействия нефтегазовой отрасли: битумизации, галогенеза, механогенеза, загрязнения атмосферы и газогеохимических аномалий.

Выявление участков нефтепромыслового воздействия по спектральным характеристикам и радиолокационным данным

Нефтяные загрязнения (битумизация)

Одним из основных видов геохимического воздействия на объектах нефтедобычи, является битумизация. Битумизация – это процесс загрязнения почвенного покрова, грунтов, воды и донных осадков углеводородами (Бузмаков и др., 2021).

Выявление новых участков, загрязненные нефтью и продуктами нефтедобывающей промышленности с течением времени, можно проводить при помощи синтеза разновременных мультиспектральных и гиперспектральных снимков (Антонец, 2021). С увеличением содержания нефти и нефтепродуктов в почве спектральная кривая отражения отклоняется от фоновой (чистой) почвы: отражательная способность падает по мере роста уровня загрязнения. При высоких концентрациях загрязнителя кривые спектрального отражения выравниваются и становятся почти горизонтальными во всём диапазоне длин волн (Разакова, 2017).

Для дешифрирования нефтяных пятен на основе снимков Landsat используется комбинация каналов в естественных цветах (RGB): для Landsat-5 и Landsat-7 – 3-2-1, для Landsat-8 – 4-3-2. Но при дешифрировании мелких пятен возникают трудности, в таких случаях применяются инфракрасные диапазоны, так как нефтяные разливы хорошо отслеживаются в ближнем и среднем ИК диапазонах. Связано это с тем, что нефть, как и вода поглощает большую часть излучений в данных спектральных диапазонах. Например, в комбинации каналов SWIR–NIR–Red нефтяные пятна имеют темно-синие или фиолетовые оттенки[1]. При использовании снимков Sentinel-2 для выявления утечек нефтепродуктов наилучшей комбинацией каналов является 12-7-2, в данном синтезе каналов различные антропогенные объекты отображаются в ярко-сиреневом цвете, а нефтяные разливы в красном (рис. 1 / fig. 1) (Гордиенко, 2021).

При загрязнении нефтью, происходит смена фитоценоза, которая проявляется сокращением биоразнообразия. Снижается надземная биомасса, уменьшается высота растений, снижается длина и ширина листьев, а также наблюдается замедление развития растений[2]. Поэтому для выявления загрязнений в районах нефтедобычи также используются вегетационные индексы. Для анализа состояния растительности широко используются два индекса NDVI (нормализованный разностный вегетационный индекс) и SAVI (почвенно-скорректированный индекс растительности) (Кожанов, Кулик, 2021). Данные индексы вычисляются по следующим формулам:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

$$SAVI = \left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED + L}\right) * (1 + L) \quad (2)$$

где NIR – ближний инфракрасный, RED – красный канал, L = [0; 1], L = 0 для наибольшего индекса облиственния, L = 1 для наименьшего, L = 0,5 оптимальное значение, L + 1 – множительный фактор, присутствующий в SAVI, приводящий к тому, что значения изменяются от -1 до 1, вводится для того, чтобы свести эти индексы к виду NDVI при L, стремящемуся к 0 (Разакова, 2017).

Вычисления данных индексов в работе М.Г. Разаковой (2017) показали, что в районе нефтедобычи почва и растительность в области нефтяных пятен имеет низкие значения индексов, а также сильно отличаются фоновые и загрязненные почвы в синтезе коротковолнового ИК и двух индексированных каналов, выполненных на основе NDVI и SAVI, связано это с тем, что нефтепродукты темнее по тону, чем почва и при попадании на нее уменьшают отражательную способность.

[1] Борисов Д.В. Дешифрирование нефтезагрязненных территорий при помощи данных дистанционного зондирования // Использование космических средств и технологий для мониторинга окружающей природной среды. 2014. С. 261-262.

[2] Титова Л.А., Дзюба Е.А. Влияние добычи нефти на природные особенности территории Пермского края // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды: материалы всероссийской школы-семинара, посвященной памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка, 21-22 апреля 2022 г. / под. ред. С.А. Бузмакова. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2022. С. 377-380.



Рис. 1. Нефтяной разлив (выделен красным цветом) и нефтепромысловые объекты в комбинации каналов 12-7-2 Sentinel-2 (Гордиенко, 2021)
Fig. 1. Oil spill (highlighted in red) and oilfield facilities in Sentinel-2 band combination 12-7-2 (Gordienko, 2021)

В.Н. Копылов с соавторами (2009) для обнаружения разливов нефти также предлагают использовать индекс NDVI с экспериментально установленным значением индекса для разливов нефти на почве от -0,25 до 0,15 в программной среде ENVI по следующему алгоритму (рис. 2 / fig. 2):

1. Рассчитать индекс NDVI для исходного космического снимка.
2. Создать маску на основе полученных значений NDVI и исключить территории, значения которых находятся вне диапазона -0,25–0,15.
3. Разделить территорию на 3 класса (нефтезагрязнения, дороги и строения, водоемы) и создать обучающие выборки для каждого класса.
4. Выполнить классификацию по алгоритмам, подобранным к пригодности для распознавания разливов нефти (минимальное расстояние, максимальное правдоподобие и спектральный угол местности).
5. Преобразовать, полученный растровый слой в векторный формат.

При использовании космических снимков высокого разрешения и правильной классификации можно добиться достоверности распознавания нефтяных пятен около 80%.

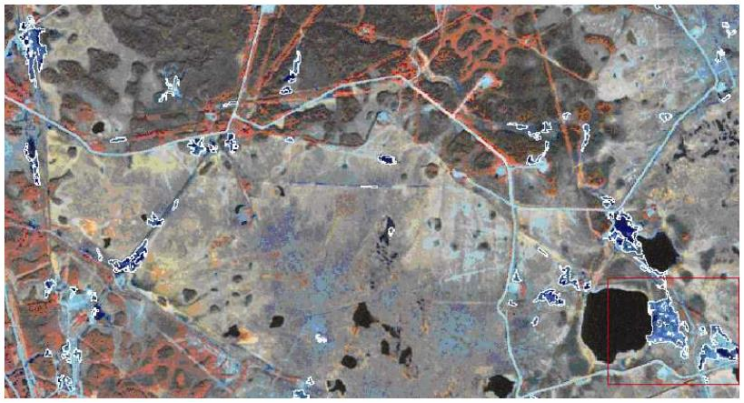


Рис. 2. Выделенные контуры разливов нефти по алгоритму В.Н. Копылова и соавторов (2009)
Fig. 2. Identified oil spill contours using the algorithm of V.N. Kopylov et al. (2009)

При обнаружении нефтяных разливов на водной поверхности основным источником данных являются радиолокационные снимки (Сагатдинова, Нурсеитов, 2024). Радиолокационная съемка – это один из видов аэрокосмической съемки при помощи активного микроволнового датчика, излучающего и принимающего обратно отраженные радиоволны. Существует несколько спутниковых группировок, проводящие радиолокационную съемку: Sentinel – 1A, B, RISAT-1, KOMPSAT-5, ALOS-2, TanDEM-X, TerraSAR-X, COSMO – SkyMed – 1, 2 ,3 ,4 и RadarSat-2 (Балдина и др., 2019). Перед началом анализа необходимо провести предварительную обработку снимков, состоящую из радиометрической коррекции, геометрической коррекции, сглаживания спекл-шума и других процедур (Бекмухамедов и др., 2016). Выявление разливов нефти на радиолокационных снимках происходит благодаря зонам «выглаживания» на водной поверхности (Сагатдинова, Нурсеитов, 2024). Нефть, попавшая на водную поверхность, выглаживает волнение, выглаженная поверхность начинает рассеивать электромагнитные волны с датчика радиолокатора, в итоге отразившиеся радиоволны не возвращаются к радиолокатору из-за чего нефтяной «слик» отображается на снимке темным пятном (Клименко и др., 2023). Для распознавания нефтяных «сликов» на поверхности воды чаще всего используют поляризацию VV, так как в данной поляризации нефтяные пленки, выглядят контрастными черными пятнами на поверхности воды серого цвета.

Так, Б.Э. Бекмухамедов с соавторами (2016) провели детектирование нефтяных загрязнений в Каспийском море. В работе была создана база данных радиолокационных данных со спутника Sentinel-1A и использовано в ПО Sentinel Toolbox, входящее в пакет SNAP (Sentinel Application Platform). В результате анализа поверхности моря на наличие «выглаживания» в поляризации VV, зафиксировано 16 нефтяных пятен со средней степенью достоверности (рис. 3 / fig. 3).

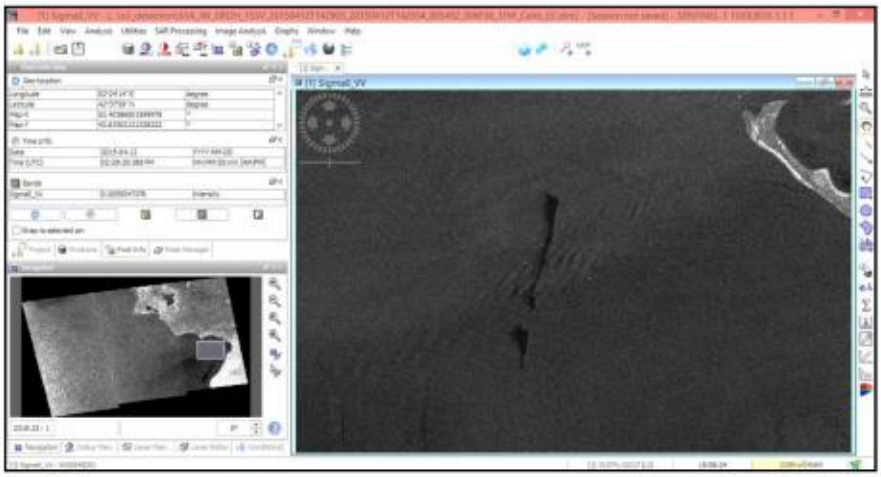


Рис. 3. Нефтяное загрязнение на радиолокационном снимке Sentinel-1A (Бекмухамедов и др., 2016)
Fig. 3. Oil pollution in a Sentinel-1A radar image (Bekmukhamedov et al., 2016)

Е.Н. Кулик и Д.А. Байкин (2022) тоже исследовали Каспийское море. В качестве данных использовались радиолокационные снимки Sentinel-1A с поляризацией VV + VH и первым уровнем обработки GRD (Ground Range Detected) в ПО SNAP. Изначально выполнена базовая радиометрическая коррекция с использованием спекл-фильтра для удаления шумов. После коррекции снимка был рассчитан индекс RVI (Radar Vegetation Index), полагая что он будет показательным, как и NDVI. Далее при помощи инструмента «Oil Spill Detection» выполнен автоматический поиск нефтяных загрязнений.

Другими исследователями (Наздрачев, Чермошенцев, 2021) предложено использование снимков Sentinel-1 и обработку в ПО SNAP для обнаружения нефтяных разливов на водной поверхности. Подходящий снимок, загружается в SNAP, выделяется область, выполняется фильтрация спекл-шума, далее применяется инструмент «Oil Spill Detection», после чего выполняется геометрическая коррекция при помощи модели эллипсоида, преобразование картографической проекции и экспорт области загрязнения.

В исследовании разлива нефти в заливе Аль-Хафджи, находящегося на границе Саудовской Аравии и Кувейта, в качестве данных были использованы радиолокационные снимки Sentinel-1A и Sentinel-1B с поляризацией VV и VH с обработкой GRD (Ground Range Detected) в ПО SNAP. Первым шагом выполнена предварительная обработка радиолокационных снимков, состоящая из геометрической обработки, удаления теплового шума, радиометрической калибровки и уменьшения спекл-шума. Далее на основе цифровой модели рельефа SRTM выполнена топографическая коррекция снимка. Поляризация VV оказалась наиболее эффективной так как нефтяная пленка сглаживает капиллярные волны на водной поверхности, что четко отображается в поляризации VV в виде темных участков (рис. 4 / fig. 4) (Chaturvedi et al., 2020).

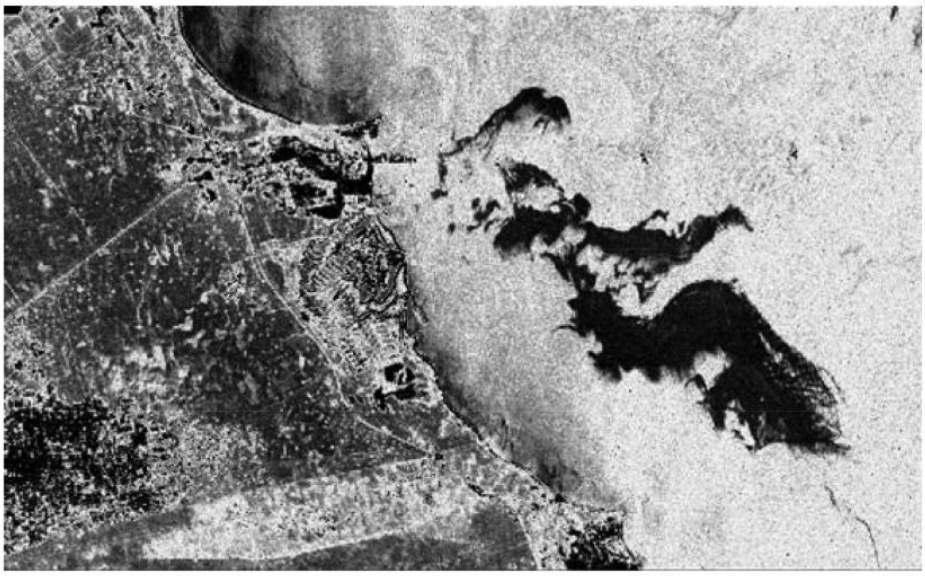


Рис. 4. Нефтяной разлив в заливе Аль-Хафджи, полученный при помощи радиолокационного снимка Sentinel-1 в поляризации VV (Chaturvedi et al., 2020)
Fig. 4. Oil spill in Al-Khafji Bay, obtained using a Sentinel-1 radar image in VV polarization (Chaturvedi et al., 2020)

Ученые из Египта исследовали распространение нефтяных загрязнений в Суэцком заливе за период 2017-2021 гг. В качестве данных также использовались радиолокационные снимки Sentinel-1 с поляризацией VV. Предварительная обработка выполнялась в программном обеспечении SNAP и включала применение точных орбитальных файлов, радиометрическую калибровку, подавление спекл-шума с использованием фильтра Ли-Сигма (окно 7×7) и конвертацию значений в децибелы. Далее на основе визуального анализа и заданных пороговых значений обратного рассеяния был выполнен поиск темных участков с дальнейшей ручной классификацией для отделения разливов нефти от схожих природных явлений (зон штиля и цветения водорослей) с использованием дополнительных данных (скорость ветра, расположение нефтедобывающей инфраструктуры). В результате было выявлено 150 загрязнений на общей площади свыше 850 км², при этом наиболее пострадавшими районами оказались участки побережья от Суэца до Рас-Гариба, а основными источниками загрязнения выступили портовые зоны и нефтедобывающие платформы (рис. 5 / fig. 5) (El-Magd et al., 2023).

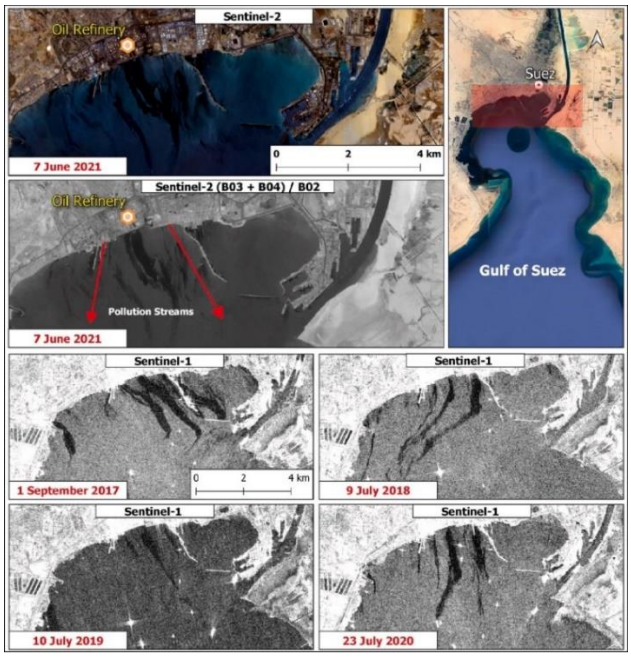


Рис. 5. Нефтяные загрязнения в Суэцком заливе, выявленные при помощи мультиспектральной и радиолокационной съемок со спутника Sentinel (El-Magd et al., 2023)
Fig. 5. Oil pollution in the Gulf of Suez detected using multispectral and radar imagery from the Sentinel satellite (El-Magd et al., 2023)

Солевые загрязнения (галогенез)

Ещё одним из наиболее характерных геохимических процессов в районах нефтедобычи, является галогенез – засоление почв, грунтов, поверхностных и подземных вод. Наиболее интенсивное воздействие на природную среду оказывают высокоминерализованные пластовые воды, состоящие из водорастворимых хлоридов и в меньшей степени – сульфатов[3] (Бузмаков и др., 2021). Причиной загрязнения природной среды высокоминерализованными водами является неисправность скважин, коррозия и прорывы водоводов высокого давления, а также дальнейший смыв с места утечки. В результате минерализованные потоки изменяют солевой состав почв, грунтов, поверхностных и грунтовых вод. При больших и постоянных утечках потоки образуют так называемые «техногенные ручьи», которые попадают в малые, а затем в крупные реки (Солнцева, 1998). Почвы, подверженные техногенному галогенезу, изменяют физическое состояние, при высыхании появляется глинистость, во влажных горизонтах становятся более вязкими, а также увеличивается их плотность. Так как загрязнение почв техногенными солями приводит к ухудшению плодородия, то происходит снижение надземной биомассы: уменьшается высота растений, длина и ширина листьев[2].

Одним из современных методов выявления галогенеза являются материалы космической съемки. Дешифрирование засоленных почв методами ДЗЗ происходи как при появлении солей на поверхности, так и по изменению отражательной способности угнетенной растительности и появлению галофитных растений. Так, Т.А. Клочко (2010) в своей работе утверждает, что засоленные почвы на космических снимках отображаются в виде пятен светло-серого и серого тона.

Солевые загрязнения, как природные, так и техногенные можно определить по спектральным характеристикам в ближнем и видимом ИК диапазонах, так как спектрально оба вида засоления проявляются в основном одинаково в виде повышения отражательной способности и скудной растительности. Для выявления засоления существует несколько подходящих спектральных индексов (Канназаров, 2026):

1. NDSI (Normalized Difference Salinity Index) – нормализованный разностный индекс засоления, рассчитываемый по формуле:

$$NDSI = \frac{RED - NIR}{RED + NIR} \quad (3)$$

2. SI (Salinity Index), имеющий несколько вариантов формул:

$$SI1 = \sqrt{(\mathrm{BLUE} \times \mathrm{RED})}; \quad (4)$$

$$SI8 = \sqrt{(\mathrm{RED} \times \mathrm{NIR})}; \quad (5)$$

$$SI12 = \frac{GREEN^2 + RED^2 + NIR^2}{2} \quad (6)$$

3. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный вегетационный индекс, используется для обнаружения угнетенной растительности из-за высокого содержания солей в почве.

З.У. Канназаров (2026) для дешифрирования засоленных почв использовал космические снимки спутников Landsat-8 (OLI/TIRS) и Sentinel-2 (MSI), а также комбинацию индексов NDSI и SI12. Для степени засоленности почв была использована таблица, представленная ниже (табл. 1 / tabl. 1).

Зарубежные авторы для выявления засоленных почв также используют космические данные со спутника Sentinel-2A и предлагают использовать индекс засоления SI и вегетационные индексы, связано это с тем, что участки поверхности, имеющие солевые загрязнения, расположены в основном на голой земле и имеют скудную растительность (Taghadosi et al., 2019).

Таблица 1

Оценка степени засоленности почв на основе индекса NDSI (Канназаров, 2026)

Table 1

Assessment of soil salinity degree based on the NDSI index (Kannazarov, 2026)

Степень засоления // Degree of salinization	*Значения NDSI // NDSI values*	*Характеристика // Characteristic*
Незасоленные // Unsalted	< 0,02	Растительность не угнетена // Vegetation is not suppressed
Слабозасоленные // Slightly saline	0,02-0,08	Незначительное угнетение // Slight suppression
Среднезасоленные // Medium saline	0,08-0,15	Пятна выцветов, угнетение растений // Spots of bleaching, plant suppression
Сильнозасоленные // Highly saline	0,15-0,25	Отсутствие растений, солевая корка // Absence of plants, salt crust
Солончаки // Solonchaks	> 0,25	Мощная солевая корка // Thick salt crust

[3] Середина В.П, Непотребный А.И., Огнев С.А. Особенности техногенного галогенеза при загрязнении нефтью почв бореального пояса // Отражение био-, гео-, антропосферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове: сборник материалов V Международной научной конференции, посвященной 85-летию кафедры почвоведения и экологии почв ТГУ, Томск, 7-11 сентября 2015 г. Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2015. С. 364-368.

Мохамед А.Э. Абдельрахмани и его соавторы (2022) в своей научной работе выяснили, что засоленные почвы и незасоленные в разной степени реагируют на синие и красные спектральные каналы, как по отдельности, так и вместе. Для того, чтобы исправить данную ошибку ими был разработан индекс SI_A, который учитывал данную разницу в спектральном отражении.

$$SI_A = \frac{\left(\left(\frac{BLUE \times RED}{GREEN}\right) \times \left(\frac{RED \times NIR}{GREEN}\right)\right)}{\left(\frac{BLUE - RED}{BLUE + RED}\right)} \quad (7)$$

В результате применения индекса SI_A авторам получилось выделить несколько видов почв: засоленные почвы, засоленные щелочные почвы, несоленые не щелочные почвы, переувлажненные почвы и городскую застройку (рис. 6 / fig. 6). Данный показатель имеет более высокие значения для засоленных почв и низкие для незасоленных почв.

Ученые из Гейдельбергского университета провели выявление галогенеза образованного в результате утечки нефтяного рассола на территориях нефтяного месторождения западного Техаса на основе данных Landsat ETM+. Для этого был получен космический снимок в комбинации спектральных каналов RED, GREEN, BLUE, а затем классифицирован методом контролируемой классификации на основе выборки из 12 участков в ПО ERDAS Imagine для составления карты растительного покрова засоленных и незасоленных территорий нефтяным рассолом (рис. 7 / fig. 7) (Unger et al., 2013).

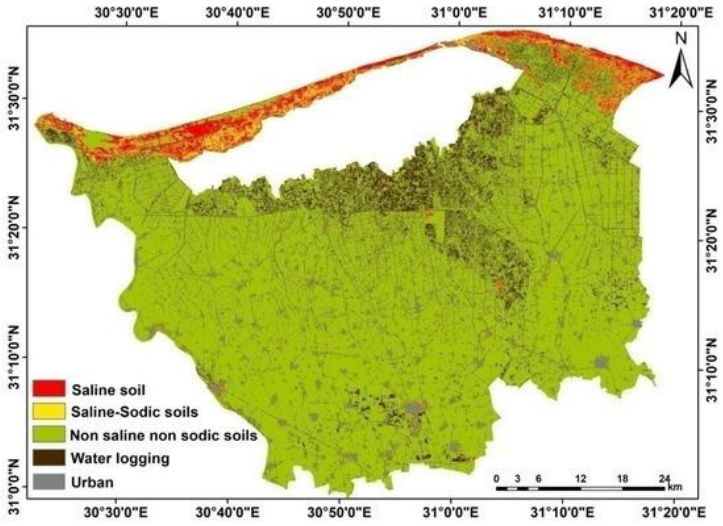


Рис. 6. Классифицированная карта типов почв по засолению, построенная на основе индекса SI_A (AbdelRahman et al., 2022)
Fig. 6. Classified map of soil types by salinity, constructed on the basis of the SI_A index (AbdelRahman et al., 2022)

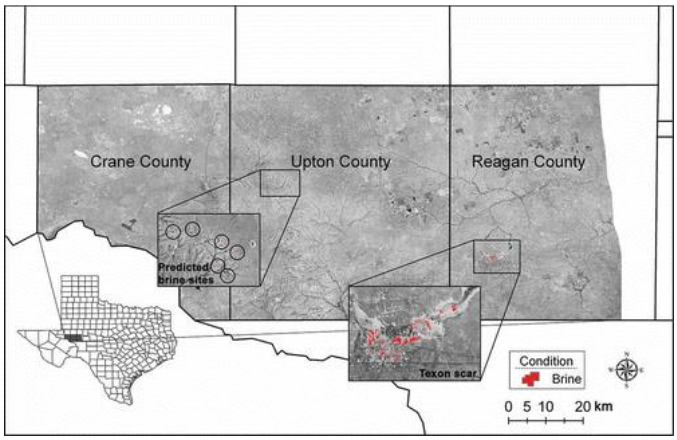
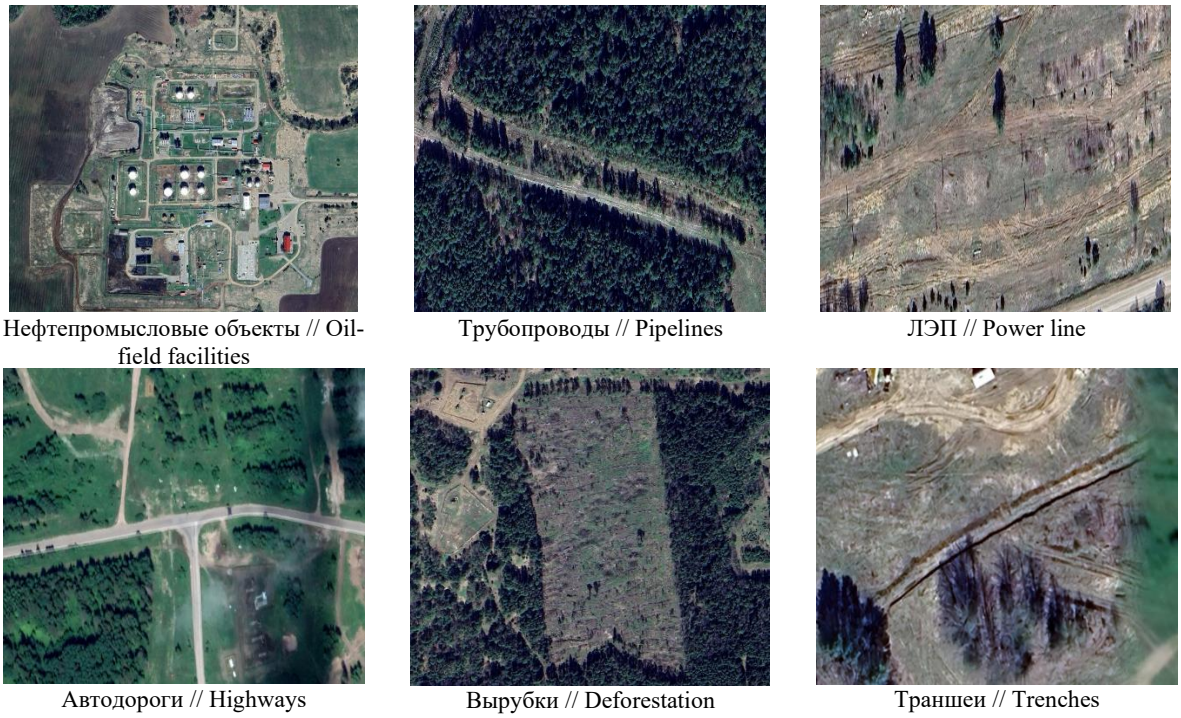


Рис. 7. Карта засоленных территорий западного Техаса (Unger et al., 2013)
Fig. 7. Map of salt-affected areas in West Texas (Unger et al., 2013)

Механогенез

Территории нефтегазовых месторождений активно развиваются, с каждым годом происходят различные изменения, что приводит природную среду к постоянным механическим воздействиям. Механические нарушения почв и грунтов называются мехоногенезом, который усиливает естественные природные процессы за счет изменения стока и сокращения ресурсов, что в свою очередь приводит к еще большей деградации почвенного покрова (Бузмаков и др., 2021). Механическая трансформация экосистем начинает проявляться уже на стадии обустройства месторождений, при прокладывании дорог, трубопроводов, обустройстве скважин и строительстве других технических объектов.

При строительстве и эксплуатации нефтегазовых месторождений появляются новые формы рельефа: положительные (валы, насыпи, отвалы) при привносе веществ и отрицательные (земляные амбары, выемки, карьеры, траншеи) при изъятии грунтов (Солнцева, 1998). Данные формы рельефа за счет изменения естественного стока воды приводят к вторичным формам рельефа (оползни, овраги, промоины). Существует несколько основных видов механогенеза на территории нефтяных месторождений: нефтепромысловые объекты, трубопроводы, линии электропередач (ЛЭП), автодороги, вырубки под новые объекты, искусственные водоемы, насыпи, траншеи (рис. 8 / fig. 8). В результате механического воздействия на почвы, происходит угнетение растительности: вырубаются деревья и кустарники, нарушается плодородный слой и происходит изменение химического состава почв (Кучин, 2025).



Нефтепромысловые объекты // Oil-field facilities | Трубопроводы // Pipelines | ЛЭП // Power line

Автодороги // Highways | Вырубки // Deforestation | Траншеи // Trenches

Рис. 8. Изображения основных объектов механогенеза на космических снимках (составлен автором)
Fig. 8. Images of the main objects of mechanogenesis in satellite images (compiled by the author)

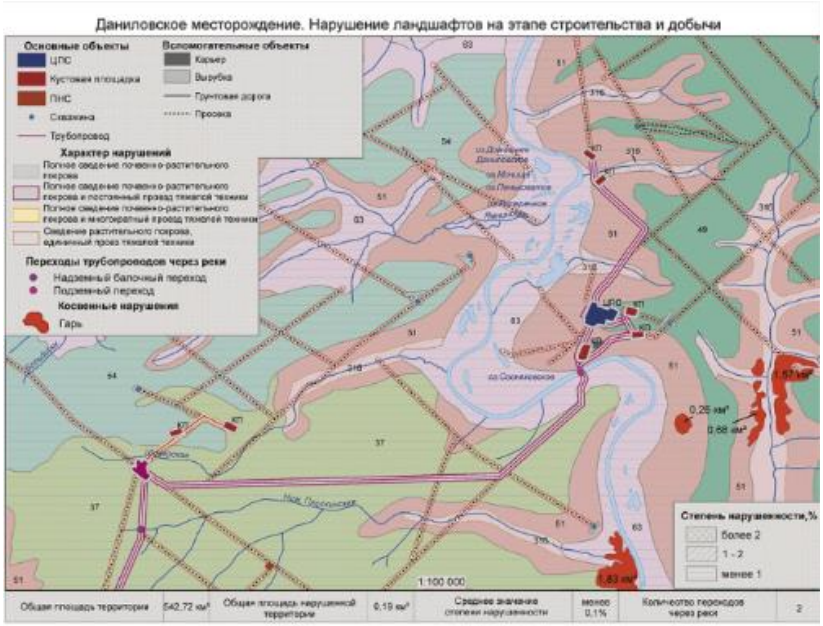


Рис. 9. Карта нарушения ландшафтов на Даниловском месторождении[4]
Fig. 9. Map of landscape disturbance at the Danilovskoye field[4]

[4] Белоусова В.Н., Каргашин П.Е. Картографирование техногенной нагрузки на территориях добычи нефти и газа в Иркутской области // Научные исследования молодых ученых-картографов, выполненные под руководством сотрудников кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. 2017. С. 5-13.

В другом исследовании П.Е. Каргашин (2018) для дешифрирования антропогенных объектов на территории месторождения использовал снимки Landsat (рис. 10 / fig. 10) и комбинацию каналов SWIR-RED-BLUE. Для выявления объектов в данном синтезе каналов он предлагает использовать таблицу дешифровочных признаков, представленную ниже (табл. 2 / tabl. 2).

Таблица 2

Дешифровочные признаки антропогенных объектов в нефтегазовой отрасли (Каргашин, 2018)

Table 2

Decoding features of anthropogenic objects in the oil and gas industry (Kargashin, 2018)

Объект // Object	*Дешифровочные признаки / Decoding features*		
	Геометрические // Geometric	*Яркостные цвета // Bright colors*	*Структурные // Structural*
Кустовая площадка // Multiple well platform	Прямоугольник, размер небольшой // Rectangle, small size	Белый // White	Однородная текстура и структура // Uniform texture and structure
УКПГ (установка комплексной подготовки газа) // Integrated gas treatment facility (IGTF)	Многоугольник, форма сложная, по размеру больше, чем кустовая площадка // A polygon with a complex shape, larger in size than the multiple well platform.	Белый и голубой // White and blue	Неоднородная структура // Heterogeneous structure
Дорога // Road	Узкая, тонкая полоса // Narrow, thin strip	Белый // White	Почти всегда однородная текстура и структура // Almost always, the texture and structure are uniform.
Трубопровод // Pipeline	Узкая, тонкая полоса // Narrow, thin strip	Белый-голубой-желтый // White-blue-yellow	Штриховая неоднородная структура (сочетание участков разного цвета) // The штриховая heterogeneous structure (a combination of areas of different colors)



Рис. 10. Нефтепромысловые объекты в комбинации каналов SWIR-RED-BLUE (Каргашин, 2018)
Fig. 10. Oilfield facilities in the SWIR-RED-BLUE band combination (Kargashin, 2018)

Другие отечественные ученые в своей работе использовали несколько индексов для того, чтобы определить степень деградации почв на нефтяном месторождении в Республике Коми. Для оценки состояния почв был использован индекс SAVI. Так как при механическом воздействии страдает и растительный

покров, то выявление механогенеза происходило и по вегетационным индексам NDVI и SWVI (Shortwave Vegetation Index) (Гордиенко, Ткач, 2022).

$$\mathrm{SWVI} = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{SWIR}}{\mathrm{NIR} + \mathrm{SWIR}}, \quad (8)$$

где NIR – ближний инфракрасный канал, а SWIR – коротковолновый инфракрасный канал.

В результате индекса SAVI авторы получили почвы с деградацией (от -0,1 до 0,1), почвы, имеющие слабую деградацию (от 0,1 до 0,15) и здоровые почвы (более 0,2). Далее на основе SAVI была выполнена переклассификация растра и построена карта эрозии почв. По значениям индекса NDVI также получилось выделить объекты механогенеза, так как в местах нарушения почв, нарушена и растительность. Значения отсутствия растительности составили от 0,133 до 0,166, а угнетенной растительности от 0,166 до 0,2.

Нефтедобывающая промышленность является одним из основных источников механического нарушения почвенного покрова. В результате механического воздействия происходит уплотнение почв тяжелой техникой на площадках и автодорогах, в следствии чего развивается эрозия. Так в дельте Нигера, проблема механогенеза была изучена при помощи мультиспектральных индексов NDVI, NDBI, NDWI по данным спутников Sentinel-2 и MODIS. Основным индексом был NDBI (Normalized Difference Built-up Index), рассчитываемый по формуле:

$$\mathrm{NDBI} = \frac{\mathrm{SWIR} - \mathrm{NIR}}{\mathrm{SWIR} + \mathrm{NIR}} \quad (9)$$

Данный индекс отображает степень запечатывания почв, то есть создание непроницаемого покрытия в результате строительства объектов нефтедобывающей деятельности. По словам авторов в результате строительства автодорог, трубопроводов и других нефтепромысловых объектов нарушается естественный гидрологический режим, что также пагубно сказывается на природной среде (Anucha et al., 2026).

О.М. Орогбеми и С.Б. Эварегбеми (2026) для выявления деградации почв при помощи механического вмешательства, применили ещё один индекс, отличный от других, BSI (Bare Soil Index), рассчитываемый по формуле:

$$BSI = \frac{(NIR - GREEN) + RED}{(NIR + GREEN) + RED} * (-1) \quad (10)$$

Данный индекс позволяет отделить обнаженные и деградированные почвы от растительных и водных поверхностей, а также выделить антропогенно изменчивые площади: дома, дороги, стройплощадки и многое другое.

Загрязнение атмосферы

Кроме битумизации, механогенеза и галогенеза существует ещё один вид распространенного воздействия на природную среду при помощи выделения газов, называется данный процесс атмосферным загрязнением воздуха (Кучин, 2025). Основным источником выделения газов являются факельные установки, сжигающие попутный нефтяной газ. Также газ поступает в атмосферу при испарении из очистных сооружений и резервуаров, стравливании из трубопроводов и продувках добывающих скважин (Бузмаков и др., 2021). В итоге в атмосферный воздух попадает множество загрязняющих веществ: угарный газ (CO), диоксид серы (SO_2), оксиды азота (NO_x), сероводород (H_2S), бенз(а)пирен ($C_{20}H_{12}$) и различные смеси углеводорода (Кучин, 2025). Загрязнение воздуха негативно сказывается на растительности, при высоких концентрациях загрязняющих веществ происходит полная деградация древостоя на больших территориях. Более чувствительными к загрязнению атмосферного воздуха являются темнохвойные породы деревьев. Сажа забивает дыхательные устьица хвоинок, что постепенно приводит к нарушению дыхательных систем и дерево погибает (Токарева, Полищук, 2009).

Загрязнение атмосферного воздуха, как и другие виды техногенной нагрузки можно определить по данным ДЗЗ. Так, вегетационный индекс NDVI и разновременные космические снимки используются для оценки изменения состояния темнохвойных лесов, так как атмосферное загрязнение сказывается на реакции деревьев (Токарева, Полищук, 2009).

При исследовании особо охраняемых природных территорий (ООПТ) Ханты-Мансийского автономного округа на наличие загрязнения атмосферного воздуха, для определения состава газохимического загрязнения, используются приборы вертикального зондирования атмосферы CRIS, ATMS, OMPS спутника NOAA-20, а с использованием оптических систем обнаруживаются загрязнения сажей. В результате исследования при помощи дистанционного зондирования выделяются факельные установки и ареалы теплового и газохимического загрязнения атмосферы (Хамедов, Давыдова, 2023)

С.И. Михайлов (2009) для определения наличия загрязнения атмосферного воздуха использовал зимний космический снимок со спутника SPOT-2, так как загрязняющие вещества оседают на снежном покрове в виде черных пятен (рис. 11 / fig. 11).

В основном все отечественные и зарубежные научные деятели используют данные спутника Sentinel-5P, но Д.Ж. Варон и соавторы (2021) в своей работе продемонстрировали другой метод, отличающийся от других, основанный на мультиспектральных снимках спутника Sentinel-2 для высокочастотного мониторинга и количественной оценки аномальных точечных источников метана.

Для обнаружения шлейфов метана авторы использовали данные коротковолнового инфракрасного диапазона (SWIR), а именно каналы 11 и 12, и разработали три метода определения метана: однополосный многопроходный (SBMP), многополосный однопроходный (MBSP) и многополосный многопроходный (MBMP) (рис. 12 / fig. 12). Подробнее о каждом методе авторы описывают в своей статье.

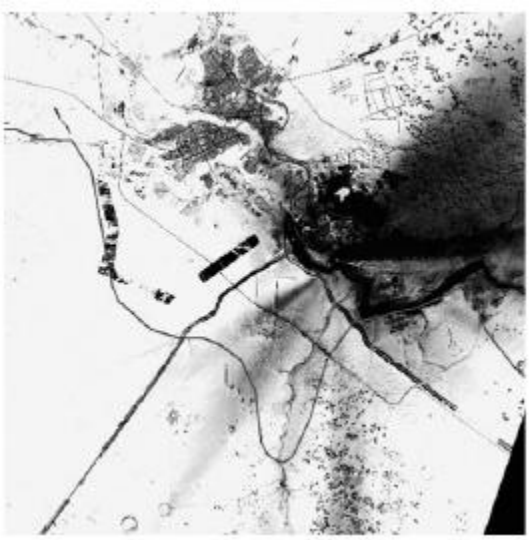


Рис. 11. Осевшие загрязняющие вещества в виде черных пятен на снежном покрове вокруг промышленного предприятия (Михайлов, 2009)
Fig. 11. Pollutants deposited as black spots on the snow cover around an industrial facility (Mikhailov, 2009)

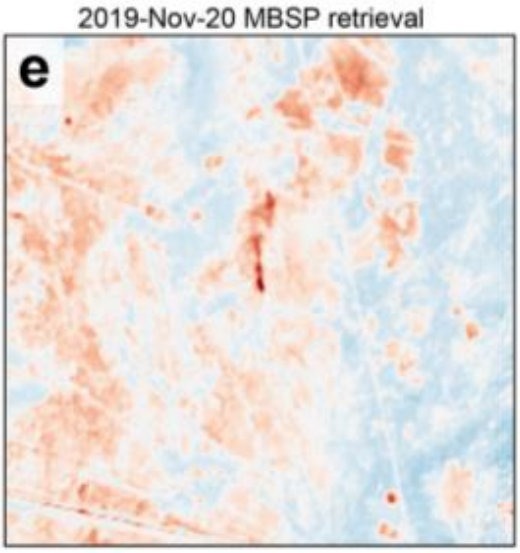


Рис. 12. Утечки метана, обнаруженные методом MBSP (Varon et al., 2021)
Fig. 12. Methane leaks detected by the MBSP method (Varon et al., 2021)

Заключение

Проведенный обзор показывает, что реакция природных экосистем на техногенное воздействие нефтегазового комплекса носит комплексный характер и затрагивает все компоненты ландшафта.

При битумизации наблюдается токсическое воздействие углеводородов на почву и растительность. Это ведет к снижению биоразнообразия, угнетению фитоценозов (уменьшению биомассы и площади листьев) и изменению спектральных характеристик почвенного покрова, что успешно выявляется методами мультиспектральной съемки.

Техногенный галогенез (засоление) вызывает стресс у растений, смену естественной растительности на галофитную и формирование солевых корок. Изменение отражательной способности поверхности и индексов засоления (NDSI, SI) позволяет дистанционно картировать очаги засоления вдоль трубопроводов.

Механогенез приводит к прямому уничтожению почвенно-растительного покрова, уплотнению грунтов тяжелой техникой и нарушению естественного гидрологического стока. Это запускает цепную реакцию вторичных деградационных процессов, таких как эрозия, образование оврагов и техногенных ручьев.

Атмосферное загрязнение (выбросы факельных установок, осаждение сажи) вызывает локальную деградацию лесов, особенно темнохвойных пород, из-за нарушения процессов фотосинтеза и дыхания. Мониторинг таких аномалий требует привлечения специализированных атмосферных сенсоров (например, TROPOMI установленный на спутник Sentinel-5P).

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) показывают себя как достаточно эффективный инструмент экологического контроля. Использование комбинаций спектральных каналов, радиолокационных данных (для дешифрирования нефтяных сликов на воде) и расчетных вегетационных индексов позволяет не

только выявлять загрязнения, но и оценивать степень деградации экосистем. Однако для уменьшения ошибок дешифрирования и точной классификации техногенных объектов методы ДЗЗ должны применяться в связке с наземными геохимическими исследованиями и интегрироваться в современные ГИС-системы для принятия управленческих решений в области природопользования и экологии.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of interest

The author declares no conflicts of interest.

Список источников

1. Антонец К.В. Комплексный мониторинг нефтегазовых загрязнений // *International agricultural journal*. 2021. № 1. С. 49-54. https://doi.org/10.24411/2588-0209-2020-10275

2. Балдина Е.А., Михайлюкова П.Г., Трошко К.А. Опыт использования данных радиолокационной космической съемки для создания тематических карт // *Вестник Московского университета*. 2019. Вып. 4. С.110-118.

3. Бекмухамедов Б.Э., Балакай Л.А., Каипов И.В. Мониторинг нефтяных загрязнений на акватории Каспийского моря методами дистанционного зондирования // *Гидрометеорология и экология*. 2016. № 2. С. 114-124.

4. Бузмаков С.А, Санников П.Ю., Сивков Д.Е., Дзюба Е.А., Хотяновская Ю.В., Егорова Д.О. Разработка геоинформационных систем для управления окружающей средой и экологической безопасностью в районах эксплуатируемых нефтяных месторождений // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2021. Т. 7. № 1. С. 102-127. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-102-127

5. Гордиенко А.С. Исследование возможности выявления негативного воздействия разливов нефти на окружающую растительность по данным дистанционного зондирования Земли // *Вестник СГУГиТ*. 2021. Т. 26. № 6. С. 48-55. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-6-48-55

6. Гордиенко А.С., Ткач А.В. Исследование состояния окружающей среды в районе нефтеразработок по космическим снимкам // *Вестник СГУГиТ*. 2022. Т. 27. № 6. С. 55-63. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-6-55-63

7. Канназаров З.У. Мониторинг засоления агроландшафтов в засушливых зонах с использованием методов дистанционного зондирования (на примере республики Каракалпакстан) // *Экономика и социум*. 2026. Т. 143. № 4. С. 705-711.

8. Каргашин П.Е. Методические аспекты дешифрирования инфраструктуры месторождений нефти и газа по снимкам высокого разрешения // *ИнтерКарто. ИнтерГИС*. 2018. Т. 24. № 2. С. 83-93. https://doi.org/10.24057/2414-9179-2018-2-24-83-93

9. Клименко С.К., Иванов А.Ю., Евтушенко Н.В. Нефтяное загрязнение оманского залива по данным радиолокационного мониторинга из космоса // *Океанические исследования*. 2023. Т. 51. № 1. С. 114-132. https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).6

10. Клочко Т.А. Исследование современного состояния проблем выявления засоленных почв по данным космических съемок // *Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Серия «География».* 2010. Т. 23. № 2. С. 156-166.

11. Кожанов К.А., Кулик Е.Н. Оценка информационной емкости данных дистанционного зондирования Sentinel-2 для мониторинга загрязнения почв нефтепродуктами в Заполярной Арктике // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2021. Т. 6. С. 149-154. https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-6-149-154

12. Копылов В.Н., Кочергин Г.А., Полищук Ю.М., Хамедов В.А. Использование данных ДЗЗ при решении региональных задач рационального природопользования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2009. Т. 6. № 1. С. 33-41.

13. Кулик Е.Н., Байкин Д.А. Разливы нефтепродуктов на водной поверхности: методы анализа данных дистанционного зондирования Земли при их выявлении // *Вестник СГУГиТ*. 2022. Т. 27. № 4. С. 61-73. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-4-61-73

14. Кучин Л.С. Применение дистанционного зондирования Земли для выявления последствий техногенной трансформации природной среды на месторождениях нефти и газа // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2025. Т. 11. № 1. С. 57-70. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2025-1-57-70

15. Михайлов С.И. Методика детектирования случаев загрязнения природной среды на суше по данным спутниковых наблюдений // *Проблемы анализа риска*. 2009. Т. 6. № 1. С. 32-37.

16. Мячина К.В., Малахов Д.В. Опыт применения данных дистанционного зондирования среднего пространственного разрешения для выделения объектов нефтепромыслов в условиях техногенно-модифицированного ландшафта (на примере Оренбургской области) // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2013. Т. 15. Вып. 3-7. С. 2341-2345.

17. Наздрачев П.И., Чермошенцев А.Ю. Применение методов активного дистанционного зондирования для обнаружения разливов нефти // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2021. Т. 6. С. 213-218. https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-6-213-218

18. Остах С.В., Бахтина Е.А., Кушеева В.С. Прогнозирующая система дистанционного мониторинга нефтезагрязненных территорий // *Информация и космос*. 2020. № 3. С. 153-163.

19. Разакова М.Г. Выявление и картирование нефтяных загрязнений почв по данным дистанционного зондирования // *Проблемы информатики*. 2017. № 4. С. 6-15.
20. Сагатдинова Г.Н., Нурсеитов Д.Б. Обработка радиолокационных данных спутника Sentinel-1 для идентификации нефтяных разливов в акватории Каспийского моря в среде GEE // *Гидрометеорология и экология*. 2024. Т. 112. № 1. С. 100-109. https://doi.org/10.54668/2789-6323-2024-112-1-100-109
21. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 376 с.
22. Токарева О.С., Полищук Ю.М. Мониторинг состояния темнохвойных лесов в зоне загрязнения атмосферы на территории нефтедобывающих месторождений // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2009. Т. 1. Вып. 1. С. 177-181.
23. Хамедов В.А., Давыдова Н.В. Оценка вероятного газохимического загрязнения перспективных лесных особо охраняемых природных территории выбросами при сжигании попутного нефтяного газа // *Вопросы лесной науки*. 2023. Т. 6. № 1. С. 73-90. https://doi.org/10.31509/2658-607x-202261-119
24. Чайкин С.А., Бузмаков А.С., Симонов В.Э. Современное представление о техногенной трансформации природной среды при эксплуатации нефтяных месторождений и роли территорий режима особого природопользования // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2025. Т. 11. № 1. С. 71-82. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2025-1-71-82
25. AbdelRahman Mohamed. A.E., Afiff Ahmed A., D'Antonio Paola, Gabr Safwat S., Scopa Antonio. Detecting and Mapping Salt-Affected Soil with Arid Integrated Indices in Feature Space Using Multi-Temporal Landsat Imagery // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Iss. 11. https://doi.org/10.3390/rs14112599
26. Anucha J.A. Kumar S., Das B., Nkwocha I.L., Okpu A., Patidar S., Martínez-Villegas N., Gupta B.S. Multi-Index satellite-based assessment of soil surface dynamics in the Niger Delta (Nigeria) // *Frontiers in Earth Science*. 2026. Vol. 14. https://doi.org/10.3389/feart.2026.1834748
27. Chaturvedi S.K., Banerjee S., Lele S. An assessment of oil spill detection using Sentinel 1 SAR-C images // *Journal of Ocean Engineering and Science*. 2020. Vol. 5. Iss. 2. P. 116-135. https://doi.org/10.1016/j.joes.2019.09.004
28. El-Magd I.A., Zakzouk M., Ali E. Mapping oil pollution in the Gulf of Suez in 2017-2021 using Synthetic Aperture Radar // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 2023. Vol. 26. № 3. P. 826-838. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.08.005
29. Orogbemi O.M., Ewaregbemi S.B. Development of Ilajeland Degradation System in Crude Oil Exploitation Areas Using Satellite Imagery and Support Vector Machine Model // *International Journal of research and innovation in applied science (IJRIAS)*. 2026. Vol. 11. Iss. 7. P. 1273-1283. https://doi.org/10.51584/IJRIAS.2026.11070088
30. Taghadosi M.M., Hasanlou M., Eftekhari K. Retrieval of soil salinity from Sentinel-2 multispectral imagery // *European Journal of Remote Sensing*. 2019. Vol. 52. № 1. P. 138-154. https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1571870
31. Unger D., Bowes C., Farrish K. Mapping oilfield brine-contaminated sites with mid-spatial resolution remotely sensed data // *GIScience and Remote Sensing*. 2013. Vol. 50. Iss. 6. P. 623-632. https://doi.org/10.1080/15481603.2013.850252
32. Varon D., Jervis D., McKeever J. High-frequency monitoring of anomalous methane point sources with multispectral Sentinel-2 satellite observations // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2021. Vol. 14. Iss. 4. P. 2771-2785. https://doi.org/10.5194/amt-14-2771-2021

References

1. Antonets K.V. Comprehensive monitoring of oil and gas pollution. *International Agricultural Journal*. 2021. Iss. 1. P. 49-54. https://doi.org/10.24411/2588-0209-2020-10275 (in Russian)
2. Baldina E.A., Mikhaylyukova P.G., Troshko K.A. Experience in using space-based radar imagery for creating thematic maps. *Bulletin of Moscow University*. 2019. (in Russian)
3. Bekmukhamedov B.E., Balakai L.A., Kaipov I.V. Monitoring oil pollution in the Caspian Sea using remote sensing methods. *Hydrometeorology and Ecology*. 2016. Iss. 2. P. 114-124. (in Russian)
4. Buzmakov S.A., Sannikov P.Yu., Sivkov D.E., Dzyuba E.A., Khotyanovskaya Yu.V., Egorova D.O. Development of geoinformation systems for environmental management and ecological safety in active oil field areas. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2021. Vol. 7. Iss. 1. P. 102-127. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-102-127 (in Russian)
5. Gordienko A.S. Investigating the possibility of detecting the negative impact of oil spills on surrounding vegetation using Earth remote sensing data. *Bulletin of SSUGT*. 2021. Vol. 26. Iss. 6. P. 48-55. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-6-48-55 (in Russian)
6. Gordienko A.S., Tkach A.V. Study of the environmental state in oil development areas using satellite imagery. *Bulletin of SSUGT*. 2022. Vol. 27. Iss. 6. P. 55-63. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-6-55-63 (in Russian)
7. Kannazarov Z.U. Monitoring of salinization in agricultural landscapes of arid zones using remote sensing methods (a case study of the Republic of Karakalpakstan). *Ekonomika and Sotsium*. 2026. Vol. 143. Iss. 4. P. 705-711. (in Russian)
8. Kargashin P.E. Methodological aspects of interpreting the infrastructure of oil and gas fields using high-resolution images. *InterCarto. InterGIS*. 2018. Vol. 24. Iss. 2. P. 83-93. https://doi.org/10.24057/2414-9179-2018-2-24-83-93 (in Russian)
9. Klimenko S.K., Ivanov A.Yu., Evtushenko N.V. Oil pollution in the Gulf of Oman based on spaceborne radar monitoring data. *Ocean Research*. 2023. Vol. 51. Iss. 1. P. 114-132. https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).6 (in Russian)
10. Klochko T.A. Study of the current state of issues regarding the detection of saline soils using satellite imagery data. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Taurida National University. Series: Geography*. 2010. Vol. 23. Iss. 2. P. 156-166. (in Russian)

11. Kozhanov K.A., Kulik E.N. Assessment of the information capacity of Sentinel-2 remote sensing data for monitoring soil pollution by petroleum products in the Polar Arctic. *Interexpo Geo-Siberia*. 2021. Vol. 6. P. 149-154. https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-6-149-154 (in Russian)
12. Kopylov V.N., Kochergin G.A., Polishchuk Yu.M., Khamedov V.A. Application of remote sensing data at the decision of regional tasks of rational usage by natural resources. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2009. Vol. 6. Iss. 1. P. 33-41. (in Russian)
13. Kulik E.N., Baykin D.A. Oil product spills on the water surface: methods for analyzing Earth remote sensing data for their detection. *Bulletin of SSUGT*. 2022. Vol. 27. Iss. 4. P. 61-73. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-4-61-73 (in Russian)
14. Kuchin L.S. Application of Earth remote sensing to identify the consequences of technogenic transformation of the natural environment at oil and gas fields. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2025. Vol. 11. Iss. 1. P. 57-70. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2025-1-57-70 (in Russian)
15. Mikhailov S. I. Methodology for detecting instances of terrestrial environmental pollution using satellite observation data. *Issues of Risk Analysis*. 2009. Vol. 6. Iss. 1. P. 32-37. (in Russian)
16. Myachina K.V., Malakhov D.V. Experience in using medium-spatial-resolution remote sensing data to identify oilfield facilities in a technogenically modified landscape (case study of the Orenburg Region). *Izvestia RAS SamSC*. 2013. Vol. 15. Iss. 3-7. P. 2341-2345. (in Russian)
17. Nazdrachev P.I., Chermoshentsev A.Yu. Application of active remote sensing methods for oil spill detection. *Interexpo GEO-Siberia*. 2021. Vol. 6. P. 213-218. https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-6-213-218 (in Russian)
18. Ostakh S.V., Bakhtina E.A., Kusheeva V.S. Predictive system for remote monitoring of oil-contaminated areas. *Information and Space*. 2020. Iss. 3. P. 153-163. (in Russian)
19. Razakova M.G. Detection and mapping of soil oil contamination using remote sensing data. *Problems of Informatics*. 2017. Iss. 4. P. 6-15. (in Russian)
20. Sagatdinova G.N., Nurseitov D.B. Processing of Sentinel-1 satellite radar data for oil spill identification in the Caspian Sea waters using the GEE environment. *Hydrometeorology and Ecology*. 2024. Vol. 112. Iss. 1. P. 100-109. https://doi.org/10.54668/2789-6323-2024-112-1-100-109 (in Russian)
21. Solntseva N.P. Oil extraction and the geochemistry of natural landscapes. Moscow: MSU Press, 1998. 376 p. (in Russian)
22. Tokareva O.S., Polishchuk Yu.M. Monitoring the condition of dark-coniferous forests in atmospheric pollution zones within oil-producing fields. *Interexpo Geo-Siberia*. 2009. P. 177-181 (in Russian)
23. Khamedov V.A., Davydova N.V. Assessment of potential gas-chemical pollution in prospective specially protected natural forest areas caused by associated petroleum gas flaring emissions. *Issues of Forest Science*. 2023. Vol. 6. Iss. 1. P. 73-90. https://doi.org/10.31509/2658-607x-202261-119 (in Russian)
24. Chaikin S.A., Buzmakov A.S., Simonov V.E. Current understanding of the technogenic transformation of the natural environment during oil field exploitation and the role of areas with special nature-use regimes. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2025. Vol. 11. Iss. 1. P. 71-82. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2025-1-71-82 (in Russian)
25. AbdelRahman Mohamed. A.E., Afiff Ahmed A., D'Antonio Paola, Gabr Safwat S., Scopa Antonio. Detecting and Mapping Salt-Affected Soil with Arid Integrated Indices in Feature Space Using Multi-Temporal Landsat Imagery. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Iss. 11. https://doi.org/10.3390/rs14112599
26. Anucha J.A. Kumar Sanjit, Bas Bhaskar. Multi-Index satellite-based assessment of soil surface dynamics in the Niger Delta (Nigeria). *Frontiers in Earth Science*. 2026. Vol. 14. https://doi.org/10.3389/feart.2026.1834748
27. Chaturvedi S.K., Banerjee S., Lele S. An assessment of oil spill detection using Sentinel 1 SAR-C images. *Journal of Ocean Engineering and Science*. 2020. Vol. 5. Iss. 2. P. 116-135. https://doi.org/10.1016/j.joes.2019.09.004
28. El-Magd I.A., Zakzouk M., Ali E. Mapping oil pollution in the Gulf of Suez in 2017–2021 using Synthetic Aperture Radar. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 2023. Vol. 26. Iss. 3. P. 826-838. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.08.005
29. Orogbemi O.M., Ewaregbemi S.B. Development of Ilajeland Degradation System in Crude Oil Exploitation Areas Using Satellite Imagery and Support Vector Machine Model. *International Journal of research and innovation in applied science (IJRIAS)*. 2026. Vol. 11. Iss. 7. P. 1273-1283. https://doi.org/10.51584/IJRIAS.2026.11070088
30. Taghadosi M.M., Hasanlou M., Eftekhari K. Retrieval of soil salinity from Sentinel-2 multispectral imagery. *European Journal of Remote Sensing*. 2019. Vol. 52. Iss. 1. P. 138-154. https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1571870
31. Unger D., Bowes C., Farrish K. Mapping oilfield brine-contaminated sites with mid-spatial resolution remotely sensed data. *GIScience and Remote Sensing*. 2013. Vol. 50. Iss. 6. P. 623-632. https://doi.org/10.1080/15481603.2013.850252
32. Varon D., Jervis D., McKeever J. High-frequency monitoring of anomalous methane point sources with multispectral Sentinel-2 satellite observations. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2021. Vol. 14. Iss. 4. P. 2771-2785. https://doi.org/10.5194/amt-14-2771-2021

Поступила в редакцию / Received: 10.09.2026
Поступила после рецензирования / Revised: 09.10.2026
Принята к публикации / Accepted: 21.10.2026

Краткое сообщение
УДК 504.3.054:355.01
https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-48-56
https://elibrary.ru/tjkgta

Проблема методического обеспечения расчета вреда атмосферному воздуху от взрывов и пожаров, вызванных военными действиями

Наталья Валерьевна Костылева✉
Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия
Филиал «Уральский» Всероссийского научно-исследовательского института охраны окружающей среды, Пермь, Россия
✉ nkostyl5874@gmail.com

Аннотация. Рассмотрен вопрос о наличии методического обеспечения расчета вреда, наносимого атмосферному воздуху как компоненту окружающей среды при взрывах и пожарах в ходе чрезвычайных ситуаций, связанных ведением военных действий. Проанализировано содержание 17 методик, включенных в перечень методик расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух стационарными источниками. Сделан вывод о необходимости срочного совершенствования нормативной и методической базы таких расчетов.

Ключевые слова: загрязняющие вещества, выбросы, методики расчета, наилучшие доступные технологии (НДТ)

Для цитирования: Костылева Н.В. Проблема методического обеспечения расчета вреда атмосферному воздуху от взрывов и пожаров, вызванных военными действиями // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2026. Т. 12. № 2. С. 48-56. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-48-56. EDN TJKGTA.

Short Communications Article

The problem of methodological support for calculating damage to atmospheric air by explosions and fires caused by military actions

Natalya V. Kostyleva✉
Perm State University, Perm, Russia
Branch «Ural» of the All-Russian Research Institute for Environmental Protection, Perm, Russia
✉ nkostyl5874@gmail.com

Abstract. The issue of the availability of methodological guidelines for calculating damage caused to atmospheric air – as an environmental component – during explosions and fires resulting from military operations was examined. The content of 17 methodologies included in the list of methodologies for calculating emissions of polluting substances into the atmospheric air from stationary sources has been analyzed. A conclusion has been drawn regarding the need to urgently improve the regulatory and methodological framework for such calculations.

Keywords: pollutants, emissions, calculation methodologies, best available techniques (BAT)

For citation: Kostyleva N.V. The problem of methodological support for calculating damage to atmospheric air by explosions and fires caused by military actions. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2026. Vol. 12. Iss. 2. P. 48-56. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-48-56. EDN TJKGTA. (in Russian)

Продолжающиеся атаки авиабомб и дронов ВСУ на населенные пункты Российской Федерации, сопровождающиеся взрывами и пожарами на производственных и гражданских объектах, вызывают закономерный вопрос о возможности оценки уже нанесенного и наносимого вреда атмосферному воздуху в ходе вышеуказанных событий.

Несмотря на мгновенность, взрыв всегда сопровождается образованием пылегазового облака, в составе которого имеются пыль и газообразные загрязняющие вещества, выделяемые в атмосферный воздух. Их количество и состав зависят от рецептуры взрывчатого вещества, вида и материала строительных конструкций взорванного объекта, наличия на объекте разнообразных химических веществ, горючих и взрывоопасных материалов.

Последствиями взрывов в абсолютном большинстве случаев являются пожары, тушение которых обычно занимает время от нескольких часов до нескольких суток, причем в ходе пожара в атмосферный воздух выбрасываются не только загрязняющие вещества, аналогичные тем, которые выбрасываются при взрыве, но также большое количество сажи и газообразных продуктов недожога, в том числе недожога искусственных материалов органического происхождения, выбросы от горения которых могут включать и

© Костылева Н.В., 2026

обычно включают такие токсичные компоненты, как полициклические ароматические углеводороды, в том числе бенз(а)пирен и диоксины. В том случае, если речь идет о взрыве и пожаре на предприятии, например, нефтяной, нефтехимической и химической промышленности, крупной котельной или ТЭЦ, то в ходе пожара будут дополнительно сгорать большое количество нефти, нефтепродуктов, других химических веществ, топлива, которые хранятся на таких объектах.

Следовательно, вред, наносимый атмосферному воздуху, несмотря на относительную краткосрочность взрыва и пожара по сравнению с, например, вредом, наносимым атмосферному воздуху валовыми годовыми выбросами предприятия при нормальной безаварийной работе, может быть заметным, но, главное, он будет сверхнормативным, то есть уже превышающим допустимый выброс.

В Российской Федерации для расчета вреда, наносимого атмосферному воздуху, должна применяться «Методика исчисления размера вреда, причиненного атмосферному воздуху как компоненту природной среды» (далее Методика), введенная в действие Приказом Минприроды России от 28.01.2021 № 59 (Об утверждении Методики…, 2021).

Как указано в пункте 2 раздела «I. Назначение и область применения» (Об утверждении Методики…, 2021), методика позволяет учесть «*…причинение вреда в результате осуществления юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями, осуществляющими деятельность на объектах, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду (объекты НВОС), I, II, III категорий, выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух стационарными источниками*» в случае превышения для объектов I и II категорий, получивших комплексное экологическое разрешение (КЭР), технологических нормативов и нормативов допустимых выбросов веществ I, II классов опасности; для прочих объектов НВОС II категории – нормативов допустимых выбросов, указанных в декларации о воздействии на окружающую среду[1, 2]; для объектов НВОС III категории – нормативов допустимых выбросов веществ I, II класса опасности, превышающих нормативы допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, приведенных в отчёте об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля[2, 3].

В пункте 4 Методики (Об утверждении Методики…, 2021) указано, что действие методики распространяется также на исчисление размера вреда, причиненного атмосферному воздуху в период неблагоприятных метеорологических условий (НМУ), когда юридические лица и индивидуальные предприниматели обязаны проводить мероприятия по уменьшению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Так как загрязнение атмосферного воздуха за счет взрывов и пожаров для объектов НВОС является сверхнормативным, то применение рассматриваемой Методики с целью расчета вреда, наносимого атмосферному воздуху, на первый взгляд, формально возможно, однако имеются особенности, которые противоречат данному утверждению.

Так, в разделе «I. Назначение и область применения» Методики (Об утверждении Методики…, 2021) не указано, что её действие распространяется на выполнение расчета вреда, наносимого атмосферному воздуху не самим предприятием (объектом НВОС), как это следует из текста пунктов 2 и 4, а наносимого извне.

Также в Методике (Об утверждении Методики…, 2021) не имеется положений об оценке вреда, наносимого не производственным, а гражданским объектам, хотя продолжительность тушения пожара на таком объекте и выбросы в атмосферный воздух при пожаре могут быть сопоставимы с продолжительностью тушения и выбросами от пожара на промышленном объекте. Главное, что в разделе «I Назначение и область применения» не указано, что Методика (Об утверждении Методики…, 2021) применима для расчёта вреда, наносимого атмосферному воздуху в ходе военных действий. То есть, взрывы и пожары при военных действиях в область применения этого документа не включены, следовательно, выполнять расчеты выбросов при таких событиях по Методике нельзя. Поэтому, с точки зрения юридической состоятельности, применение такой методики для расчета вреда атмосферному воздуху, наносимого в ходе взрывов и пожаров при военных действиях – сомнительно и, скорее всего, вообще незаконно.

Далее, в разделе «II. Исчисление размера вреда, причиненного атмосферному воздуху как компоненту природной среды, с учетом категорирования объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду» Методики (Об утверждении Методики…, 2021) представлена формула (1), согласно которой размер вреда, причиненного атмосферному воздуху как компоненту природной среды, следует рассчитывать, исходя, прежде всего, из массы выброса i-го загрязняющего вещества в атмосферный воздух (тонн), таксы для исчисления размера вреда при выбросе i-ого загрязняющего вещества в атмосферный воздух (руб. за тонну), а также безразмерного коэффициента особой охраны и коэффициента, учитывающего фактическое изменение потребительских цен на товары и услуги в Российской Федерации, определенного на основе опубликованных индексов потребительских цен на все товары и услуги по Российской Федерации (месяц в процентах к предыдущему месяцу). Индекс в формулах «i» обозначает загрязняющее вещество, по которому исчисляется размер вреда, а «n» – количество наименований загрязняющих веществ, по которым исчисляется размер вреда. Формула (2) Методики (Об утверждении Методики…, 2021) предназначена для исчисления размера вреда, причиненного атмосферному воздуху

[1] Об утверждении формы декларации о воздействии на окружающую среду и порядка ее заполнения, в том числе в форме электронного документа, подписанного усиленной квалифицированной электронной подписью: приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 509 от 11.10.2018.

[2] Об охране атмосферного воздуха: федеральный закон № 96-ФЗ от 04.05.1999.

[3] Об утверждении формы отчета об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля: приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 261 от 14.06.2018.

в периоды НМУ, рассмотрение которого к теме статьи не относится.

Формула (3) (п. 10 Методики (Об утверждении Методики…, 2021)) предназначена для расчета показателя «Mi» – *«…масса выброса i-го загрязняющего вещества, учитываемая при исчислении размера вреда, причиненного атмосферному воздуху как компоненту природной среды, в период отсутствия НМУ*». Однако относительно того, как в формуле (3) рассчитывается необходимый для расчетов вреда атмосферному воздуху при взрывах показатель «*Офі - фактическая величина i-го выброса загрязняющего вещества в атмосферный воздух, установленная в ходе государственного экологического надзора, г/сек*», пояснений и формул не приведено. Не относящийся напрямую к рассматриваемой теме показатель «*Масса выброса i-го загрязняющего вещества в атмосферный воздух, учитываемая при расчете вреда, причиненного атмосферному воздуху как компоненту природной среды, в период действия НМУ*» рассчитывается по формуле (4) (п. 11 Методики (Об утверждении Методики…, 2021)). Других формул в Методике не содержится, тем более формул и пояснений для расчета вреда, наносимого атмосферному воздуху не самим объектом НВОС за счет превышений нормативов выбросов, а наносимого за счет выбросов из-за воздействия извне, следовательно, формулы Методики, в случае их применения с целью определения вреда, наносимого атмосферному воздуху при военных действиях, нуждаются в изменении.

Таксы для исчисления размера вреда, причиненного атмосферному воздуху как компоненту природной среды для 159 веществ (руб. за тонну), указаны в приложении к методике (Об утверждении Методики…, 2021).

Из вышеприведенного описания формул видно, что важными для исчисления вреда являются перечень загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух, и масса каждого из загрязняющих веществ, входящих в данный перечень.

Обычно определить массу каждого загрязняющего вещества в выбросах можно двумя способами: путем инструментальных измерений на источнике выбросов (а) и путем расчета массы выброса по методикам расчета выбросов (б). Так как взрывы и пожары стилизуются как неорганизованные (площадные) источники выбросов, то инструментальные измерения с целью определения массы выбросов для таких источников не применимы. Следовательно, расчет массы выбросов по методикам расчета выбросов (б) для рассматриваемого случая является единственно возможным.

В Российской Федерации для расчета массы выбросов в атмосферный воздух легитимным считается использование для расчетов исключительно методик, включенных в перечень методик расчета выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух стационарными источниками (далее – Перечень) (Об утверждении Порядка…, 2018; Перечень методик расчета…), формируемый Минприроды России. Включение методики расчета выбросов в этот Перечень свидетельствует о легитимности методики.

Поиск в Перечне (Перечень методик расчета…) методик, пригодных для неоспоримого (легитимного) расчета массы выбросов при взрывах и пожарах, показал следующее.

В Перечне (Перечень методик расчета…) для расчета массы выбросов при взрывах предназначены 13 методик, в число которых входят методики, включающие отдельные разделы по взрывным работам. Наименования этих методик приведены в табл. 1 / tabl. 1. В графе 2 табл. 1 / tabl. 1 указаны перечни загрязняющих веществ, массы выбросов которых рассчитываются по данной методике.

Отдельно следует отметить, что приведенные в табл. 1 / tabl. 1 методики под номерами 1, 58, 59, 104-106, 129, 131 из Перечня (Перечень методик расчета…) отсутствуют в свободном доступе, следовательно, возможность их анализа и применения связана с наличием разрешений их правообладателей, получение которых, как показывает практика, сомнительно. Приведенные в табл. 1 / tabl. 1 перечни загрязняющих веществ из этих методик заимствованы из Перечня (Перечень методик расчета…).

Таблица 1

Перечень методик расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух стационарными источниками при взрывах

Table 1

List of methods for calculating emissions of pollutants into the atmospheric air from stationary sources during explosions

№ согласно (Перечень методик расчета…). Наименование методики // No. according to (List of calculation methodology…) Name of the methodology	*Перечень загрязняющих веществ, показатели выбросов которых рассчитываются по данной Методике расчета // The list of pollutants whose emissions are calculated using this Calculation method*
1*. Методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу загрязняющих веществ при проведении взрывных работ в разрезах (карьерах) (Об утверждении Методики…, 2021)	Оксиды азота; оксид углерода; взвешенные вещества
16. Отраслевая методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу вредных веществ предприятиями по добыче угля (утверждена Минэнерго России 11.11.2003) (Отраслевая методика расчета…, 2003)	Бенз(а)пирен; оксид азота; диоксид серы; оксид углерода; взвешенные вещества

№ согласно (Перечень методик расчета…). Наименование методики // No. according to (List of calculation methodology…) Name of the methodology	*Перечень загрязняющих веществ, показатели выбросов которых рассчитываются по данной Методике расчета // The list of pollutants whose emissions are calculated using this Calculation method*
38. Методическое пособие по расчету выбросов от неорганизованных источников в промышленности строительных материалов. Новороссийск, 2001 (Методическое пособие по…, 1989)	Твердые частицы; взвешенные вещества; оксид углерода; оксиды азота (диоксид азота и оксид азота); пыль неорганическая с содержанием кремния менее 20%, а также 20-70% и более 70%; пыль каменного угля; пыль (в зависимости от материала пересыпки по справке природопользователя)
55. Методические указания по расчету неорганизованных выбросов пыли и вредных газов в атмосферу при взрывных работах на карьерах горнохимических предприятий. Люберцы, 1987 (Методические указания по…, 1987)	Окись углерода; пыль; окислы азота
56. Методика расчета вредных выбросов (сбросов) для комплекса оборудования открытых горных работ (на основе удельных показателей). Люберцы, 1999 (Методика расчёта вредных…, 1999)	Твердые частицы; пыль; оксид углерода; оксиды азота (диоксид азота, оксид азота); углеводороды; пыль неорганическая, содержащая двуокись кремния, в %: - более 70 (динас и другие); пыль неорганическая, содержащая двуокись кремния, в %: - 70-20 (шамот, цемент, пыль цементного производства – глина, глинистый сланец, доменный шлак, песок, клинкер, зола, кремнезем и другие); древесная пыль; пыль неорганическая; содержащая двуокись кремния, в %: - менее 20 (доломит, пыль цементного производства – известняк, мел, огарки, сырьевая смесь, пыль вращающихся печей, боксит и другие); пыль асбестосодержащая (с содержанием хризотиласбеста до 10%) (по асбесту); пыль асбестосодержащая с содержанием асбеста от 20%); угольная пыль; пыль (неорганическая) гипсового вяжущего из фосфогипса с цементом и иные пыли горных пород; сажа; сероводород; серы диоксид; иные пыли горных пород и иные вещества, которые идентифицируются по составу сырья и материалов
58*. Методика расчета выделений (выбросов) загрязняющих веществ при взрывании порэмита на карьерах комбината «Урал-асбест». Асбест, 1997 (Об утверждении Методики…, 2021)	Взвешенные вещества; оксид углерода; оксиды азота
59*. Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от неорганизованных источников для предприятий НПО «Якуталмаз». Мирный, 1993 (Об утверждении Методики…, 2021)	Окись углерода; оксиды азота; твердые частицы
104*. Методика расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при взрывных работах на карьерах ОАО «Михайловский ГОК». СПб., 2004 (с Дополнением № 1 к «Методике расчета выбросов загрязняющих веществ при взрывных работах на карьерах ОАО «Михайловский ГОК». г. Железногорск, 2016) (Об утверждении Методики…, 2021)	Пыль; оксид углерода; оксиды азота
105*. Методика расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при взрывных работах на карьерах ОАО «Лебединский ГОК». Санкт-Петербург, 2008 (Об утверждении Методики…, 2021)	Пыль; оксид углерода; оксиды азота (в пересчете на диоксид азота); серы диоксид
106*. Методика расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух при взрывных работах на карьерах ОАО «Стойленский ГОК». Старый Оскол, 2010 (Об утверждении Методики…, 2021)	Азота диоксид; азота оксид; серы диоксид; углерода оксид; пыль неорганическая: 20-70% SiO_2
110. Методические указания по определению количественного состава вредных продуктов, образующихся при взрыве и горении. Дзержинск, 2005 (Методические указания по…, 2005)	Диоксид азота; оксид углерода; сажа; диоксид серы взвешенные вещества
129*. Методика расчета выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух при проведении взрывных работ в карьерах Михайловского ГОКа им. А.В. Варичева. Железногорск, 2024 г. (Об утверждении Методики…, 2021)	Пыль неорганическая: 70-20% двуокиси кремния; оксиды азота (NOx); окись углерода (CO).
131*. Методика расчета удельных выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух для взрывчатых веществ, используемых при проведении взрывных работ в карьере АО «Лебединский ГОК». Пермь, 2024 (Об утверждении Методики…, 2021)	Пыль неорганическая, содержащая 70-20% SiO2; азота диоксид; азота оксид (II); сера диоксид; углерода оксид.

*Примечание: * – методики, отсутствующие в свободном доступе 1, 58, 59, 104, 105, 106, 129, 131.*

Как видно из графы 2 табл. 1 / tabl. 1, перечни загрязняющих веществ при взрывах в приведенных методиках, аналогичны не полностью.

В составе газовых выбросов во всех 13 методиках присутствует углерода оксид. Оксиды азота (суммарно) указаны в шести из 13 методик (№ 1, № 55, №

58, № 57, № 104, № 129), в методиках № 105, № 106, № 110 в качестве загрязняющего вещества в выбросах указан диоксид азота (или пересчет на диоксид азота (методика № 105), в методиках № 38, № 56 и № 131 оксид и диоксид азота указаны раздельно, в методике № 2 в составе выбросов указан только оксид азота. Серы диоксид в качестве загрязняющего вещества указан в шести методиках: № 16, № 56, № 105, № 106, № 110, № 131.

Большое разнообразие можно увидеть в наименованиях твердых частиц (дисперсная фаза аэрозоля) вышеприведенных методик. Так, в методиках № 38, № 56, № 59 твердые частицы приведены с наименованием «твердые частицы». В методиках № 1, №16, №38, № 58, № 110 твердые частицы указаны как «взвешенные вещества». В методиках № 38, № 56, № 106, № 129, № 131 твердые частицы классифицированы как «пыль неорганическая с содержанием SiO_2» с разным процентным содержанием. «Сажа» в качестве вида твердых частиц приведена в методиках № 56 и № 110. В методике № 38 указана «пыль (в зависимости от материала пересыпки по справке природопользователя)». В методике № 56 в дополнение к «твердым частицам» и «пыли» указаны «древесная пыль», а также «*…Угольная пыль, Пыль (неорганическая) гипсового вяжущего из фосфогипса с цементом и иные пыли горных пород, … Иные пыли горных пород и иные вещества, которые идентифицируются по составу сырья и материалов*».

Такое разнообразие наименований загрязняющих веществ в виде твердых частиц (пыли) в составе выбросов при взрывах, безусловно, можно объяснить наличием разнообразия химического и морфологического состава взрываемой горной массы.

Однако, с точки зрения моделирования загрязнения атмосферного воздуха, и, в дальнейшем, нормирования выбросов в атмосферный воздух, имеющееся в методиках разнообразие подходов к идентификации загрязняющих веществ в выбросах является методически неверным: требуется применение единого подхода к составлению перечня загрязняющих веществ и расчету выбросов этих веществ, причем подходящий подход можно выбрать из приведенных далее вариантов.

В качестве первого подхода при разработке методик расчета выбросов, и, в дальнейшем, при проведении инвентаризации выбросов в атмосферный воздух, можно рассматривать конкретизацию перечня загрязняющих веществ в составе выделяемых в атмосферной воздух твердых частиц (пыли) вплоть до каждого отдельного загрязняющего вещества в каждой из методик расчета выбросов, разработанной для каждого отдельного объекта. Этот подход, хоть и соответствует требованию п. 3 (Об утверждении Порядка…, 2021) учитывать все загрязняющие вещества в составе выбросов, однако, для его реализации, из-за разнообразия составов взрываемых материалов, необходимо либо разрабатывать отдельные методики расчета выбросов для каждого из множества отдельных объектов, на которых проводятся взрывные работы (тенденцию чего, кстати, мы сейчас наблюдаем), либо необходимо разрабатывать не отдельные методики расчета выбросов, а отдельные показатели выбросов для каждого вида и состава взрываемого материала в, например, каких-нибудь единых отраслевых методиках, как это делалось ранее.

Вторым подходом является объединение отдельных видов твердых частиц (пылей) с типизацией в какой-то объединенный вид (виды) с целью присвоения общего кода (кодов) для дальнейшего использования. Сложность второго подхода заключается в том, что при выборе второго подхода Минприроды России следует разработать и утвердить правила объединения твердых частиц (пылей) в зависимости от компонентного и морфологического состава, а также критерии их объединения. При этом необходимо будет учитывать и вопросы платы за негативное воздействие на атмосферный воздух.

Третий подход можно считать универсальным: это «разбиение» общей расчетной массы твердых частиц (пыли) на отдельные компоненты, исходя из компонентного состава взрываемого материала – процентного содержания во взрываемых материалах отдельных веществ и их соединений. Этот подход можно применять не только к взрывам, но и к любым технологиям, которые сопровождаются образованием твердых частиц (пылей). Для реализации этого подхода Минприроды России необходимо разработать и утвердить методику такого «разбиения», о чем уже давно идет речь в профессиональной среде.

Однако, так как в ходе военных действий взрывами разрушаются, прежде всего, строительные конструкции, то в данном случае будет целесообразно на основе экспертного метода разработать и обосновать средний компонентный состав и средние удельные показатели выбросов отдельных загрязняющих веществ в виде твердых частиц, образующихся при разрушении строительных конструкций, и предложить в будущей методике расчета выбросов при взрывах, связанных с ведением военных действий, совместное использование третьего подхода и разработанных средних удельных показателей выбросов.

В настоящее же время, исходя из факта наличия в Перечне (Перечень методик расчета…) методик расчета выбросов в атмосферный воздух, в том числе, методик расчета выбросов при взрывах, с разными подходами к идентификации твердых частиц, Минприроды России, видимо, следует выпустить подзаконный акт, в котором необходимо изложить официальный подход к идентификации твердых частиц в составе выбросов в атмосферный воздух, так как данная проблема ни в (Методические указания по…, 2005), ни в других нормативных и методических документах конкретного отражения не нашла.

Отдельно необходимо отметить, что в методике под табличным номером № 16 в перечень загрязняющих веществ включен бенз(а)пирен, а в широко применяемой методике под табличным № 56 присутствует сероводород.

То есть, из табл. 1 / tabl. 1 следует вывод о том, что все указанные в ней 13 методик предназначены для расчета выбросов при горно-взрывных работах на карьерах, разрезах и аналогичных объектах. При этом в вышеуказанных действующих методиках расчета выбросов имеет место определенное несоответствие в перечнях загрязняющих веществ, обоснование чему отсутствует.

Но, главное, никоим образом не доказана применимость указанных в таблице 1 методик расчета выбросов для определения выбросов от взрывов в ходе военных действий, которая гарантировала бы правильность и достоверность результатов расчетов выбросов по этим методикам. Поэтому, несмотря на то, что формально вышеуказанные методики относятся к методическому обеспечению расчетов выбросов при взрывах, из-за того, что методики предназначены для горно-взрывных работ и имеют свои особенности, в том числе в части перечней загрязняющих веществ, использование их при расчете выбросов от взрывов в ходе военных действий нельзя признать правильным и легитимным.

Анализ информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям (ИТС) на предмет изучения перечней загрязняющих веществ при взрывах показал следующее. В ИТС 16-2023 (Информационно-технический справочник…, 2023), который является межотраслевым справочником, в единственном разделе 3.3.1 «Воздействие добычи полезных ископаемых на окружающую среду» имеется текст: «*На этапе эксплуатации горнодобывающего предприятия возможны выбросы следующих веществ: … пыль, оксиды азота, оксид углерода – при ведении буровзрывных работ*». Перечня маркерных веществ и удельных показателей выбросов при взрывах, как это и должно быть в межотраслевом ИТС, здесь не приведено. В отраслевом ИТС 23-2025 (Информационно-технический справочник…, 2025) в Таблице А-1 «Перечень маркерных веществ, для которых устанавливаются технологические показатели для разработки месторождений при добыче руд цветных металлов открытым, подземным и комбинированным способом» приведено следующее маркерное вещество: пыль неорганическая с содержанием кремния менее 20%, 20-70%, а также более 70%. Для разработки месторождений при добыче известняка и ангидрита открытым, подземным и комбинированным способом приведена пыль неорганическая с содержанием кремния менее 20%, 20-70%, а также более 70%. В ИТС 25-2023 (Информационно-технический справочник…, 2023 (2)) в Таблице А-2 в качестве маркерных веществ для производственных процессов «*Добыча железных руд открытым способом (буровые работы, взрывные работы, пыление отвалов пустых пород и некондиционных руд извлечение руды из массива горных пород, погрузочно-разгрузочные работы, транспортирование горной массы, отвалообразование и складирование, первичное дробление, отгрузка продукции, установки газо- и водоочистки)*» приведены следующие вещества: «*Взвешенные вещества (все твердые вещества в составе выброса, включая «Пыль неорганическая с содержанием кремния менее 20, 20-70, а также более 70%*»). К данной таблице имеется следующее примечание: «* - *К взвешенным веществам относятся все твердые вещества в составе выброса, включая «Пыль неорганическая с содержанием кремния менее 20, 20-70, а также более 70%*». В ИТС 37-2023 (Информационно-технический справочник…2023 (3)) в Таблице А-35 «*Перечень маркерных веществ*» для производственных процессов в ходе добычи каменного угля, в том числе при буро-взрывных работах, приведены: «*Пыль неорганическая с содержанием кремния менее 20, 20-70, а также более 70%, Пыль каменного угля*». Здесь же в Таблице Б-1 по этим же маркерным веществам приведены технологические показатели выбросов загрязняющих веществ, причем буро-взрывные работы включены в состав нескольких производственных процессов при добыче угля подземным и открытым способом. В ИТС 49-2024 (Информационно-технический справочник…, 2024) в Таблице А-1 «*Перечень маркерных веществ, для которых устанавливаются технологические показатели*» выбросы от буровзрывных работ включены в состав выбросов от ряда технологических процессов при разработке коренных (рудных) и рассыпных месторождений драгоценных металлов только как «*Пыль неорганическая с содержанием кремния менее 20, 20-70, а также более 70%,*».

Очевидно, что в действующих ИТС, которые содержат перечни маркерных веществ и технологические показатели по ним (для технологий, включающих взрывные работы), также имеет место проблема идентификации твердых частиц (пылей). А вот газы, которые содержатся в облаке при взрыве, в перечнях маркерных веществ в рассмотренных ИТС вообще не указаны.

Методики для расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух при горении (сжигании), которые предназначены для расчета массы выбросов от горения нефти и нефтепродуктов при пожарах, а также при горении в ходе лесных пожаров, приведенные в Перечне (Перечень методик расчета…), указаны в табл. 2 / tabl. 2.

Следует отметить, что Методика определения и расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров (утверждена приказом Госкомэкологии России от 05.03.1997 № 90), приведенная в Перечне (Перечень методик расчета…) под номером № 13, фактически является Приложением 2 к Методике расчета выбросов от источников горения при разливе нефти и нефтепродуктов под номером № 7 в Перечне (Перечень методик расчета…).

Как видно из графы 2 табл. 2 / tabl. 2, в перечнях загрязняющих веществ при горении нефти и нефтепродуктов имеются некоторые особенности. Так, в Приложении 1 методики № 7 (Об утверждении методик…, 1997) из Перечня (Перечень методик расчета…) указано наименование «Дым (ультра-дисперсные частицы)», которое в воздухоохранной деятельности не используется. В Приложении 2 к Методике № 7 (Об утверждении методик…, 1997) Перечня (Перечень методик расчета…) и в методике № 13 (Об утверждении методик…, 1997 (2)) того же Перечня также указаны не применяемые в настоящее время наименования загрязняющих веществ «*…(Сажа (элементарный углерод) при горении, Дым (режим горения), Дым (режим тления), Сажа при тлении)…*». Непонятно, какие вещества следует понимать под здесь же указанным наименованием «Другие углеводороды».

Таблица 2

Перечень методик расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух при горении нефти и нефтепродуктов при пожарах, а также при лесных пожарах

Table 2

The list of methods for calculating emissions of pollutants into the atmospheric air during gorenje of oil and petroleum products in fires, as well as in forest fires

№ согласно (Перечень методик расчета…). Наименование методики // No. according to (List of calculation methodology…) Name of the methodology	*Перечень загрязняющих веществ, показатели выбросов которых рассчитываются по данной Методике расчета // The list of pollutants whose emissions are calculated using this Calculation method*
7. Методика расчета выбросов от источников горения при разливе нефти и нефтепродуктов (утверждена приказом Госкомэкологии России от 05.03.1997 № 90). Приложение 1. Методика расчета выбросов от источников горения при разливе нефти и нефтепродуктов; Приложение 2 Методика определения и расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров (Об утверждении методик…, 1997)	Приложение 1: Оксид углерода (CO); диоксид углерода (CO_2); оксиды азота NO(x); оксиды серы (в пересчете на SO_2; Сероводород (H_2S); сажа (C); синильная кислота (HCN); дым (ультра-дисперсные частицы SiO_2); формальдегид (HCHO); органические кислоты (в пересчете на CH_3COOH) Приложение 2: Оксид углерода (окись углерода) (CO); углекислый газ (CO_2); оксид азота (NO); сажа (элементарный углерод) при горении; дым (режим горения); дым (режим тления); сажа при тлении; метан; другие углеводороды; озон
9. Методика расчета выбросов вредных веществ в атмосферу при свободном горении нефти и нефтепродуктов (утверждена Самарским областным комитетом охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации 03.07.1996 с согласования Минприроды России) (Методика расчета выбросов…, 1996)	Диоксид углерода; оксид углерода; сажа; оксиды азота (в пересчете на NO_2); сероводород; оксиды серы (в пересчете на SO2); синильная кислота; формальдегид; органические кислоты (в пересчете на CH_3COOH)
13. Методика определения и расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров (утверждена приказом Госкомэкологии России от 05.03.1997 № 90) (Об утверждении методик…, 1997 (2))	Оксид углерода (окись углерода) (CO); углекислый газ ($_{CO2}$); оксид азота (NO); сажа (элементарный углерод) при горении; дым (режим горения); дым (режим тления); сажа при тлении; метан; другие углеводороды; озон

Как видно даже из названий вышеуказанных методик № 7, № 9, № 13 из Перечня (Перечень методик расчета…), область применения ни одной из этих методик не включает расчеты выбросов при пожарах, вызванных военными действиями. Кроме того, судя по году создания этих методик (1996-1997 гг.), можно с высокой долей вероятности предполагать, что эти методики сильно устарели, так как требования к содержанию и качеству методик расчета выбросов и, главное, к обосновывающим их материалам, в настоящее время достаточно кардинально ужесточились[4].

В ходе анализа информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям ИТС 28-2021 Добыча нефти (Информационно-технический справочник…, 2021) выявлено, что нигде в справочнике, даже в подразделе «Аварийные и залповые выбросы загрязняющих веществ нефтедобывающих предприятий» раздела 1.5. «Основные экологические проблемы нефтедобывающей отрасли», упоминания о пожарах, связанных с горением нефти, не имеется, также как и в справочнике ИТС 30-2021 Переработка нефти (Информационно-технический справочник…, 2021 (2)).

Каких-либо методик расчета выбросов в атмосферный воздух, пригодных для расчета массы выбросов в атмосферный воздух в ходе взрывов и пожаров при ведении именно военных действий, обнаружить в Перечне (Перечень методик расчета…) не удалось.

Из приведенных доводов следует, что легитимно и достоверно рассчитать или даже оценить вред, уже нанесенный и наносимый атмосферному воздуху как компоненту окружающей среды при взрывах и пожарах в ходе чрезвычайных ситуаций, связанных с ведением военных действий, не представляется возможным из-за отсутствия актуальной методической и нормативной базы.

Единственным выходом из положения может стать незамедлительное усовершенствование нормативной и методической базы, регламентирующей расчеты и/или оценку вреда, наносимого атмосферному воздуху в ходе вышеуказанных событий.

Конфликт интересов
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of interest
The author declares no conflicts of interest.

[4] Об утверждении Правил разработки и утверждения методик расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух стационарными источниками: постановление Правительства РФ № 692 от 21.05.2025.

Список источников

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 16-2023. Горнодобывающая промышленность. Общие процессы и методы. Москва: бюро наилучших доступных технологий, 2023.
2. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 23-2025. Добыча и обогащение руд цветных металлов. Москва: Бюро наилучших доступных технологий, 2025.
3. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 25-2023. Добыча и обогащение железных руд. Москва: бюро наилучших доступных технологий, 2023.
4. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 37-2023. Добыча и обогащение угля. Москва: Бюро наилучших доступных технологий, 2023.
5. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 49-2024. Добыча драгоценных металлов. Москва: бюро наилучших доступных технологий, 2024.
6. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 28-2021. Добыча нефти. Москва: Бюро наилучших доступных технологий, 2021.
7. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 30-2021. Переработка нефти. Москва: Бюро наилучших доступных технологий, 2021.
8. Методика расчета вредных выбросов (сбросов) для комплекса оборудования открытых горных работ (на основе удельных показателей). Люберцы, 1999. [Электронный ресурс]. URL: https://files.stroyinf.ru/Data1/59/59758/?ysclid=muqlcblk6l480167572 (дата обращения 29.09.2026).
9. Методика расчета выбросов вредных веществ в атмосферу при свободном горении нефти и нефтепродуктов (утверждена Самарским областным комитетом охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации 03.07.1996 с согласования Минприроды России). Информационный портал «Охрана труда». [Электронный ресурс]. URL: https://ohranatruda.ru/upload/iblock/50e/4293782525.pdf?ysclid=muqkh1yrnq703201519 (дата обращения 29.09.2026).
10. Методические указания по определению количественного состава вредных продуктов, образующихся при взрыве и горении. Дзержинск, 2005. [Электронный ресурс]. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293730/4293730655.pdf (дата обращения 29.09.2026).
11. Методические указания по расчету неорганизованных выбросов пыли и вредных газов в атмосферу при взрывных работах на карьерах горнохимических предприятий. Люберцы: Министерство по производству минеральных удобрений СССР, Союзгорхимпром, Государственный научно-исследовательский институт горнохимического сырья (ГИГХС), 1987.
12. Методическое пособие по расчету выбросов от неорганизованных источников в промышленности строительных материалов. Новороссийск: Минстройматериалов СССР, НПО "Союзстромэкология", 1989.
13. Об утверждении методик расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Приложение 1. Методика расчета выбросов от источников горения при разливе нефти и нефтепродуктов: приказ Госкомэкологии России № 90 от 05.03.1997.
14. Об утверждении методик расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Приложение 2. Методика определения и расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров: приказ Госкомэкологии России № 90 от 05.03.1997.
15. Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного атмосферному воздуху как компоненту природной среды: приказ Минприроды России № 59 от 28.01.2021.
16. Об утверждении Порядка проведения инвентаризации стационарных источников и выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, корректировки ее данных, документирования и хранения данных, полученных в результате проведения таких инвентаризации и корректировки: приказ Минприроды России № 871 от 19.11.2021.
17. Об утверждении Порядка формирования и ведения перечня методик расчета выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух стационарными источниками: приказ Минприроды России № 341 от 31.07.2018.
18. Отраслевая методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу вредных веществ предприятиями по добыче угля. Пермь: Минэнерго РФ, Департамент угольной промышленности, ФГУП МНИИЭКО ТЭК, 2003.
19. Перечень методик расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух стационарными источниками. Минприроды России [Электронный ресурс]. URL: https://www.mnr.gov.ru/about/ (дата обращения: 29.09.2026).

References

1. Information and Technical Reference Book on Best Available Techniques ITS 16-2023. Mining Industry. General Processes and Methods. Moscow: Bureau of Best Available Techniques, 2023. (in Russian)
2. Information and Technical Reference Book on Best Available Techniques ITS 23-2025. Extraction and Beneficiation of Non-Ferrous Metal Ores. Moscow: Bureau of Best Available Techniques, 2025. (in Russian)
3. Information and Technical Reference Book on Best Available Techniques ITS 25-2023. Iron Ore Mining and Beneficiation. Moscow: Bureau of Best Available Techniques, 2023. (in Russian)
4. Information and Technical Reference Book on Best Available Techniques ITS 37-2023. Coal Mining and

Beneficiation. Moscow: Bureau of Best Available Techniques, 2023. (in Russian)
5. Information and Technical Reference Book on Best Available Techniques ITS 49-2024. Precious Metal Mining. Moscow: Bureau of Best Available Techniques, 2024. (in Russian)
6. Information and Technical Reference Book on Best Available Techniques ITS 28-2021. Oil Extraction. Moscow: Bureau of Best Available Techniques, 2021. (in Russian)
7. Information and Technical Reference Book on Best Available Techniques ITS 30-2021. Oil Refining. Moscow: Bureau of Best Available Techniques, 2021. (in Russian)
8. Methodology for Calculating Harmful Emissions (Discharges) for Open-Pit Mining Equipment Complexes (Based on Specific Emission Factors). Lyubertsy, 1999. URL: https://files.stroy-inf.ru/Data1/59/59758/?ysclid=mqclbkl6l480167572 (accessed: 29.09.2026). (in Russian)
9. Methodology for Calculating Emissions of Harmful Substances into the Atmosphere During the Free Burning of Oil and Petroleum Products. Samara: Samara Regional Committee for Environmental Protection and Natural Resources, 1996. URL: https://ohranatruda.ru/upload/iblock/50e/4293782525.pdf?ysclid=mqkh1yrnq703201519 (accessed: 29.09.2026). (in Russian)
10. Methodological Guidelines for Determining the Quantitative Composition of Harmful Products Formed During Explosion and Combustion. Dzerzhinsk, 2005. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293730/4293730655.pdf (accessed: 29.09.2026). (in Russian)
11. Methodological Guidelines for Calculating Fugitive Emissions of Dust and Harmful Gases into the Atmosphere During Blasting Operations at Open-Pit Mines of Mining-Chemical Enterprises. Lyubertsy: Ministry of Mineral Fertilizer Production of the USSR, Soyuzgorkhimprom, State Research Institute of Mining-Chemical Raw Materials (GIGKhS), 1987. (in Russian)
12. Methodological Guide on Calculating Emissions from Fugitive Sources in the Building Materials Industry. Novorossiysk: Ministry of the Building Materials Industry of the USSR, NPO "Soyuzstromekologiya", 1989. (in Russian)
13. On the Approval of Methodologies for Calculating Pollutant Emissions into the Atmosphere. Appendix 1: Methodology for Calculating Emissions from Combustion Sources during Spills of Oil and Petroleum Products. Order of the State Committee for Environmental Protection of Russia № 90 from 05.03.1997. (in Russian)
14. On the Approval of Methodologies for Calculating Pollutant Emissions into the Atmosphere. Appendix 2: Methodology for Determining and Calculating Pollutant Emissions from Forest Fires. Order of the State Committee for Environmental Protection of Russia № 90 from 05.03.1997. (in Russian)
15. On Approval of the Methodology for Calculating the Amount of Damage Caused to Atmospheric Air as a Component of the Natural Environment. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia № 59 from 28.01.2021. (in Russian)
16. On Approval of the Procedure for Conducting an Inventory of Stationary Sources and Emissions of Pollutants into the Atmospheric Air, Adjusting Inventory Data, and Documenting and Storing Data Obtained from Such Inventory and Adjustment. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia № 871 from 19.11.2021. (in Russian)
17. On Approval of the Procedure for Compiling and Maintaining the List of Methodologies for Calculating Emissions of Harmful (Polluting) Substances into the Atmospheric Air from Stationary Sources. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia № 341 from 31.07.2018. (in Russian)
18. Industry-Specific Methodology for Calculating the Quantity of Harmful Substances Generated, Captured, and Emitted into the Atmosphere by Coal Mining Enterprises. Perm: Ministry of Energy of Russia, Coal Industry Department, FSUE MNIIEKO TEK, 2003. (in Russian)
19. List of Methodologies for Calculating Emissions of Polluting Substances into the Atmospheric Air from Stationary Sources. Ministry of Natural Resources of Russia. URL: https://www.mnr.gov.ru/about/ (accessed: 29.09.2026). (in Russian)

Поступила в редакцию / Received: 30.08.2026
Поступила после рецензирования / Revised: 29.09.2025
Принята к публикации / Accepted: 15.10.2026

Оригинальная (исследовательская) статья
УДК 504.062
https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-57-66
https://elibrary.ru/wgtqvl

Эколого-экономическое сопровождение промышленных объектов как инновационный инструмент управления

Елена Анатольевна Цешковская[1]✉, Наталья Константиновна Цой[2], Елена Ильинична Голубева[3], Вадим Максимович Цешковский[4], Людмила Михайловна Карсанова[5], Владимир Викторович Матонин[6]
[1, 2, 4, 5] Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан
[3] Московский государственный университет имени Ломоносова, Москва, Россия
[6] ТОО «ЭкоЭксперт», Караганда, Казахстан
✉ Elena_tsesh@mail.ru

Аннотация. Постановка научной проблемы и её актуальность. В статье рассмотрен методический подход к эколого-экономическому сопровождению промышленных объектов, направленный на интеграцию экологической безопасности, экономической эффективности и технологической модернизации на различных стадиях жизненного цикла производственного объекта. Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода от преимущественно компенсационной модели природоохранного регулирования к превентивному управлению экологическими рисками и стимулированию внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) для снижения деградации окружающей среды и устойчивого развития. Материал и методы. В качестве объекта исследования с кейсовым подходом выбрана промышленная территории горных работ Карагандинского региона Казахстана. Исследована возможность применения трехэтапной модели эколого-экономического сопровождения, включающая начальный, проектный этапы, а также этапы строительства и эксплуатации объекта. На начальном этапе осуществляется экологическая классификация объекта, как правило – это определение его категории согласно экологическому законодательству. Далее определяется необходимость проведения полномасштабной оценки воздействия на окружающую среду, выявление чувствительных компонентов природной среды. На проектном этапе формируются природоохранные мероприятия, проводятся экологические общественные слушания и экспертиза и осуществляется выбор технологических решений. На стадии эксплуатации предусматриваются производственный экологический контроль, автоматизированный мониторинг эмиссий для крупных объектов – природопользователей и управление отходами. Результаты и их обсуждение. Авторами предложен эколого-экономический показатель эффективности внедрения «зеленых» решений, учитывающий предотвращенный экологический ущерб, капитальные и эксплуатационные затраты, а также экономический эффект от ресурсосбережения и снижения экологических платежей. Обоснован подход к ранжированию наилучших доступных технологий по критериям экологической и экономической эффективности. Проанализированы кейсы, которые отражают различные сценарии. На условном сценарии показано, что увеличение эмиссий сверх установленных нормативов приводит к непропорциональному росту финансовой нагрузки предприятия, тогда как внедрение НДТ позволяет одновременно снижать экологические риски и экономические издержки.

Ключевые слова: устойчивое развитие, эколого-экономическое сопровождение, наилучшие доступные технологии, экологическая эффективность, Карагандинский регион, Казахстан

Для цитирования: Цешковская Е.А., Цой Н.К., Голубева Е.И., Цешковский В.М., Карсанова Л.М., Матонин В.В. Эколого-экономическое сопровождение промышленных объектов как инновационный инструмент управления // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2026. Т. 12. № 2. С. 57-66. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-57-66. EDN WGTQVL.

Original Paper

Environmental and economic support for industrial facilities as an innovative management tool

Yelena A. Tseshkovskaya[1]✉, Natalya K. Tsoy[2], Elena I. Golubeva[3], Vadim M. Tseshkovskiy[4], Lyudmila M. Karsanova[5], Vladimir V. Matonin[6]
[1, 2, 4, 5] Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, Kazakhstan
[3] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
[6] "EcoExpert" LLP, Karaganda, Kazakhstan
✉ Elena_tsesh@mail.ru

© Цешковская Е.А., Цой Н.К., Голубева Е.И., Цешковский В.М., Карсанова Л.М., Матонин В.В., 2026

Abstract. Relevance and problem formulation. The article examines a methodological approach to the environmental and economic support of industrial facilities, aimed at integrating environmental safety, economic efficiency, and technological modernization at various stages of a production facility's life cycle. The relevance of the study is due to the need to transition from a predominantly compensatory model of environmental regulation to preventive management of environmental risks and to encourage the implementation of the best available technologies (BAT) to reduce environmental degradation and promote sustainable development. Materials and Methods. The industrial areas of mining operations in the Karaganda region of Kazakhstan were selected as the object of the study using a case-based approach. The possibility of applying a three-stage model of environmental and economic support was investigated, including the initial and project stages, as well as the stages of construction and operation of the facility. At the initial stage, the environmental classification of the facility is carried out typically, this involves determining its category in accordance with environmental legislation. Next, the need to conduct a full-scale environmental impact assessment and to identify sensitive components of the natural environment is determined. At the design stage, environmental protection measures are developed, environmental public hearings and expert reviews are conducted, and technological solutions are selected. At the operation stage, production environmental control, automated emission monitoring for large facilities that are users of natural resources, and waste management are provided for. Results and discussion. The authors propose an ecological and economic indicator of the effectiveness of implementing "green" solutions, which takes into account the prevented environmental damage, capital and operating costs, as well as the economic effect of resource conservation and reduced environmental payments. The approach to ranking the best available technologies based on the criteria of environmental and economic efficiency is substantiated. The article analyzes cases that reflect various scenarios. The hypothetical scenario demonstrates that an increase in emissions beyond the established standards leads to a disproportionate rise in the company's financial burden, whereas the implementation of BAT makes it possible to simultaneously reduce environmental risks and economic costs.

Keywords: sustainable development, environmental and economic support, best available technologies, environmental efficiency, Karaganda region, Kazakhstan

For citation: Tseshkovskaya Ye.A., Tsoy N.K., Golubeva E.I., Tseshkovskiy V.M., Karsanova L.M., Matonin V.V. Environmental and economic support of industrial facilities as an innovative management tool. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2026. Vol. 12. Iss. 2. P. 57-66. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-57-66. EDN WGTQVL. (in Russian)

Введение

Современная промышленная политика ориентирована не только на обеспечение экономической эффективности производства, но и на снижение негативного воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду. Особенно актуальна данная проблема для предприятий добывающей, горно-металлургической, энергетической и перерабатывающей отраслей, характеризующихся значительными объемами выбросов, сбросов, образования отходов и потребления природных ресурсов.

Традиционный подход к природоохранной деятельности зачастую основывается на контроле уже возникшего загрязнения и компенсации причиненного экологического ущерба. Такая модель ограничивает возможности долгосрочного управления экологическими рисками, поскольку основные затраты возникают после возникновения негативного воздействия. В связи с этим возрастает значение превентивного экологического управления, предусматривающего учет экологических факторов уже на стадии проектирования и выбора технологических решений.

Одним из инструментов такого подхода является эколого-экономическое сопровождение (ЭЭС), под которым в настоящем исследовании понимается система взаимосвязанного управления техническими решениями, экологическими рисками и экономическими показателями предприятия на протяжении жизненного цикла производственного объекта.

Особое значение данный подход приобретает в условиях перехода промышленных предприятий Казахстана к принципам наилучших доступных технологий. Цель исследования заключается в разработке комплексного методологического подхода к эколого-экономическому сопровождению промышленных объектов с учетом технологий, особенностей территориального расположения индустрии, имеющихся и потенциальных экологических рисков.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- систематизировать основные этапы эколого-экономического сопровождения;
- разработать алгоритм комплексной экологической оценки промышленного объекта;
- предложить показатель оценки эколого-экономической эффективности природоохранных мероприятий;
- разработать критерии экономического ранжирования НДТ;
- оценить влияние роста эмиссий на финансовую нагрузку предприятия;
- определить роль НДТ в снижении экологических и экономических рисков.

Научная новизна предлагаемого подхода заключается в формировании интегрированной системы эколого-экономического сопровождения, объединяющей экологическую классификацию объекта, оценку экологических рисков, прогнозирование экологического ущерба, выбор НДТ, экономическую оценку технологических решений, оценку предотвращенных экологических затрат и мониторинг фактического экологического эффекта.

Предложенный подход может применяться: на предприятиях горнодобывающей промышленности при подготовке экологической документации, при выборе НДТ, разработке программ повышения экологической эффективности, при планировании экологической модернизации, при оценке инвестиционных проектов.

Материалы и методы

Методологическую основу исследования составили системный, эколого-экономический и риск-ориентированный подходы. При исследовании промышленный объект рассматривается как эколого-экономическая система, в которой производственные процессы связаны с потреблением природных ресурсов, образованием эмиссий и отходов, экологическими рисками и соответствующими финансовыми затратами.

Предлагаемая система включает пять взаимосвязанных элементов: производственный процесс → воздействие на природные ресурсы → экологический риск → экономические последствия → природоохранное решение.

В качестве основных методов использованы: комплексная экологическая оценка, оценка природоохранных мероприятий, сравнительный анализ альтернативных НДТ; сценарный анализ изменения эмиссий; оценка ресурсосберегающего эффекта. Кейсовый подход проведен по следующим направлениям: добыча метана и угля. Добыча метана и угля, шахтная дегазация, хранение угля объединяют задачи экологической и промышленной безопасности (Гендлер и др., 2022; Портола и др., 2019; Федоров, Гаврилов, 2021; Janoszek et al., 2016).

Результаты исследования

Экологическая оценка последствий при добыче метана

Экологическая оценка при добыче метана представлена в виде этапов для экологического проектирования. Как правило, сопровождение экологической документации, по экологической оценке, планируемого предприятия начинается с заявления о намечаемой деятельности. Заявление о намечаемой деятельности составляется по установленному шаблону согласно Экологическому Кодексу РК и Инструкции по проведению экологической оценке[1]. Экологический эффект заключается в предотвращении прямых выбросов метана, парниковый эффект которого значительный.

Специфика источников газа:

- угольный метан: добыча из неразработанных угольных пластов. Метан находится в адсорбированном состоянии. Чтобы высвободить газ, нужно откачать пластовую воду и снизить давление (рис. 1 / fig. 1);
- шахтный метан извлекается из действующих выработок в рамках дегазации для предотвращения взрывов при добыче угля;
- биогаз / органические пласты: газ биогенного происхождения, связанный с другими осадочными породами и требующий иных подходов к извлечению.

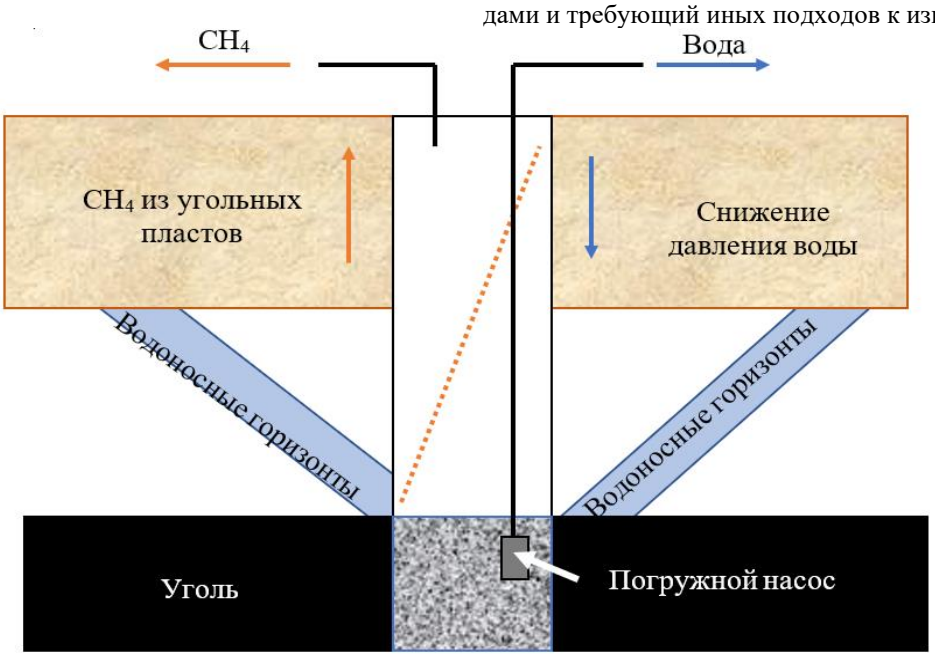


Рис. 1. Схема извлечения метана и откачки воды из угольного пласта (составлено авторами)
Fig. 1. Diagram of methane extraction and water pumping from a coal seam (compiled by the authors)

Для извлечения газа проводятся следующие виды работ:

1. Бурение и обустройство устья: локальное воздействие на рельеф и атмосферу. Изъятие 20-50 м² земель под площадку скважины. Выбросы от двигателей внутреннего сгорания буровой техники составляют около 0,5 т CO_2 за период бурения. Сопровождается локальным шумом и пылеобразованием.

2. Откачка пластовой воды: воздействие на гидросферу.

При добыче угольного метана на каждые 100 м³ извлеченного газа требуется откачивать ~0,5-2 м³/сутки минерализованной воды. Необходим анализ риска истощения смежных водоносных горизонтов.

3. Сбор, факельное сжигание или утилизация: оценка атмосферного баланса. Этот этап является основным этапом для снижения климатического урона (табл. 1 / tabl. 1). Сжигание переводит метан (CH_4) в CO_2, сокращая парниковый след объекта почти в 10 раз.

4. Демонтаж и рекультивация: завершение жизненного цикла включает ликвидационный тампонаж ствола скважины, демонтаж оборудования и полное восстановление плодородного слоя почвы.

[1] Экологический Кодекс Республики Казахстан от 02.01.2021.

Таблица 1

Сравнительный экологический баланс (на 100 м³ метана) (составлена авторами на основе расчетов)

Table 1

Comparative environmental balance (per 100 m³ of methane) (Compiled by the authors based on calculations)

Метод работы с газом // Method of working with gas	*Выбросы в CO_2-эквиваленте // Emissions in CO_2 equivalent*	*Экологические риски // Environmental risks*
Прямой выброс в атмосферу // Direct emission into the atmosphere	2,0 т CO_2-экв // 2.0 tons of CO_2 equivalent	Максимальный ущерб климату, опасность взрыва на стройплощадке // Maximum damage to the climate, explosion hazard on the site
Факельное сжигание // Flare combustion	0,18 т CO_2-экв // 0,18 tons of CO_2 equivalent	Чистый экоэффект: -1,82 т CO_2-экв/год. Утечки 1-3% добавляют до 0,06 т CO_2-экв/год // Net eco-effect: -1.82 t CO_2-eq/year. Leaks of 1-3% add up to 0.06 t CO_2-eq/year.
Мини-ГПУ (газопоршневая установка) (~1 кВт) // Mini-GPU (gas-piston unit) (~1 kW)	0,18 т CO_2-экв + энергия // 0.18 t CO_2-eq + energy	Убирает открытый факел, генерирует полезное тепло и электричество // It eliminates the open torch and generates useful heat and electricity.

Практические меры по снижению экологических рисков следующие (Zhang et al., 2023; Wei et al., 2024):

1. Защита атмосферы: установка герметичной устьевой арматуры и автоматических оптических или ультразвуковых датчиков утечек CH_4.

2. Очистка вод: оборудование замкнутого цикла очистки (обратный осмос или испарительные установки) для использования пластовой воды в технических нуждах.

3. Энергоутилизация: замена открытого факела на компактную газопоршневую установку (мини-ГПУ) на 1 кВт для закрытия собственных нужд объекта.

4. Рекультивация: поэтапное восстановление земель сразу после завершения буровых и эксплуатационных работ.

Таким образом, с точки зрения экономики отрицательный эффект будет в виде затрат на бурение скважины, обслуживание и водоочистку. Экологический эффект будет положительный и представлен сокращением парникового следа на 1,8 т CO_2-экв на каждые 100 м³ газа.

В экономике природопользования часто наблюдается «эффект масштаба»: на крупных предприятиях внедрение мощных очистных систем может давать более низкую удельную стоимость (ЭФ) за счет больших объемов очистки. В то же время на малых предприятиях те же показатели могут быть выше из-за невозможности использовать дорогостоящее, но высокопроизводительное оборудование. Однако для подтверждения этой закономерности в конкретном случае потребуются дополнительные данные.

Экологическая оценка при хранении угля

Исследования проводились на объекте Карагандинского угольного месторождения каменного угля. Объектом исследования являются штабели каменного угля, предметом исследования является процессы деградации угольного сырья под действием атмосферных факторов и техногенное воздействие складов на состояние окружающей среды и здоровье населения. Эколого-экономическое сопровождение разработано для прибортового открытого угольного склада штабельного типа угледобывающего предприятия Карагандинского региона.

Исходные данные объекта:

- склонность угля к окислению: IV группа (допустимая высота штабеля – 5 м);
- параметры угольного штабеля: высота – 5 м; ширина основания – 85 м; длина основания – 250 м;
- площадь основания одного угольного штабеля $S_ш = 85 \times 250 = 21\,250$ м^2 (2,125 га);
- вместимость одного штабеля – 100 000 т;
- проектная вместимость склада – 1 000 000 т;
- технологическое оборудование: автосамосвалы (прием угля), фронтальный колесный автопогрузчик (отгрузка).

Исследования проводились на примере каменного угля марки Д (табл. 2 / tabl. 2). Уголь хранится на открытых складах угля, которые занимают большие территории.

Хранение угля открытым способом и в штабелях обязательно сопровождается негативным воздействием на состояние окружающей среды (Гендлер и др., 2025; Гендлер и др., 2022; Шестернев, 2017; Kus, Misz-Kennan, 2016; Pan et al., 2022):

- пыление (в результате ветровой эрозии) – поступление мелких фракций угля в атмосферный воздух;
- окисление и самовозгорание угля – химическая реакция, сопровождающаяся взаимодействием органической массы угля с кислородом воздуха с выделением тепла.

Таблица 2

Фракционный состав исследуемого каменного угля марки Д (составлена авторами на основе сертификата качества угля)

Table 2

Fractional composition of the studied D-grade coal (compiled by the authors based on the coal quality certificate)

Фракция угля // Coal fraction	*Мелкая // Shallow*	*Крупная // Large*	*Негабарит // Oversized*
Размер, мм // Size, mm	0-50	> 50-300	> 300

Данные процессы создают препятствия в слаженной работе предприятия и создают определенную техногенную нагрузку на прилегающие территории. Образование угольной пыли (процесс пыления) начинается не с этапа хранения, а с добычи, транспортировки, грохочения, где угольные массы механически измельчают. При поступлении угля на открытые склады, на него начинают воздействовать факторы окружающей среды: ветер, солнце, влажность атмосферного воздуха. Так, при скорости ветра 1-5 м/с (Гендлер и др., 2022) мелкие частицы угля сдуваются с поверхности штабеля; наибольшее пыление наблюдается на узлах пересыпки угольной массы, при погрузке – разгрузке; поверхность угольного штабеля быстро высыхает и становится источником пылевыделения.

Процессы пылеобразования и самосгорания угольной пыли очень тесно связаны между собой:

- угольная пыль в атмосферном воздухе становится пылевоздушной смесью, которая является взрывоопасной;
- угольная пыль, накапливающаяся на поверхности конструкций, оборудования, аккумулирует тепло и становится источником тления;
- неравномерное распределение кислорода внутри штабеля является предпосылкой для самовозгорания.

В сухие теплые времена года с ветром возможность пылевого загрязнения и процесса самовозгорания угольного штабеля увеличивается в разы. При таком сценарии развития событий поступление угольной пыли и продуктов горения угольных штабелей повлекут за собой изменения в компонентах, экосистемах окружающей среды (рис. 2 / fig. 2).

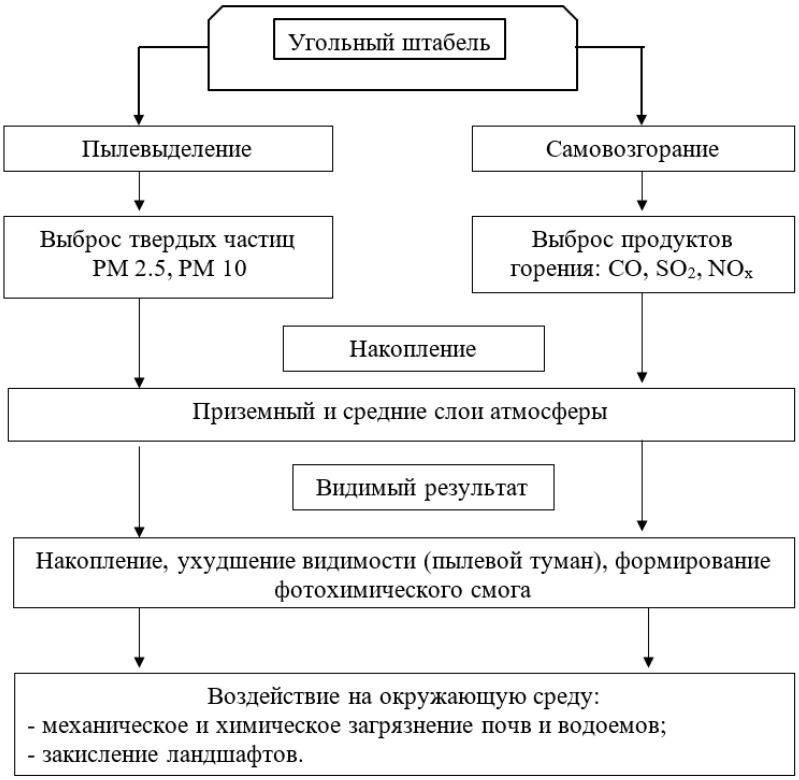


Рис. 2. Схема воздействия угольного штабеля на состояние окружающей среды (составлена авторами)
Fig. 2. Diagram of the impact of a coal pile on the environment (compiled by the authors)

В составе угольной пыли содержатся тяжелые металлы (Pb, As, Hg, Cd, V) и соединения серы. Попадая на поверхность почвы угольная пыль повышает её щелочность, уплотняется верхний слой и загрязняется тяжелыми металлами. В результате корневая система недополучает кислород, воду из-за изменения структуры земли, разрушается из-за воздействия тяжелых металлов и происходит гибель растения. При попадании угольной пыли на поверхность листьев растений образуется плотная пленка, которая закрывает устьица, задерживает солнечный свет, что приводит к гибели растений. Угольная пыль, оседая на поверхности водных источников, повышает её мутность, приводит к заиливанию дна и снижению уровня растворенного кислорода, что

приводит к деградации гидробиоценозов. Наибольшую опасность для человека представляют частицы PM 2,5 и PM 10. Они задерживаются в верхних дыхательных путях, проникают в легкие тем самым вызывают хронические заболевания.

В случае самовозгорания угольных штабелей в атмосферный воздух поступает угарный газ, оксиды серы, азота и канцерогены в виде полициклических ароматических углеводородов, в том числе бенз(а)-пирен. Такие эндогенные пожары могут по длительности продолжаться месяцами, становясь постоянным источником химического загрязнения атмосферного воздуха.

Уголь, находящийся на открытых складах, постоянно подвергается воздействию агрессивностей окружающей среды (изменение погоды, климатические особенности района расположения складов). Ветровая нагрузка, осадки (дождь, снег), перепады температуры, жара, прямые солнечные лучи все это влияет на процессы выветривания угля. В результате этого происходит разрушение: уголь теряет свой природный блеск, трескается, крошится, постепенно разрушаясь до мелкой крошки и пыли, что является внешним преобразованием угольных штабелей. Но самая большая проблема, что в результате окисления уголь теряет свои технологические качества: данные процессы приводят к потере способности угля к спеканию и коксующиеся показатели снижаются, то есть из такого сырья уже невозможно получить качественный кокс (Портола и др., 2019). Данный процесс называется окислением или выветриванием угля. По классификации выветривание бывает физическое и химическое, что зависит от климатических условий (Шестернев, 2017).

Физическое выветривание угля – это механическое разрушение угля (трескается, рассыпается) при этом химический состав не изменяется. Основной причиной физического разрушения являются резкие колебания температуры: днем угольный штабель под воздействием солнечной энергии нагревается, а в ночное время остывает, то есть штабель то расширяется, то сжимается. Это приводит к микротрещинам на поверхности штабеля, затем они превращаются в расколы и уголь постепенно рассыпается на более мелкие фракции. В регионах резко-континентальным климатом, например, Карагандинский регион, к колебаниям температуры добавляется еще вода. Атмосферные осадки (дождь, тающий снег) проникают в мелкие трещины, замерзая при снижении температуры, превращаясь в лед, т.е. происходит расширение трещин изнутри. Этот процесс многократный, цикличный в результате чего уголь начинается разламываться и измельчается, что приводит к потускнению блеска (чаще его потери), а также изменению цвета угольных масс (Ворошилов и др., 2008; Гендлер и др., 2022).

Таким образом, физическое выветривание начинается на поверхности угля, в местах контакта с внешней средой, и его действие проявляется в механическом разрушении под воздействием солнечной энергии, атмосферы и воды. Физическое выветривание вызывается разнообразными факторами. В зависимости от природы воздействующего фактора характер разрушения углей при физическом выветривании различен. В одних случаях процесс разрушения происходит внутри угля без участия внешнего механически действующего агента. Сюда относится изменение объема составных частей породы, вызываемое колебанием температуры. Такое явление может быть названо температурным выветриванием. В других случаях уголь разрушаются под механическим воздействием посторонних агентов. Такой процесс может быть условно назван механическим выветриванием.

Температурное выветривание происходит под воздействием суточных и сезонных колебаний температуры, вызывающих неравномерное нагревание и охлаждение угля. При этом минеральные зерна, слагающие угли, испытывают то расширение, при повышении температуры, то сжатие, при ее понижении. Таким образом, в углях попеременно возникают сжимающие и растягивающие усилия. Расширение и сжатие угля более интенсивно сказываются в самой приповерхностной части угля.

В результате длительного воздействия колебаний температуры и различных коэффициентов расширения взаимное сцепление отдельных минеральных зерен в угле нарушается, он растрескивается и распадается на отдельные обломки.

Химическое выветривание происходит с постоянным окислением и поглощением влаги из окружающей среды, т.е. происходит не просто потеря товарного вида угля, а его перерождение, т.е. происходит ухудшение энергетических и технологических показателей угля, таким образом происходит значительное изменение качества угля[1] (Janoszek et al., 2016; Kus, Misz-Kennan, 2016; Pan et al., 2021; Jha et al., 2014; Zhang et al., 2023; Wei et al., 2024). Результатом таких реакций и изменений в угольном массиве является образование мелкой угольной пыли, приводящее к потерям угля во время погрузочно-разгрузочных работ.

С целью снижения экологических и пожарных рисков необходим комплексный подход, который бы охватывал организационные, химические и инженерно-технические мероприятия:

- послойное уплотнение при укладке: прессование (укатывание) угля при формировании штабелей, что снижает пористость угольных массивов, перекрывая доступ кислорода во внутрь;

- применение химических пленкообразующих реагентов: обработка (орошение) поверхности угольных открытых складов (штабелей) растворами химических пленкообразующих реагентов, что создает пленку, предотвращающую пыление и перекрывающая доступ кислорода во внутрь штабеля;

- установка ветрозащитных экранов: по периметру склада устанавливаются щиты, снижающие скорость ветра;

- автоматизированный мониторинг: установка термодатчиков внутри угольного штабеля для контроля внутренней температуры с целью предотвращения самовозгорания.

Обработка поверхности угольного штабеля пленкообразующим раствором предотвращает пыление. При поэтапной обработке поверхности склада реагентами получаются следующие расчетные результаты, приведенные в табл. 3 / tabl. 3.

Таблица 3

Результаты обработки поверхности угольного штабеля (составлена авторами)

Table 3

Results of surface treatment of the coal stack (compiled by the authors)

Степень покрытия поверхности угольного штабеля // The degree of coverage of the coal stack surface	*Уменьшение площади пыления, га (м²) // Reduction in the area of dusting, ha (m²)*	*Интенсивность выброса, г/с // Emission rate, g/s*	*Валовый выброс, т/год (сокращение на, т/год) // Total emission, t/year (reduction, t/year): t/year)*
0% (базовый) // 0% (base)	0 га (0 м²)	11 452	196 901,1 (0)
10% покрытия // 10% coverage	40,9 га (409 000 м²)	10 306,8	177 210,9 (19 690,1)
25% покрытия // 25% coverage	81,8 га (818 000 м²)	9 161,6	157 520,9 (39 380,2)
50% покрытия // 50% coverage	204,5 га (2 045 000 м²)	5 726	98 450,6 (98 450,6)

Проведение мероприятия по обеспылеванию и снижению самовозгорания угля сопровождается социально- экологическим эффектом, заключающемся в:

- снижении запыленности в рабочей зоне, улучшения условий труда машинистов автопогрузчиков и водителей автосамосвалов;

- уменьшение территории рассеивания угольной пыли, следовательно, происходит снижение техногенной нагрузки на прилегающие территории в том числе селитебные зоны.

Таким образом, при покрытии поверхности угольного штабеля на 25%, 50% экономическая эффективность будет составлять более 1,5 млрд тенге/год при окупаемости оборудования в первой месяц работы. Нанесение плёнкообразующих покрытий необходимо перед началом сухих ветренных периодов с помощью поливочных машин, снабженных распылительной системой.

В Казахстане утверждены отраслевые справочники НДТ, в том числе справочник «Добыча и обогащение угля», утвержденный постановлением Правительства РК от 27 декабря 2023 г. № 1201, и справочник «Добыча и обогащение руд цветных металлов (включая драгоценные)», утвержденный постановлением от 8 декабря 2023 г. № 1101. Экономическую оценку НДТ целесообразно проводить одновременно по нескольким направлениям:

– капитальные инвестиции;

– эксплуатационные затраты;

– предотвращенный экологический ущерб;

– снижение платы за негативное воздействие;

– снижение потребления ресурсов;

– снижение вероятности аварий и экологических санкций;

– дополнительная прибыль;

– социальный эффект.

Экономический эффект предотвращения эмиссий

Особенно важным является учет нелинейного роста финансовой нагрузки при превышении установленных нормативов.

Рассмотрен условный промышленный объект с условной базовой годовой платой за эмиссии 50 млн тенге (табл. 4 // tabl. 4).

Таблица 4

Сценарная оценка роста финансовой нагрузки (составлена авторами)

Table 4

Scenario assessment of financial burden growth (compiled by the authors)

Показатель // Indicator	*Базовый уровень // Base level*	*+10%*	*+15%*	*+20%*
Объем эмиссий // The volume of emissions	100%	110%	115%	120%
Плата в пределах норматива, млн тг // Payment within the standard limit, million tenge	50	50	50	50
Условная дополнительная плата, млн тг // Conditional additional payment, million tenge	0	50	75	100
Общая финансовая нагрузка, млн тг // Total financial burden, million tenge	50	100	125	150

Данный расчет следует рассматривать как сценарную модель. Фактический размер платежей определяется действующим налоговым и экологическим законодательством, категорией объекта, видом эмиссии, наличием разрешения и конкретными нормативами. В то же время нормативная система Казахстана действительно предусматривает экономические стимулы для предприятий, внедряющих НДТ, включая нулевой коэффициент к ставкам платы при наличии комплексного экологического разрешения, тогда как для предприятий I категории без комплексного экологического разрешения предусмотрено поэтапное увеличение коэффициентов.

Таким образом, эколого-экономическое сопровождение предлагается осуществлять на протяжении четырех основных этапов жизненного цикла промышленного объекта:

– начальный этап;

– проектный этап;

– этап строительства

– этап эксплуатации.

Условно эколого-экономическое сопровождение предприятий, оказывающих влияние на компоненты природы, можно поделить на четыре этапа (табл. 5 // tabl. 5).

Таблица 5

Основные этапы эколого-экономического сопровождения экологически влияющих предприятий (составлена авторами)

Table 5

Main stages of environmental and economic support for environmentally impacting enterprises (compiled by the authors)

Этап // Stage	*Основные мероприятия // Main measures*	*Экономический результат // Economic outcome*
Начальный // Elementary	Категорирование объекта, экологический скрининг, определение чувствительных компонентов среды, предварительная оценка эмиссий // Object categorization, environmental screening, identification of sensitive environmental components, preliminary assessment of emissions.	Определение потенциальных экологических затрат и рисков // Determination of potential environmental costs and risks
Проектный // Project-based	Экологическая оценка, разработка природоохранных мероприятий, выбор НДТ, экологическая экспертиза // Environmental assessment, development of environmental protection measures, selection of BAT, environmental expertise	Оптимизация инвестиционных решений // Optimization of investment decisions
Строительство // Construction	Производственный экологический контроль, мониторинг эмиссий, управление отходами, контроль эффективности НДТ // Industrial environmental control, emissions monitoring, waste management, NDT efficiency control	Снижение экологических платежей и рисков // Reduction of environmental payments and risks
Эксплуатация // Exploitation	Производственный экологический контроль, программа управления отходами, мониторинг эмиссий, контроль эффективности НДТ // Industrial environmental control, waste management program, emission monitoring, monitoring the effectiveness of BAT.	Недопущение полной трансформации окружающей среды. Снижение экологических платежей и рисков // Preventing a complete transformation of the environment. Reducing environmental payments and risks.

Как видно, экономический механизм НДТ формирует ситуацию, при которой инвестиции в модернизацию могут рассматриваться не только как природоохранные расходы, но и как инструмент предотвращения будущего роста экологических издержек**.**

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать выводы и предложить практические рекомендации.

1. Эколого-экономическое сопровождение позволяет объединить два традиционно рассматриваемых отдельно направления – экологическую безопасность и экономическую эффективность.

2. В рамках классической природоохранной модели экологические мероприятия рассматриваются преимущественно как дополнительные расходы предприятия, однако предлагаемый подход представлен следующим**:** экологическое воздействие → риск → потенциальный ущерб → экономическая оценка → технологическое решение → предотвращенный ущерб.

3. Оценку НДТ некорректно проводить только по величине первоначальных инвестиций, так как такой подход не отражает полной картины внедрения природоохранных мероприятий.

4. Важным результатом является переход от оценки стоимости природоохранного мероприятия к оценке его полной жизненной стоимости**.**

5. Установка системы очистки эмиссий требует первоначальных капиталовложений, однако одновременно может приводить к уменьшению объема выбросов; снижению экологических платежей; снижению расхода сырья; снижению энергопотребления; сокращению количества отходов; уменьшению риска экологического ущерба; повышению экологической устойчивости предприятия.

Финансирование

Исследование выполнено за счет средств государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова «Географический подход к оптимизации природопользования в моделях устойчивого развития» (тема № 126042920511-1).

Funding

The research was funded by the state assignment for Lomonosov Moscow State University «Geographical approach to optimizing environmental management in sustainable development models» (theme No. 126042920511-1).

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest
The authors declare no conflict of interest.

Сведения об авторском вкладе
Е.А. Цешковская – постановка задачи исследования, формулировка идеи статьи, научное редактирование.
Н.К. Цой – подготовка рукописи, сбор и анализ данных;
Е.И. Голубева – систематизация сведений, подготовка отдельных частей рукописи, вычитка итоговой версии статьи.
В.М. Цешковский – обработка полученных данных, подготовка таблиц, подготовка отдельных частей рукописи.
Л.М. Карсанова – сбор, систематизация сведений.
В.В. Матонин – сбор, систематизация сведений.

Contribution of the authors
Ye.A. Tseshkovskaya – formulation of the research task, formulation of the article's idea, scientific editing;
N.K. Tsoy – preparation of the manuscript, data collection and analysis;
E.I. Golubeva – systematization of information, preparation of individual parts of the manuscript, proofreading of the final version of the article;
V.M. Tseshkovskiy – processing of the obtained data, preparation of tables, preparation of individual parts of the manuscript;
L.M. Karsanova – collection and systematization of information;
V.V. Matonin – collection and systematization of information.

Список источников
1. Ворошилов С.П., Ворошилов Я.С., Ворошилов А.С., Уварова В.А. Влияние влаги на окисление каменных углей // *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности.* 2008. № 2. С. 68-82.
2. Гендлер С.Г., Степанцова А.Ю., Попов М.М. Обоснование безопасной эксплуатации закрытого угольного склада по газовому фактору // *Записки Горного института*. 2025. № 272. С. 72-82.
3. Гендлер С.Г., Степанцова А.Ю., Кузнецов В.С. Проблемы промышленной и экологической безопасности при использовании для временного хранения угля открытых и закрытых складов // *Известия ТулГУ. Науки о Земле.* 2022. Вып. 4. С. 134-143.
4. Кузнецов В.Г. Эволюция процессов выветривания в истории земли // *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический.* 2021. Т. 96. Вып. 2. С. 52-61.
5. Портола В.А., Жданов А.Н., Бобровникова А.А. Перспектива применения антипирогенов для предотвращения самовозгорания складов угля // *Уголь*. 2019. № 4. С. 14-19 http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-4-14-19
6. Федоров В.И., Гаврилов В.Л. Оценка изменения гранулометрического состава низкометаморфизированных углей при длительном хранении // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021. № 12–1. С. 223-232. https://doi.org/10.25018/023 6_1493_2021_121_0_223
7. Шестернев Д.М. Физическое и химическое выветривание массивов горных пород в криолитозоне // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017. № 3. С. 350-360.
8. Janoszek T., Gogola K., Bajerski A. Influence of anti-pyrogenic materials on coal mining waste's tendency to self-ignite // *Journal of Sustainable Mining*. 2016. Vol. 15. Iss. 4. P. 170-174. https://doi.org/10.1016/j.jsm.2017.03.004
9. Jha P.K., Das T.K., Soni A.B. Effect of Weathering on Coal Quality // *International Proceedings of Economics Development and Research*. 2014. Vol. 75. P. 155-159. https://doi.org/10.7763/IPEDR.2014.V75.31
10. Kus J., Misz-Kennan,M. Coal weathering and laboratory (artificial) coal oxidation // *International Journal of Coal Geology*. 2016. Vol. 171. P. 12-36. https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.11.016
11. Pan Y., Yin C., Fernandez C., Fu L., Lin C.-T. A Systematic Review and Bibliometric Analysis of Flame-Retardant Rigid Polyurethane Foam from 1963 to 2021 // *Polymers.* 2022. Vol. 14. 3011. https://doi.org/10.3390/polym14153011
12. Wei A., Ou M., Wang S., Zou Y., Xiang C., Xu F., Sun L. Preparation of a Highly Flame-Retardant Urea–Formaldehyde Resin and Flame Retardance Mechanism // *Polymers*. 2024. Vol. 16. Iss. 13. 1761. https://doi.org/10.3390/polym16131761
13. Zhang Yu., Li W., Cheng X., Yan K., Zhao W., Yang F. Air and oxy-fuel combustion characteristics of coal gangue and weathered coal blends // *Energy*. 2023. Vol. 284. 128660. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128660

References
1. Voroshilov S.P., Voroshilov Ya.S., Voroshilov A.S., Uvarova V.A. The effect of moisture on the oxidation of coal. *Bulletin of the Scientific Center for Work Safety in the Coal Industry*. 2008. Iss. 2. P. 68-82. (in Russian)
2. Gendler S.G., Stepantsova A.Yu., Popov M.M. Justification of the safe operation of a closed coal storage facility based on the gas factor. *Notes of the Mining Institute*. 2025. Iss. 272. P. 72-82. (in Russian)

3. Gendler S.G., Stepantsova A.Yu., Kuznetsov V.S. Problems of industrial and environmental safety when using open and closed warehouses for the temporary storage of coal. *Izvestiya TulGU. Earth Sciences*. 2022. Iss. 4. P. 134-143. (in Russian)

4. Kuznetsov V.G. Evolution of weathering processes in the history of the Earth. *Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Geological Section.* 2021. Vol. 96, Iss. 2. P. 52-61. (in Russian)

5. Portola V.A., Zhdanov A.N., Bobrovnikova A.A. Prospects for the Use of Antipyrogenics to Prevent Self-Ignition of Coal Storages. *Ugol*'. 2019. Iss. 4. P. 14-19. http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-4-14-19 (in Russian)

6. Fedorov V.I., Gavrilov V.L. Assessment of changes in the granulometric composition of low-metamorphosed coals during long-term storage. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2021. Iss. 12-1. P. 223-232. http://dx.doi.org/10.25018/0236_1493_2021_121_0_223 (in Russian)

7. Shesternev D.M. Physical and chemical weathering of rock massifs in the cryolithozone. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017. Iss. 3. P. 350-360. (in Russian)

8. Janoszek T., Gogola K., Bajerski A. Influence of anti-pyrogenic materials on coal mining waste's tendency to self-ignite. *Journal of Sustainable Mining*. 2016. Vol. 15. Iss. 4. P. 170-174. https://doi.org/10.1016/j.jsm.2017.03.004

9. Jha P.K., Das T.K., Soni A.B. Effect of Weathering on Coal Quality. *International Proceedings of Economics Development and Research*. 2014. Vol. 75. P. 155-159. https://doi.org/10.7763/IPEDR.2014.V75.31

10. Kus J., Misz-Kennan,M. Coal weathering and laboratory (artificial) coal oxidation. *International Journal of Coal Geology*. 2016. Vol. 171. P. 12-36. https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.11.016

11. Pan Y., Yin C., Fernandez C., Fu L., Lin C.-T. A Systematic Review and Bibliometric Analysis of Flame-Retardant Rigid Polyurethane Foam from 1963 to 2021. *Polymers.* 2022. Vol. 14. 3011. https://doi.org/10.3390/polym14153011

12. Wei A., Ou M., Wang S., Zou Y., Xiang C., Xu F., Sun L. Preparation of a Highly Flame-Retardant Urea–Formaldehyde Resin and Flame Retardance Mechanism. *Polymers*. 2024. Vol. 16. Iss. 13. 1761. https://doi.org/10.3390/polym16131761

13. Zhang Yu., Li W., Cheng X., Yan K., Zhao W., Yang F. Air and oxy-fuel combustion characteristics of coal gangue and weathered coal blends. *Energy*. 2023. Vol. 284. 128660. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128660

Поступила в редакцию / Received: 14.09.2026
Поступила после рецензирования / Revised: 10.10.2026
Принята к публикации / Accepted: 21.10.2026