



ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ. СЕРИЯ: ЭКОЛОГИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

2026 Том 34 № 3

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-3
<http://journals.rudn.ru/ecology>

Научный журнал
Издается с 1993 г.

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-61176 от 30.03.2015 г.

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Главный редактор

Савенкова Елена Викторовна, доктор экономических наук, профессор, директор института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

Заместители главного редактора

Киричук Анатолий Александрович, доктор биологических наук, профессор, проректор по хозяйственной деятельности, директор департамента экологии человека и биоэлементологии института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

Редина Маргарита Михайловна, доктор экономических наук, профессор, профессор департамента экологической безопасности и менеджмента качества продукции института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

Ответственный секретарь редколлегии

Яценко Елена Борисовна, кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

Члены редакционной коллегии

Аньези Валерио, профессор, директор Итало-Российского экологического института, Университет Палермо, Палермо, Италия

Бобровницкий Игорь Петрович, член-корреспондент РАН, доктор медицинских наук, профессор, заместитель начальника по научной работе филиала № 2 ФГБУ «НМИЦ ВМТ им. А.А. Вишневого» Министерства обороны РФ, Красногорск, Российская Федерация

Валеева Наиля Гарифовна, кандидат педагогических наук, доцент, заведующая кафедрой иностранных языков института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

Джан Шупинь, доктор наук, профессор Шаньдунского университета, Цзинань, Китай

Розенберг Геннадий Самуилович, доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, заслуженный деятель науки Российской Федерации, главный научный сотрудник Института экологии Волжского бассейна, Самарский федеральный исследовательский центр, Российская академия наук, Тольятти, Российская Федерация

Савин Игорь Юрьевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик, заведующий отделением генезиса, географии, классификации и цифровой картографии Почвенного института имени В.В. Докучаева, Российская академия наук, профессор департамента рационального природопользования института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

Сабьков Владислав Александрович, доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией катализаторов глубокого окисления Института катализа имени Г.К. Борескова, Сибирское отделение Российской академии наук, отдел гетерогенного катализа, Новосибирск, Российская Федерация

Скальный Анатолий Викторович, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой медицинской элементологии медицинского института РУДН, Москва, Российская Федерация

Хаустов Александр Петрович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор департамента экологической безопасности и менеджмента качества продукции института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

Широкова Вера Александровна, доктор географических наук, профессор, заведующая отделом истории наук о Земле Института истории естествознания и техники имени С.И. Вавилова, Российская академия наук, Москва, Российская Федерация

ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ. СЕРИЯ: ЭКОЛОГИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

ISSN 2313-2310 (Print), ISSN 2408-8919 (Online)

Периодичность: ежеквартально

Языки публикаций: русский, английский.

Журнал индексируется в Белом списке РЦНИ, ПИНЦ, DOAJ, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory, Dimensions.

Цели и тематика

Цели журнала «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности» – повышение эффективности научных исследований в области охраны окружающей среды и экологии человека и распространение современных методов исследований и новейших достижений в области рационального природопользования.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ по научным специальностям 1.5.15. Экология (биологические науки), 1.5.15. Экология (технические науки), 1.6.21. Геоэкология (географические науки), 1.6.21. Геоэкология (геолого-минералогические науки), 1.6.21. Геоэкология (технические науки).

Начиная с 1993 г. в журнале публикуются результаты фундаментальных и прикладных работ ученых, преподавателей, аспирантов в виде научных исследовательских и обзорных статей, научных сообщений по следующим направлениям: общая экология, природопользование, устойчивое развитие, экологическая безопасность, защита окружающей среды, экология человека, экологическая экспертиза, радиоэкология и радиационный контроль, оценка состояния окружающей среды и экологическое образование. К рассмотрению принимаются материалы по результатам оригинальных научных исследований представителей высших учебных заведений и научных центров России и зарубежных стран.

Кроме научных статей публикуется хроника научной жизни, включающая рецензии, обзоры, информацию о конференциях, научных проектах и т. д. Для привлечения к научным исследованиям и повышения качества квалификационных работ журнал предоставляет возможность публикации статей, написанных по материалам лучших магистерских работ.

Правила оформления статей, архив и дополнительная информация размещены на сайте: <http://journals.rudn.ru/ecology>

Редактор И.Л. Панкратова
Редактор англоязычных текстов К.Л. Уланова
Компьютерная верстка Т.Н. Селивановой

Адрес редакции:

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: publishing@rudn.ru

Адрес редакционной коллегии журнала:

Российская Федерация, 113093, Москва, Подольское шоссе, д. 8, корп. 5
Тел.: +7 (495) 952-70-28; e-mail: ecoj@rudn.ru

Подписано в печать 25.08.2026. Выход в свет 29.08.2026. Формат 70×108/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».
Усл. печ. л. 16,8. Тираж 500 экз. Заказ № 1029. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН
Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 955-08-61; e-mail: publishing@rudn.ru



RUDN JOURNAL OF ECOLOGY AND LIFE SAFETY

2026 VOLUME 34 NO. 3

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-3

<http://journals.rudn.ru/ecology>

Founded in 1993

Founder: Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

Editor-in-Chief

Elena V. Savenkova, Dr. of Sciences in Economics, Professor, Director of the Institute of Environmental Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

Deputy Editors-in-Chief

Anatoly A. Kirichuk, Dr. of Sciences in Biology, Docent, Vice-Rector for Economic Activity, Director of the Department of Human Ecology and Bioelementology, RUDN University, Moscow, Russian Federation

Margarita M. Redina, Doctor of Sciences in Economics, Docent, Professor of the Department of Environmental Security and Product Quality Management, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

Executive Secretary

Elena B. Yatsenko, Cand. of Technical Sciences, Deputy Director on Scientific Work, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

Editorial Board

Valerio Agnesi, Professor, Director of the Italian-Russian Ecological University, Professor at University of Palermo, Palermo, Italy

Igor P. Bobrovnikskii, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. of Science in Medicine, Professor, Deputy Head on Scientific Work in Branch No. 2 "National Medical Research Center for High Medical Technologies — A.A. Vishnevsky Central Military Clinical Hospital" of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Krasnogorsk, Russian Federation

Nailya G. Valeeva, Cand. of Pedagogical Sciences, Docent, Head of the Department of Foreign Languages, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

Shuping Zhang, Ph.D., Professor, Shandong University, Jinan, China

Gennadiy S. Rozenberg, Dr of Biological Sciences, Professor, Chief Scientist of the Institute of Ecology of Volga River Basin, — branch of Samara Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory of Ecosystem Modeling, Tolyatti, Russian Federation

Igor Yu. Savin, Dr of Science in Agriculture, Professor, Academic, Head of the Department of Genesis, Geography, Classification and Digital Cartography of Soils, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Russian Academy of Sciences, Professor of the Department of Environmental Management, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

Vladislav A. Sadykov, Dr. of Science in Chemistry, Professor, Head of the Laboratory of Deep Oxidation Catalysts, Boreskov Institute of Catalysis, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

Anatoly V. Skalny, Doctor of Science Medicine, Professor, Head of the Department of Medical Elementology, Institute of Medicine, RUDN University, Moscow, Russian Federation

Aleksandr P. Khaustov, Dr. of Science in Geology, Professor, Leading Specialist at Institute of Environmental Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

Vera A. Shirokova, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of the Department of the History of Earth Sciences, S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

RUDN JOURNAL OF ECOLOGY AND LIFE SAFETY
Published by the Peoples' Friendship University of Russia
named after Patrice Lumumba (RUDN University)

ISSN 2313-2310 (Print), ISSN 2408-8919 (Online)

Frequency: Quarterly

Publication languages: Russian, English

The Journal is indexed: *White List (RCSI), Russian Index of Science Citation, DOAJ, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory, Dimensions.*

Aims and Scope

An efficiency increase in the field of environmental protection and scientific research of human ecology, as well as the spread of modern methods of research and the latest achievements in the field of environmental management are the aims of RUDN Journal of Ecology and Life Safety. Since 1993, the journal has published the results of fundamental and applied works of scientists, teachers, postgraduates in the form of scientific research and review articles, scientific reports in the following areas: general ecology, nature management, sustainable development, environmental safety, environmental protection, human ecology, environmental expertise, radioecology and radiation control, environmental assessment environment and environmental education. Materials based on the results of original scientific research of representatives of higher educational institutions and scientific centers of Russia and foreign countries are accepted for consideration.

In addition to scientific articles, a chronicle of scientific life is published, including reviews, reviews, information about conferences, scientific projects, etc. To attract to scientific research and improve the quality of qualifying papers, the journal provides the opportunity to publish articles written based on the materials of the best master's papers.

Chronicle of scientific events, including reviews, information about conferences, research projects, etc. are published in addition to scientific articles.

Journal allows publication of articles based on the best master's thesis for the purpose of intensification of research activity and improving the quality of qualification works.

Author guidelines, archive and other information are available on the website: <http://journals.rudn.ru/ecology>

Copy Editor *I.L. Pankratova*
English Text Editor *K.L. Ulanova*
Layout Designer *T.N. Selivanova*

Address of the editorial office:

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation
Tel.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: publishing@rudn.ru

Address of the editorial board of the journal:

8 Podolskoye Shosse, bldg 5, Moscow, 113093, Russian Federation
Tel.: +7 (495) 952-70-28; e-mail: ecoj@rudn.ru

Printing run 500 copies. Open price.

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba
6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

Printed at RUDN Publishing House
3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation
Tel.: +7 (495) 955-08-61; e-mail: publishing@rudn.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ

Абдуллина Л.Р., Смирнов В.С. Оценка влияния цифровых систем мониторинга энергопотребления на снижение углеродного следа промышленных объектов.....	341
Ахтямов Р.Г., Шиховцева А.В., Калугин Л.Е., Евщик Е.Ю. Оценка производственных факторов при изготовлении литий-ионных аккумуляторов на примере оборудования фирмы Gelon LIB	364
Калашников С.В., Номоев А.В., Чимытов Т.А., Южаков И.А., Самбуу М., Цырен-Очир С.-Э. Вклад источников индивидуального теплоснабжения в загрязнение воздуха городов Сибири и его снижение бытовыми электрофильтрами	376
Новикова А.Р., Балымова Е.С. Оценка содержания и миграции ионов тяжелых металлов в системе биологической очистки сточных вод с реализованным А2/О-процессом	391
Лукьянов А.И., Дахова Е.В., Майорова Л.П. Моделирование распространения угольной пыли при функционировании АО «Порт Ванино» до и после установки ветро-пылезащитного экрана.....	407
Мирсаидов У., Назаров Х.М., Цэрэн Д., Чимэдбазарын Ж. Экологические аспекты прошлой добычи урана в Центральной Азии и Монголии.....	421

ЭКОЛОГИЯ

Парахина Е.А., Брундукова В.А. Оценка состояния зеленых насаждений г. Таруса	433
--	-----

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Шалагинова А.Д., Валькова Т.М. Экологические тропы Московской области в системе экологического образования: проблемы и перспективы развития.....	448
--	-----

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Боровская А.С., Гаевая Е.В. Исследование влияния нефтезагрязнений на физико-химические и микробиологические свойства торфяных болотных верховых почв с применением минерала глауконит и штаммов микроорганизмов в лабораторных условиях.....	467
--	-----

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

Баранов Д.Ю., Моисеенко Т.И. Скрининг химического состава атмосферных осадков и почвенных вод на водосборе оз. Гусиное Валдайской возвышенности	485
Загородний С.С., Белова И.К., Никулина С.Н. Экспериментальная многокритериальная оценка архитектур сверточных нейронных сетей для задачи раннего обнаружения лесных пожаров по данным БПЛА	500
Гусев А.В., Шахраманьян М.А. Вопросы комплексного внедрения распределенных сенсорных сетей и технологий интернета вещей для мониторинга окружающей среды в целях обеспечения экологической безопасности.....	515

CONTENTS

INDUSTRIAL ECOLOGY

Abdullina L.R., Smirnov V.S. Assessment of the impact of digital energy consumption monitoring systems on reducing the carbon footprint of industrial facilities	341
Akhtyamov R.G., Shikhovtseva A.V., Kalugin L.E., Evshchik E.Yu. Assessment of production factors in the manufacturing of lithium-ion batteries: case study of Gelon LIB equipment.....	364
Kalashnikov S.V., Nomoev A.V., Chimytov T.A., Yuzhakov I.A., Sambuu M., Tseren-Ochir S.-E. The contribution of individual heat sources to air pollution in Siberian cities and its reduction by household electrostatic precipitators.....	376
Novikova A.R., Balymova E.S. Assessment of heavy metal ion content and migration in wastewater biological treatment system with implemented A2/O-process	391
Lukyanov A.I., Dakhova E.V., Mayorova L.P. Simulation of the coal dust spread during the operation at JSC Vanino Port before and after the installation of a wind and dust screen	407
Mirsaidov U., Nazarov Kh.M., Tseren D., Chimedbazaryn J. Environmental aspects of past uranium mining in Central Asia and Mongolia	421

ECOLOGY

Parakhina E.A., Brundukova V.A. Assessment of the state of green areas in Tarusa	433
---	-----

ENVIRONMENTAL EDUCATION

Shalaginova A.D., Valkova T.M. Ecological trails of the Moscow region in the system of environmental education: problems and development prospects	448
---	-----

GEOECOLOGY

Borovskaya A.S., Gaevaya E.V. Study of the effect of oil pollution on the physical, chemical, and microbiological properties of peat-marsh top soils using the mineral glauconite and microbial strains in laboratory conditions	467
---	-----

ENVIRONMENTAL MONITORING

Baranov D.Yu., Moiseenko T.I. Chemical composition screening of atmospheric precipitation and soil water in the Gusinoe Lake catchment area, the Valdai Upland.....	485
Zagorodnii S.S., Belova I.K., Nikulina S.N. Experimental multi-criteria evaluation of convolutional neural network architectures for early forest fire detection using UAV data....	500
Gusev A.V., Shakhramanyan M.A. Issues of comprehensive implementation of distributed sensor networks and internet of things technologies for environmental monitoring to ensure ecological safety.....	515

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ INDUSTRIAL ECOLOGY

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-3-341-363

EDN: GOAOVW

УДК 658.26:504

Научная статья / Research article

Оценка влияния цифровых систем мониторинга энергопотребления на снижение углеродного следа промышленных объектов

Л.Р. Абдуллина¹, В.С. Смирнов²¹Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва,
Российская Федерация
chechevitsa@ro.ru

Аннотация. Рассмотрены архитектура и функциональные особенности цифровых систем мониторинга энергопотребления, а также их роль в декарбонизации промышленного производства. Подчеркивается стратегическое значение цифровизации для формирования устойчивых бизнес-моделей, повышения ресурсной эффективности и выполнения климатических обязательств. Отмечается возможность интеграции цифровых систем мониторинга с корпоративными платформами управления (ERP, MES), что повышает полноту данных об энергопотреблении, обеспечивает их сопоставимость по производственным участкам и способствует формированию более точной нефинансовой отчетности. Особое внимание уделено связи между мониторингом энергетических потоков, управленческими решениями и снижением энергоемкости производственных процессов. Практическая часть представлена параметрическим сценарным анализом, позволяющим количественно оценить снижение выбросов CO₂ (Score 1 и Score 2) при различных уровнях оптимизации энергопотребления. Полученные результаты демонстрируют значимость цифрового мониторинга как инструмента декарбонизации, предварительной оценки экологического эффекта и повышения ресурсной эффективности производства.

Ключевые слова: цифровой мониторинг, декарбонизация, энергоэффективность, промышленность

Вклад авторов. Абдуллина Л.Р. — курирование данных, подготовка и написание черновика рукописи, визуализация, проведение исследования. Смирнов В.С. — концептуализация, разработка методологии исследования, работа с программным обеспечением

© Абдуллина Л.Р., Смирнов В.С., 2026

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

нием, валидация данных. *Абдуллина Л.Р., Смирнов В.С.* — написание, рецензирование и редактирование рукописи. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных. Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

История статьи: поступила в редакцию 23.09.2025; доработана после рецензирования 26.02.2026; принята к публикации 12.03.2026.

Для цитирования: *Абдуллина Л.Р., Смирнов В.С.* Оценка влияния цифровых систем мониторинга энергопотребления на снижение углеродного следа промышленных объектов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 3. С. 341–363. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-341-363> EDN: GOAOVW

Assessment of the impact of digital energy consumption monitoring systems on reducing the carbon footprint of industrial facilities

Leila R. Abdullina¹, Vladislav S. Smirnov²

¹*RUDN University, Moscow, Russian Federation*

²*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation*

chechevitsa@ro.ru

Abstract. The paper examines the architecture and functional features of digital energy consumption monitoring systems and their role in the decarbonization of industrial production. The strategic importance of digitalization for building sustainable business models, improving resource efficiency, and meeting climate commitments is emphasized. The possibility of integrating digital monitoring systems with corporate management platforms (ERP, MES) is noted, which enhances the completeness of energy consumption data, ensures its comparability across production sites, and contributes to the preparation of more accurate non-financial reporting. Particular attention is paid to the relationship between monitoring energy flows, managerial decision-making, and reducing the energy intensity of industrial processes. The practical component is presented as a parametric scenario analysis that enables a quantitative assessment of reductions in CO₂ emissions (Scope 1 and Scope 2) under different levels of energy consumption optimization. The results demonstrate the significance of digital monitoring as a tool for decarbonization, preliminary assessment of environmental effects, and improvement of the resource efficiency of production.

Keywords: digital monitoring, decarbonization, energy efficiency, industry

Authors' contribution. *L.R. Abdullina* — data curation, preparation and drafting of the manuscript writing, visualization, investigation. *V.S. Smirnov* — conceptualization, methodology, software, validation. *L.R. Abdullina, V.S. Smirnov* — writing, review and editing. All authors contributed equally to the preparation of this article, have read and approved the final version of the manuscript.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability. All data obtained during this study are included in the published article (and its supplementary files).

Article history: received 23.09.2025; revised 26.02.2026; accepted 12.03.2026.

For citation: Abdullina LR, Smirnov VS. Assessment of the impact of digital energy consumption monitoring systems on reducing the carbon footprint of industrial facilities. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(3):341–363. (In Russ.). <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-341-363> EDN: GOAOVW

Введение

В условиях усиления глобального перехода к устойчивому развитию (УР) проблема сокращения углеродного следа промышленных предприятий приобретает особую актуальность. Промышленный сектор остается одним из крупнейших источников выбросов CO₂, что требует внедрения инновационных подходов к управлению энергопотреблением. Одним из перспективных направлений является применение цифровых систем мониторинга (ЦСМ).

Актуальность темы подтверждается возрастающим числом исследований в данной области. Так, Г.И. Морзак, Н.В. Сидорская и С.С. Мартынюк (2025) предложили методологию поэтапного снижения углеродного следа для промышленных предприятий с использованием энергоаудита и цифрового мониторинга [1]. А. Байрамнелдиева с соавт. (2024) подчеркнули значимость зеленой экономики и внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в стратегии декарбонизации [2]. В свою очередь, J. Liu и Z. Zhang (2023) разработали интегрированную ЦСМ выбросов для «умных» городов, обеспечивающую визуализацию и прогнозирование данных в реальном времени [3]. Эти научные работы формируют теоретическую базу, однако их результаты преимущественно носят общий характер и недостаточно отражают количественные эффекты внедрения подобных систем на уровне конкретных промышленных объектов.

Цель исследования — оценка потенциального влияния внедрения ЦСМ энергопотребления на снижение выбросов CO₂ промышленных объектов по категориям Scope 1 и Scope 2 при фиксированных объемах производства.

Научная гипотеза состоит в том, что использование ЦСМ как инструмента энергоменеджмента способно обеспечить снижение выбросов CO_2 за счет уменьшения энергоемкости; ожидаемая величина эффекта зависит от степени использования результатов мониторинга в контуре управленческих решений и проявляется в виде количественно оцениваемого диапазона снижения выбросов в рамках параметрического сценарного моделирования.

Научная новизна исследования заключается в разработке воспроизводимой параметрической схемы, предназначенной для предварительной количественной оценки влияния цифрового мониторинга энергопотребления на снижение выбросов CO_2 на уровне промышленного объекта. В отличие от нормативных и корпоративных подходов (включая GHG Protocol, ISO 50001, CDP/GRI), ориентированных преимущественно на учет, верификацию и раскрытие показателей, предложенная схема решает иную прикладную задачу — раннюю количественную оценку диапазона возможного эффекта на этапе проектирования и обоснования внедрения, когда объектно-специфичные данные «до/после» и полные временные ряды телеметрии еще отсутствуют.

Практическая ценность схемы заключается в формализации перехода от уровня использования данных мониторинга в контуре энергоменеджмента к расчетному диапазону изменения энергоемкости и далее — к оценке выбросов Score 1 и Score 2 в единой логике, пригодной для последующей калибровки по данным конкретного предприятия.

Методы

В исследовании использован комплекс взаимодополняющих методов, обеспечивших оценку влияния ЦСМ энергопотребления. Анализ и синтез применялись для выявления закономерностей цифровизации энергомониторинга и процессов декарбонизации; индукция и дедукция — для формулирования научной гипотезы и построения логики исследования. Абстрагирование позволило выделить ключевые характеристики ЦСМ. В качестве эмпирического метода использовалось параметрическое сценарное моделирование, направленное на количественную оценку диапазона изменения энергопотребления и выбросов CO_2 по категориям Score 1 и Score 2 при фиксированных объемах производства и заданных коэффициентах эмиссии, с интерпретацией сценариев как уровней зрелости применения данных мониторинга в контуре энергоменеджмента.

В отличие от распространенных схем в настоящей работе сценарии трактуются не как произвольно заданные проценты экономии, а как последовательные уровни зрелости использования данных мониторинга: от оперативного реагирования на отклонения — к их аналитической интерпретации — и далее к интеграции показателей в планирование и управление режимами.

Результаты

Современные ЦСМ энергопотребления играют важную роль в повышении ресурсной эффективности и снижении углеродного следа промышленных предприятий. Их применение позволяет не только фиксировать фактическое энергопотребление в реальном времени, но и выявлять неэффективные участки, прогнозировать нагрузку на оборудование и формировать управленческие решения на основе достоверных данных. Развернутое теоретическое описание архитектуры и функциональных возможностей ЦСМ необходимо для корректной интерпретации расчетного блока исследования, поскольку именно эти характеристики определяют степень охвата измерений, регулярность контроля и возможность преобразования данных мониторинга в управленческие воздействия. В связи с этим обзорная часть используется как методологическое обоснование выбранных уровней зрелости энергоменеджмента и параметров сценарного анализа (5, 10, 15 %), применяемых для количественной оценки изменения выбросов Score 1 и Score 2. Комплексный подход к интеграции таких систем способствует переходу к доказательному управлению энергоресурсами, улучшению экологической отчетности и достижению целевых показателей декарбонизации.

Цифровые системы мониторинга энергопотребления: архитектура и функциональные особенности

По данным Международного энергетического агентства (IEA), в 2024 г. глобальные выбросы CO₂ от сжигания топлива и промышленных процессов выросли на 0,8 % и достигли 37,8 Гт, что подчеркивает сохраняющуюся тенденцию к высокому уровню антропогенной нагрузки¹. Промышленный сектор остается одним из ключевых источников этих выбросов, что делает необходимым внедрение инновационных подходов к управлению энергетическими потоками и повышению их эффективности.

Одним из перспективных направлений является применение **ЦСМ энергопотребления**. По данным Fortune Business Insights, объем мирового рынка систем мониторинга энергии в 2024 г. составил около 4,76 млрд США, что подтверждает устойчивый рост интереса к данным решениям и их стратегическую значимость для промышленности (рис. 1).

В целом ЦСМ энергопотребления представляют собой многоуровневые комплексы, обеспечивающие непрерывный контроль, сбор и анализ данных об энергетических потоках на промышленных объектах [4]. Они функционируют как единая экосистема, где каждый уровень выполняет свою роль в формировании информации об энергопотреблении. В архитектуру таких систем входят несколько ключевых компонентов (рис. 2).

¹ International Energy Agency / Global Energy Review 2025: CO₂ Emissions // Paris : IEA, 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/co2-emissions> (accessed: 13.10.2025).

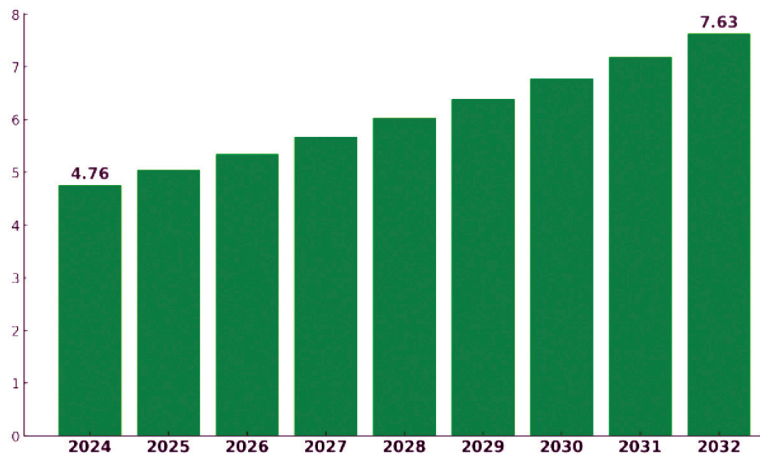


Рис. 1. Объем мирового рынка ЦСМ энергии, млрд долл. США
Источник: составлено Л.Р. Абдуллиной, В.С. Смирновым.

Figure 1. Global market volume of energy digital monitoring systems, billion USD
Source: compiled by L.R. Abdullina, V.S. Smirnov.

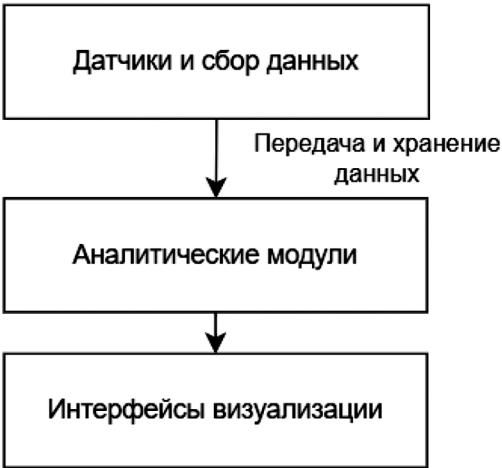


Рис. 2. Архитектура ЦСМ энергопотребления
Источник: составлено Л.Р. Абдуллиной, В.С. Смирновым.

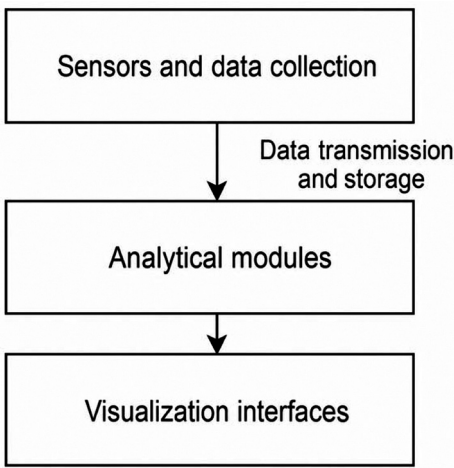


Figure 2. Architecture of energy consumption digital monitoring systems
Source: compiled by L.R. Abdullina, V.S. Smirnov.

Сбор данных в ЦСМ энергопотребления осуществляется интеллектуальными датчиками, фиксирующими ключевые параметры энергетического баланса предприятия (мощность, расход тепла, давление, температуру), с применением калиброванных устройств и цифровых интерфейсов (Modbus, BACnet, OPC UA) для обеспечения точности измерений. Информация передается по проводным и беспроводным каналам связи на шлюзы и контроллеры, где фильтруется и агрегируется, а затем сохраняется в SCADA-системах или облачных хранилищах для дальнейшего анализа. Обработка данных включает расчет показателей энергоэффективности, выявление аномалий и формирова-

ние рекомендаций по оптимизации, а применение методов машинного обучения позволяет прогнозировать нагрузку и предотвращать неэффективные режимы. Результаты визуализируются в дашбордах и отчетах, что облегчает интерпретацию и ускоряет управленческие решения.

Отметим, что ЦСМ энергопотребления имеют ряд специфических функциональных особенностей, определяющих их роль в промышленности и УР. С одной стороны, они обеспечивают высокую точность измерений, позволяют оперативно реагировать на неэффективные режимы работы оборудования и поддерживают интеграцию с корпоративными системами управления. С другой — внедрение подобных решений связано с определенными организационными и финансовыми барьерами, включая необходимость адаптации инфраструктуры, инвестиций в программное и аппаратное обеспечение, а также подготовки персонала (табл. 1).

Следует отметить, что ЦСМ энергопотребления формируют основу современного подхода к управлению энергетическими потоками на промышленных предприятиях. Несмотря на существующие барьеры (необходимость значительных инвестиций, модернизации инфраструктуры и подготовки персонала), такие системы демонстрируют высокий потенциал для дальнейшего развития и масштабирования. Их использование становится ключевым инструментом в стратегии декарбонизации промышленности и перехода к устойчивым моделям производства.

Таблица 1. Функциональные особенности ЦСМ энергопотребления

Критерий	Преимущества	Ограничения / недостатки
Точность и оперативность	Высокая точность измерений, доступ к данным в реальном времени, возможность быстрого реагирования на отклонения	Необходимость регулярной калибровки датчиков и технического обслуживания оборудования
Аналитические возможности	Автоматический расчет показателей энергоэффективности, прогнозирование потребления, выявление аномалий и оптимизация режимов	Сложность внедрения продвинутых аналитических модулей, потребность в квалифицированных специалистах по работе с данными
Интеграция с другими системами	Сопряжение с ERP и MES, единое информационное пространство, поддержка ESG-отчетности	Затраты на адаптацию и настройку интерфейсов интеграции, риски несовместимости с устаревшими системами
Экономическая эффективность	Снижение операционных затрат, предотвращение потерь энергии, повышение окупаемости энергосберегающих мероприятий	Высокие первоначальные инвестиции в оборудование, ПО и обучение персонала
Управленческие решения	Повышение прозрачности процессов, ускорение принятия решений, поддержка стратегического планирования и декарбонизации	Зависимость от качества исходных данных и стабильности коммуникационной инфраструктуры

Источник: составлено Л.Р. Абдуллиной, В.С. Смирновым по [5; 6].

Table 1. Functional features of energy consumption digital monitoring systems

Criterion	Advantages	Limitations / disadvantages
Accuracy and timeliness	High measurement accuracy, access to real-time data, and the ability to respond quickly to deviations	The need for regular sensor calibration and technical maintenance of equipment
Analytical capabilities	Automatic calculation of energy efficiency indicators, consumption forecasting, anomaly detection, and optimization of operating modes	Complexity of implementing advanced analytical modules and the need for qualified data specialists
Integration with other systems	Integration with ERP and MES, creation of a unified information environment, and support for ESG reporting	Costs of adapting and configuring integration interfaces, as well as risks of incompatibility with legacy systems
Economic efficiency	Reduction of operating costs, prevention of energy losses, and increased payback of energy-saving measures	High initial investments in equipment, software, and staff training
Managerial decision-making	Increased process transparency, faster decision-making, and support for strategic planning and decarbonization	Dependence on the quality of source data and the stability of communication infrastructure

Source: compiled by L.R. Abdullina, V.S. Smirnov based on [5; 6].

Роль цифрового мониторинга энергопотребления в декарбонизации промышленности

Цифровой мониторинг энергопотребления является одним из ключевых инструментов снижения углеродного следа промышленных предприятий и служит основой для перехода к управлению на основе данных. Внедрение ЦСМ позволяет не только фиксировать фактическое потребление ресурсов, но и оперативно выявлять неэффективные режимы работы оборудования, регистрировать аномальные скачки нагрузки и устранять энергетические потери [7]. Это повышает управляемость технологических процессов и приводит к сокращению избыточных выбросов, связанных с утечками энергоресурсов и нерегламентированными режимами эксплуатации.

Актуальность цифровизации подтверждается результатами исследования Deloitte (2024), охватившего 600 руководителей крупных производственных компаний в США. Более половины респондентов отметили, что уже применяют цифровые технологии для мониторинга энергопотребления (рис. 3) [8].

Полученные данные показывают, что предприятия рассматривают мониторинг не как вспомогательный инструмент, а как основу для системных изменений в области энергоэффективности. Такой подход обеспечивает основу для расчета углеродного следа по протоколам GHG и стандартам ISO 14064, а также для моделирования сценариев декарбонизации. Применение ЦСМ облегчает интеграцию с программами энергоэффективности и корпоративными инициативами по ESG, делая процесс снижения выбросов управляемым и воспроизводимым [8].

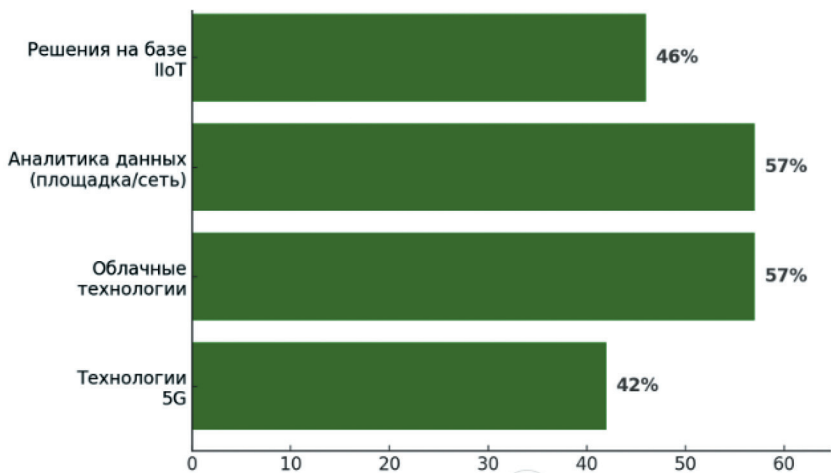


Рис. 3. Использование цифровых технологий мониторинга энергопотребления на производственных предприятиях, %

Источник: составлено Л.Р. Абдуллиной, В.С. Смирновым.

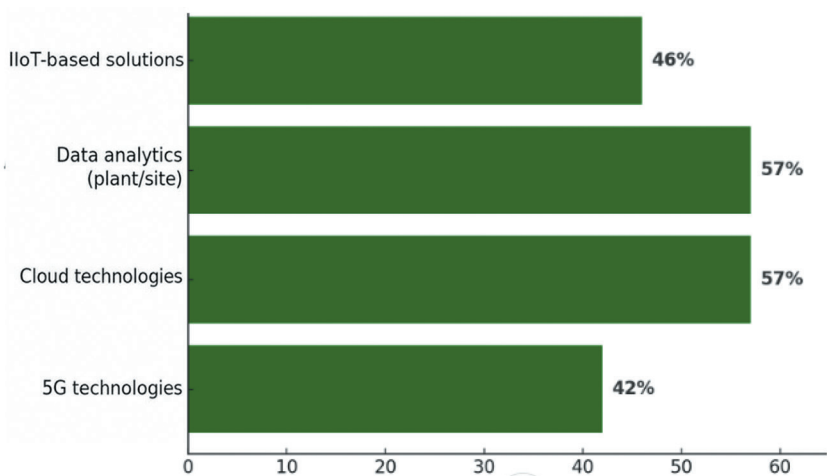


Figure 3. Use of digital technologies for energy consumption monitoring in industrial enterprises, %

Source: compiled by L.R. Abdullina, V.S. Smirnov.

Эмпирические исследования демонстрируют, что систематический мониторинг энергопотребления оказывает существенное влияние на показатели предприятий и целых отраслей. По оценкам IEA, реализация программ энергетического менеджмента, включающих цифровой мониторинг и контроль, позволяет добиться экономии энергии на уровне около 11 % в первые годы после внедрения, что напрямую способствует снижению углеродного следа и повышению общей энергоэффективности производства.

Экономическая значимость цифрового мониторинга энергопотребления также подтверждается анализом затрат: по данным IEA, электроэнергия может составлять до 50 % совокупных издержек предприятия (особенно в наиболее энергоемких отраслях, например в металлургии), поэтому даже незна-

чительное повышение энергоэффективности приводит к существенному росту финансовых результатов. Для компаний с низкой рентабельностью эффект особенно ощутим: при норме прибыли 5 % экономия 500 долл. США на электроэнергии эквивалентна дополнительным продажам на 10 000 долл. США. Таким образом, энергомониторинг становится не только экологическим, но и стратегическим экономическим инструментом.

Понимая эту взаимосвязь, Международная организация по стандартизации (ISO) разрабатывает стандарт ISO 50100, который должен объединить управление энергопотреблением и сокращение выбросов парниковых газов в единую систему. Публикация стандарта ожидается в 2026 г., и его внедрение станет важным шагом к формированию международной нормативной базы для поддержки программ декарбонизации.

**Влияние на экологическую отчетность и стратегию
УР компаний**

Как было сказано ранее, цифровой мониторинг энергопотребления играет важную роль в повышении качества нефинансовой отчетности, так как обеспечивает полноту, точность и актуальность данных, необходимых для расчета показателей по международным стандартам УР. Системы непрерывного измерения позволяют детализировать данные по площадкам и процессам, а также сокращать риск ошибок при пересчете выбросов парниковых газов. Это особенно важно для подготовки отчетов по GRI, CDP, SASB и IFRS S2, где требуется сопоставимость периодов и прозрачность методологии расчетов (табл. 2).

Таблица 2. Роль ЦСМ в повышении достоверности данных отчетов об энергопотреблении

Стандарт	Индикаторы	Роль ЦСМ
GRI (например, GRI 302 «Энергия», GRI 305 «Выбросы»)	Потребление энергии, энергоинтенсивность; выбросы ПГ Scope 1/2, интенсивность выбросов	Непрерывные измерения и автоагрегация; раздельный учет по площадкам/процессам; снижение ошибок
CDP (Climate Change Questionnaire)	Годовые выбросы Scope 1/2/3; структура энергопортфеля; метрики интенсивности; цели и прогресс	Автоматический сбор данных и трассируемость; формирование аудиторского следа; сопоставимость периодов и сценарное моделирование
ESG-отчетность (корпоративные нефинансовые отчеты)	KPI энергоэффективности и декарбонизации (энерго- и углеродоемкость, % ВИЭ, экономия энергии)	Доказательная база для KPI; регулярные дашборды; быстрая верификация и подготовка материалов для рейтингов
SASB/IFRS S2 (Climate-related Disclosures)	Отраслевые климатические и энерго-KPI (интенсивность выбросов на ед. продукции, энергоемкость процесса и т.п.)	Глубокая детализация на уровне процесса/единицы продукции; сопоставимость с отраслевыми бенчмарками

Источник: составлено Л.Р. Абдуллиной, В.С. Смирновым по [9; 10].

Table 2. The role of digital monitoring systems in improving the reliability of energy consumption reporting data

Standard	Indicators	Role of digital monitoring systems
GRI, for example GRI 302 «Energy», GRI 305 «Emissions»	Energy consumption, energy intensity; Scope 1/2 greenhouse gas emissions, emission intensity.	Continuous measurements and automatic aggregation; separate accounting by sites/processes; error reduction.
CDP, Climate Change Questionnaire	Annual Scope 1/2/3 emissions; energy portfolio structure; intensity metrics; targets and progress.	Automatic data collection and traceability; creation of an audit trail; comparability of reporting periods and scenario modeling.
ESG reporting, corporate non-financial reports	Energy efficiency and decarbonization KPIs: energy and carbon intensity, share of renewable energy sources, energy savings.	Evidence base for KPIs; regular dashboards; rapid verification and preparation of materials for ratings.
SASB/IFRS S2, Climate-related Disclosures	Sector-specific climate and energy KPIs: emissions intensity per unit of output, process energy intensity, etc.	Detailed breakdown at the process/unit-of-output level; comparability with sectoral benchmarks.

Source: compiled by L.R. Abdullina, V.S. Smirnov based on [9; 10].

Указанные стандарты и их индикаторы демонстрируют, что цифровой мониторинг является необходимым условием для формирования корректной и сопоставимой нефинансовой отчетности. Однако практическая ценность этих систем проявляется не только в улучшении качества раскрываемых данных, но и в их влиянии на стратегию УР компаний.

Одним из примеров успешного применения ЦСМ энергопотребления в промышленности является участие американских предприятий в программе **Better Plants**, реализуемой Министерством энергетики США. В рамках этой инициативы компании внедряют ЦСМ. Согласно данным, опубликованным в отчете Oak Ridge National Laboratory в 2024 г., участие в программе позволило предприятиям добиться существенного снижения энергопотребления и сопутствующих затрат (рис. 4).



Рис. 4. Основные результаты внедрения цифрового энергомониторинга компаниями-участниками Better Plants

Источник: составлено Л.Р. Абдуллиной, В.С. Смирновым.

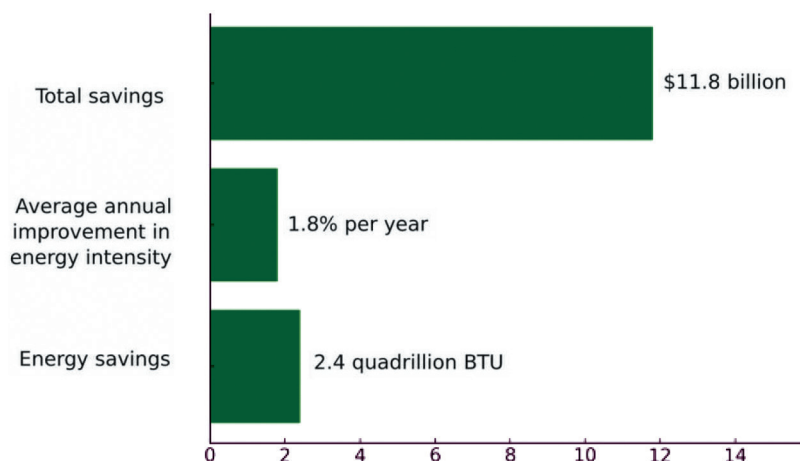


Figure 4. Main results of digital energy monitoring implementation by Better Plants participating companies

Source: compiled by L.R. Abdullina, V.S. Smirnov.

Кроме того, достигнутые результаты эквивалентны сокращению выбросов углекислого газа на 147 млн т CO₂. Полученный опыт показывает, что внедрение ЦСМ способствует системной модернизации производственных процессов и повышению энергоэффективности, а также формирует условия для достижения долгосрочных целей по снижению углеродного следа.

Еще одним примером является опыт **U.S. Steel**. В рамках стратегии декарбонизации компания создала подразделение Digital Studio, применяющее аналитику и методы ИИ для оптимизации процессов. Цифровые решения позволяют в реальном времени отслеживать энергопотребление, моделировать технологические цепочки и выявлять наиболее энергоемкие участки, что обеспечивает точную настройку доменных печей, повышение эффективности обработки и сокращение расхода сырья. Цифровой мониторинг способствовал снижению энергоемкости производства (рис. 5).

После внедрения цифровых решений на основе моделирования и прогнозной аналитики компания смогла добиться ощутимых улучшений: оптимизировать закупки сырья, снизить общее потребление энергии на всех производственных площадках и минимизировать углеродные выбросы. Например, подразделение USSK планирует сократить выбросы CO₂ на 90 000 т за счет модернизации оборудования, а объект BR1 достиг снижения интенсивности выбросов на 15 % по сравнению с 2021 г. Стратегическая цель компании — снижение интенсивности выбросов на 20 % к 2030 г. по сравнению с базовым уровнем 2018 г. — подтверждает комплексный подход к экологической ответственности и эффективности производства.

Таким образом, цифровой мониторинг энергопотребления перестает быть исключительно инструментом контроля и постепенно превращается в стратегический элемент корпоративного управления [11]. Его внедрение позволяет предприятиям не только обеспечивать достоверность и полноту ESG-отчетно-

сти, но и интегрировать цели по декарбонизации в операционное и инвестиционное планирование. Наличие прозрачной системы учета и анализа энергопотребления облегчает постановку амбициозных климатических целей, обоснование проектов модернизации и участие в международных инициативах по снижению выбросов.

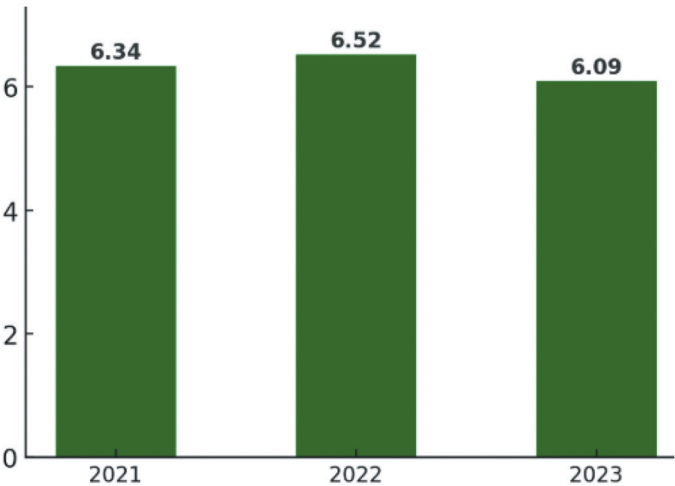


Рис. 5. Динамика энергоемкости производства стали в компании U.S. Steel, МВт·ч на тонну

Источник: составлено Л.Р. Абдуллиной, В.С. Смирновым.

Figure 5. Dynamics of energy intensity in steel production at U.S. Steel, MWh per ton

Source: compiled by L.R. Abdullina, V.S. Smirnov.

Сценарное моделирование влияния цифрового мониторинга на декарбонизацию предприятий

С целью количественной оценки потенциального диапазона изменения выбросов CO₂ при внедрении ЦСМ энергопотребления выполнено параметрическое сценарное моделирование, основанное на сопоставлении базового и оптимизированных режимов энергопотребления предприятия при фиксированных объемах производства. В качестве исходных данных использованы типовые показатели годового потребления электроэнергии и топлива, а также удельные коэффициенты эмиссии CO₂ для расчета выбросов Score 1 и Score 2 по методике GHG Protocol.

Для построения сценариев применен параметрический подход, предусматривающий три уровня сокращения энергопотребления, интерпретируемых как уровни организационно-технологической зрелости использования данных мониторинга в энергоменеджменте: консервативный (базовый мониторинг и регламентное реагирование), реалистичный (расширенная аналитика отклонений и регулярные корректирующие воздействия), амбициозный (встроенность мониторинга в контуры планирования и управления режимами).

Выбор реперных значений 5, 10 и 15 % обоснован эмпирическими диапазонами улучшения энергоемкости, зафиксированными в программах промышленной энергоэффективности и энергоменеджмента, а также в практиках внедрения цифрового мониторинга. Для международных инициатив и корпоративных кейсов характерны как умеренные, так и более выраженные улучшения энергетической результативности в зависимости от зрелости системы энергоменеджмента, глубины организационных изменений и степени интеграции мониторинговых данных в управленческие контуры.

Следует отметить, что диапазон 5–15 % в настоящей работе рассматривается как умеренно-консервативный ориентир для сценарной оценки эффекта цифрового мониторинга на этапе внедрения и развития энергоменеджмента. Верхняя граница 15 % отражает уровень, который может быть достигнут при более зрелом использовании данных мониторинга в контуре планирования и управления режимами, однако без моделирования глубокой технологической модернизации и без объектной каузальной верификации. В отдельных успешных практиках и программах энергоменеджмента могут фиксироваться и более высокие значения (вплоть до 20 % и выше), однако такие результаты, как правило, связаны с сочетанием цифрового мониторинга, организационных изменений и дополнительных технологических мероприятий. По этой причине в рамках настоящей статьи они не принимаются в качестве базового сценарного диапазона и рассматриваются как верхняя граница потенциального эффекта, требующая отдельной эмпирической проверки на данных конкретного предприятия.

Предлагаемая расчетная схема не предназначена для замены корпоративных систем учета и отчетности выбросов, реализуемых в рамках GHG Protocol, ISO 50001 и ESG-раскрытия, а дополняет их на этапе предварительного анализа. Ее назначение состоит в том, чтобы обеспечить воспроизводимую оценку диапазона потенциального эффекта цифрового мониторинга в условиях ограниченности исходных данных и до проведения объектно-ориентированной каузальной оценки.

Моделирование алгоритмов ЦСМ и их воздействия на конкретные технологические процессы не выполнялось, поскольку такая постановка требует объектно-специфичных данных телеметрии, параметров контуров управления и регламентов принятия решений.

Расчеты выполнены по формуле

$$\Delta CO_2 = (E_{\text{base}} - E_{\text{opt}}) \times EF, \quad (1)$$

где E_{base} и E_{opt} — энергопотребление соответствующего энергоресурса (электроэнергия или природный газ) в базовом и оптимизированном сценариях; EF — коэффициент эмиссии для данного энергоресурса. Расчет выполнялся отдельно для Score 2 (электроэнергия) и Score 1 (природный газ), после чего результаты суммировались.

Поскольку расчеты носят детерминированный характер и основаны на заданных предположениях, результаты интерпретируются как оценочный диапазон эффекта. Устойчивость выводов обсуждается с учетом чувствительности результатов к величине сценарного снижения энергопотребления и принятым коэффициентам эмиссии.

В качестве исходных данных для моделирования приняты:

- тип предприятия: среднее промышленное предприятие химико-металлургического профиля с численностью 500–700 сотрудников и непрерывным производственным циклом;
- годовое энергопотребление: 60 000 МВт·ч, включая 20 000 МВт·ч электроэнергии, 40 000 МВт·ч в пересчете на потребление природного газа;
- коэффициенты выбросов:
 - 0,40 т CO₂/МВт·ч для электроэнергии;
 - 0,202 т CO₂/МВт·ч для природного газа (по национальному кадастру и GHG Protocol);
- допущения: неизменность объемов производства, технологической структуры и коэффициентов эмиссии в расчетном периоде.

Параметры сценариев отражают эффект, который может быть достигнут за счет внедрения ЦСМ энергопотребления и связанных с ними инструментов аналитики и автоматизации управления. В результате становится возможным снизить фактическое энергопотребление и, как следствие, углеродный след предприятия.

В расчетах указанные значения применены одинаково к электроэнергии и природному газу, что соответствует трактовке сценариев как изменения энергоемкости при фиксированном выпуске продукции (табл. 3).

Результаты сценарного анализа показывают оценочный диапазон потенциального снижения совокупных выбросов CO₂ при заданных предположениях: порядка 5 % в консервативном сценарии, 10 % — в реалистичном и 15 % — в амбициозном. Полученные значения интерпретируются как диапазон эффекта при фиксированном выпуске продукции и неизменных коэффициентах эмиссии и предназначены для количественной калибровки возможного вклада ЦСМ в снижение Score 1 и Score 2 при различных уровнях зрелости энергоменеджмента. Строгая каузальная оценка эффекта внедрения ЦСМ требует объектно-специфичных данных «до/после» и/или квазиэкспериментального дизайна (например, сопоставимой контрольной группы), что выходит за рамки настоящей постановки и рассматривается как направление дальнейших исследований. Таким образом, цифровой мониторинг в рамках энергоменеджмента следует рассматривать как инструмент, потенциально повышающий эффективность управленческих воздействий на энергопотребление и позволяющий количественно оценивать вклад в снижение Score 1 и Score 2 при различных сценарных предположениях.

Таблица 3. Результаты сценарного моделирования влияния цифрового мониторинга на энергопотребление и углеродный след

Показатель	Базовый сценарий	Консервативный	Реалистичный	Амбициозный
Электроэнергия, МВт·ч/год	20 000	19 000	18 000	17 000
Природный газ, МВт·ч/год	40 000	38 000	36 000	34 000
Выбросы Scope 2, т CO	8 000,0	7 600,0	7 200,0	6 800,0
Выбросы Scope 1, т CO	8 080,0	7 676,0	7 272,0	6 868,0
Суммарные выбросы, т CO	16 080,0	15 276,0	14 472,0	13 668,0
Снижение к базе, %	–	–5	–10	–15

Источник: составлено Л.Р. Абдуллиной, В.С. Смирновым.

Table 3. Results of scenario modeling of the impact of digital monitoring on energy consumption and carbon footprint

Indicator	Baseline scenario	Conservative	Realistic	Ambitious
Electricity, MWh/year	20 000	19 000	18 000	17 000
Natural gas, MWh/year	40 000	38 000	36 000	34 000
Scope 2 emissions, t CO	8 000.0	7 600.0	7 200.0	6 800.0
Scope 1 emissions, t CO	8 080.0	7 676.0	7 272.0	6 868.0
Total emissions, t CO	16 080.0	15 276.0	14 472.0	13 668.0
Reduction compared to baseline, %	–	–5	–10	–15

Source: compiled by L.R. Abdullina, V.S. Smirnov.

В дополнение к базовому сценарию выполнен простой анализ чувствительности результатов к изменению коэффициентов эмиссии, поскольку их выбор влияет на абсолютные значения рассчитываемых выбросов CO₂ (табл. 4). Для проверки устойчивости выводов в модели рассмотрено варьирование коэффициентов эмиссии для электроэнергии и природного газа в диапазоне $\pm 20\%$ относительно базовых значений при сохранении остальных расчетных предпосылок.

Таблица 4. Анализ чувствительности результатов сценарного моделирования к изменению коэффициентов эмиссии ($\pm 20\%$)

Сценарий	Коэффициенты эмиссии -20% , т CO ₂	Базовые коэффициенты эмиссии, т CO ₂	Коэффициенты эмиссии $+20\%$, т CO ₂
Базовый	12 864,0	16 080,0	19 296,0
Консервативный (-5%)	12 220,8	15 276,0	18 331,2
Реалистичный (-10%)	11 577,6	14 472,0	17 366,4
Амбициозный (-15%)	10 934,4	13 668,0	16 401,6

Источник: составлено Л.Р. Абдуллиной, В.С. Смирновым.

Table 4. Sensitivity analysis of scenario modeling results to changes in emission factors ($\pm 20\%$)

Scenario	Emission factors –20%, t CO ₂	Baseline emission factors, t CO ₂	Emission factors +20%, t CO ₂
Baseline	12 864.0	16 080.0	19 296.0
Conservative (–5%)	12 220.8	15 276.0	18 331.2
Realistic (–10%)	11 577.6	14 472.0	17 366.4
Ambitious (–15%)	10 934.4	13 668.0	16 401.6

Source: compiled by L.R. Abdullina, V.S. Smirnov.

Результаты анализа чувствительности показывают, что при изменении коэффициентов эмиссии на $\pm 20\%$ изменяется абсолютный уровень рассчитанных выбросов CO₂, однако относительные различия между сценариями сохраняются. Это подтверждает устойчивость качественных выводов исследования в рамках принятой линейной постановки модели.

Обсуждение

Полученные результаты сценарного анализа свидетельствуют о потенциальной значимости ЦСМ энергопотребления как инструмента декарбонизации промышленности. Показано, что в рамках сценарной постановки внедрение ЦСМ может способствовать снижению энергопотребления при условии интеграции мониторинговых данных в контур энергоменеджмента. Этот вывод согласуется с результатами международных исследований, подчеркивающих роль энергоуправления и цифровизации в достижении климатических целей [12–14].

При этом предложенная в работе схема не конкурирует с типовыми подходами IEA, ISO 50001, GHG Protocol, а также с корпоративными практиками CDP/GRI, поскольку указанные рамки выполняют преимущественно нормативно-учетную и отчетную функции. Отличительной особенностью предложенного подхода является включение уровня зрелости использования данных мониторинга в контуре энергоменеджмента в расчетную схему, что позволяет на раннем этапе получить количественный диапазон ожидаемого эффекта в терминах Score 1 и Score 2 при фиксированных производственных предположениях. Иными словами, схема ориентирована не на верификацию уже достигнутых результатов, а на предварительное обоснование и сценарное сопоставление ожидаемого эффекта цифрового мониторинга до формирования полного контура измерений и накопления объектной статистики.

Устойчивость выводов к выбору диапазона снижения энергоемкости оценивается в рамках линейной постановки модели. При использовании принятого в работе интервала 5–15 % изменяется прежде всего абсолютная величина эффекта, масштабируемая пропорционально заданному снижению, тогда как направленность результата и принципы отдельной интерпретации вкла-

дов Score 1 и Score 2 сохраняются при фиксированных коэффициентах эмиссии и структуре энергобаланса. Следовательно, ключевые выводы устойчивы по смыслу, а уточнение конкретных границ диапазона следует рассматривать как параметр, подлежащий последующей калибровке по отраслевой эмпирике и данным предприятия.

В рамках настоящего исследования выполнен простой анализ чувствительности к изменению коэффициентов эмиссии ($\pm 20\%$), что позволило оценить устойчивость расчетных выводов при варьировании ключевых эмиссионных предпосылок. Вместе с тем расширенный анализ чувствительности к структуре энергобаланса, сезонности и загрузке производства не проводился, поскольку цель исследования заключалась в описании воспроизводимой параметрической схемы и демонстрации логики перехода от данных мониторинга к оценке эффекта в терминах выбросов при фиксированных производственных предпосылках. Включение сезонных колебаний и изменения загрузки требует объектно-специфичных временных рядов телеметрии и нормализации по выпуску, что выходит за рамки выбранной сценарной постановки. При практическом применении модели абсолютные значения сокращения выбросов следует трактовать как зависящие от принятых коэффициентов эмиссии, структуры энергопотребления и выбранного диапазона экономии. Проведение расширенного анализа чувствительности по указанным параметрам рассматривается как естественное направление дальнейшей калибровки модели для условий конкретного предприятия.

Результаты сценарного анализа целесообразно сопоставить с опубликованными кейсами внедрения энергоменеджмента, основанного на регулярном мониторинге и контроле показателей. Так, в материалах U.S. Department of Energy представлен опыт компании 3M: по пяти производственным площадкам в США за трехлетний период внедрения и развития энергоменеджмента зафиксированы среднее повышение энергетической результативности на 7,7 %, ежегодная экономия затрат на энергоресурсы около 2,4 млн долл. США и сокращение выбросов на 94 800 т CO₂.

Еще одним примером является кейс международной компании Saudi Methanol Company (AR-RAZI) — крупного производителя метанола (природный газ как сырье и топливо). На предприятии была внедрена система энергоменеджмента, а для поддержки управленческого цикла разработана цифровая панель Energy management Dashboard, предназначенная для мониторинга, анализа и отчетности по показателям энергоэффективности и для планирования корректирующих действий по выявленным отклонениям. Согласно отчетам компании, это позволило сократить энергопотребление на 152 232,55 МВт·ч и снизить выбросы примерно на 38 000 т CO₂; экономический эффект составил 2 353 629,48 долл. США при стоимости внедрения системы энергоменеджмента 72 444,44 долл. США. Для оценки эффекта сопоставлялись базовый

период 2022 г. (12 последовательных месяцев с января) и отчетный период 2023 г. (12 последовательных месяцев) после реализации мероприятий.

В качестве иллюстрации применимости полученных выводов к условиям российских промышленных предприятий можно привести пример ПАО «Татнефть», где в рамках развития системы энергоменеджмента (ISO 50001) реализован пилотный цифровой проект автоматизированной системы «Энергопортал», включающий модули мониторинга исполнения мероприятий по энергосбережению, планирования потребления ТЭР, формирования энергобаланса и почасового планирования потребления. Согласно опубликованным материалам компании, в 2022–2024 гг. в рамках технического энергоаудита было обследовано 146 объектов и сформировано 265 рекомендаций с потенциалом экономии 8708 т условного топлива. Применение цифровых инструментов почасового планирования потребления обеспечило рост экономического эффекта с 37,7 млн руб. в 2022 г. до 41,5 млн руб. в 2023 г., при этом доля потребления, охваченная управляемой корректировкой графиков нагрузки, составила 2,2 % в 2023 г. и 3,33 % за 9 месяцев 2024 г.

Еще одним примером внедрения энергоменеджмента, основанного на регулярном мониторинге и контроле показателей энергопотребления, является практика ПАО «Уралкалий». В официальном ESG-отчете компании за 2024 г. показано, что при росте абсолютного энергопотребления вследствие увеличения объемов производства удельное энергопотребление снизилось на 12 % по сравнению с 2023 г. и составило 1,895 ГДж/т продукции. При этом зафиксировано сбережение топливно-энергетических ресурсов в объеме 298 713 ГДж. Одновременно удельные выбросы парниковых газов (Scope 1 и Scope 2) сократились до 0,134 т CO₂-экв./т продукции, что также соответствует снижению на 12 % к предыдущему году. В отчете указывается, что данные улучшения достигнуты в рамках реализации системы энергетического менеджмента и программ повышения энергоэффективности, включающих автоматизированный учет и мониторинг энергоресурсов, анализ режимов работы оборудования и мероприятия по снижению потерь энергии. Представленные показатели демонстрируют, что системное использование инструментов мониторинга и управленческого контроля позволяет достигать количественно фиксируемого снижения энергоемкости и связанных с ней выбросов.

Приведенные примеры подтверждают, что внедрение ЦСМ и интеграция мониторинговых показателей в контур энергоменеджмента обеспечивают количественно фиксируемый эффект в виде снижения энергопотребления и затрат, а в ряде кейсов — также сокращения выбросов. Тем самым подтверждается практическая применимость принятой в работе логики «мониторинг — управленческие решения — эффект в терминах Scope 1 и Scope 2».

Особое значение цифровые решения приобретают в контексте международных требований к нефинансовой отчетности. Точность данных о потреб-

лении энергии и выбросах, обеспечиваемая цифровыми системами, позволяет компаниям формировать достоверные ESG-отчеты, соответствующие стандартам GRI, CDP и IFRS S2. Это повышает прозрачность деятельности предприятий, снижает регуляторные риски и укрепляет доверие со стороны инвесторов и партнеров.

Экономический эффект применения ЦСМ также заслуживает внимания: снижение затрат на энергоресурсы повышает рентабельность производства и формирует основу для интеграции стратегий декарбонизации в бизнес-модели. В долгосрочной перспективе такие решения позволяют предприятиям адаптироваться к ужесточению климатического регулирования, выполнять международные обязательства и повышать устойчивость к рыночным и экологическим рискам.

Ограничением предложенной расчетной схемы является линейная связь между снижением энергопотребления и уменьшением выбросов при фиксированном выпуске и неизменных коэффициентах эмиссии. В реальных условиях при существенных уровнях экономии возможна нелинейность эффекта вследствие изменения структуры энергобаланса (например, замещения топлива электроэнергией или изменения доли собственных источников), возникновения компенсирующего роста энергопотребления, обусловленного увеличением выпуска или загрузки на фоне снижения удельных энергетических затрат, а также влияния сезонности и загрузки производства на энергоемкость. Указанные эффекты не включены в исследование, поскольку работа ориентирована на воспроизводимую параметризацию эффекта на основе агрегированных показателей энергопотребления и не предполагает каузальной идентификации на временных рядах объекта.

Заключение

В целом ЦСМ энергопотребления представляют собой эффективный инструмент повышения прозрачности и управляемости энергетических процессов на промышленных предприятиях. Их внедрение обеспечивает формирование достоверной базы данных для анализа энергоэффективности, расчета выбросов CO₂ и принятия решений по их снижению. Интеграция мониторинга с производственными и управленческими системами позволяет оптимизировать режимы работы оборудования и повысить ресурсную эффективность.

Сценарное моделирование показало потенциал цифровых решений для системного снижения углеродного следа предприятий и достижения климатических целей. Применение такого подхода создает основу для стратегического планирования мероприятий по декарбонизации, оценки их результативности и подготовки отчетности в соответствии с международными стандартами.

Список литературы

- [1] Морзак Г.И., Сидорская Н.В., Мартынюк С.С. Методология снижения углеродного следа для предприятий // Вестник Брестского государственного технического университета. 2025. № 1 (136). С. 159–164. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2025-136-1-159-164> EDN: ICKLFM
- [2] Байрамнельдиева А., Мыратгельдиева А., Бабамырадова А. Влияние зеленой экономики на снижение углеродного следа // Вестник науки. 2024. Т. 1. № 5 (74). С. 13–15. EDN: SFSDUC
- [3] Liu J., Zhang Z. Integrated energy carbon emission monitoring and digital management system for smart cities // Frontiers in Energy Research. 2023. Vol. 11. Article no. 1221345. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1221345> EDN: THVASX
- [4] Сайфуллин А.Б. Цифровые технологии в энергетике // Актуальные проблемы общества, экономики и права в контексте глобальных вызовов : сб. материалов XI Международной науч.-практ. конф. Москва, 2 июня 2022 года / редкол.: Л.К. Гуриева [и др.]. Москва : ООО «ИРОК», 2022. С. 19–23. EDN: MVVWKH
- [5] Stepanov M. Digitalization of adjustment and maintenance processes for optimizing energy consumption in the oil and gas sector // Bulletin of Science and Practice. 2024. Vol. 10. No. 11. P. 126–132. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/108/16> EDN: HJNAYP
- [6] Pandey V., Sircar A., Bist N., Solanki K., Yadav K. Accelerating the renewable energy sector through Industry 4.0: Optimization opportunities in the digital revolution // International Journal of Innovation Studies. 2023. Vol. 7. No. 2. P. 171–188. <https://doi.org/10.1016/j.ijis.2023.03.003> EDN: UZEEHW
- [7] Степанов М.Е., Пишченко Д.В., Сафронов Д.С., Колганов Д.И. Экономическая эффективность интеллектуальных систем электропривода в добывающей промышленности // Экономический вестник. 2024. Т. 3. № 6. P. 23–31. EDN: ZSMZBE
- [8] Gaus T., Schlotterbeck M. 2025 Smart manufacturing and operations survey: navigating challenges to implementation // Deloitte Insights. 2025. URL: <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/manufacturing-industrial-products/2025-smart-manufacturing-survey.html> (accessed: 13.10.2025).
- [9] Eshbayev O., Xursandov K., Pulatovna Kh. U., Sitara A., Jamalova G. Advancing green technology systems through digital economy innovations: a study on sustainable // E3S Web of Conferences. EDP Sciences. 2024. Vol. 576. Article no. 02009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202457602009> EDN: AVTJMM
- [10] Жданова Н.Г., Садыкина Р.А. Практические аспекты технологий устойчивого развития промышленных предприятий // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2025. № 1 (51). P. 130–138. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-130-138](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-130-138) EDN: DAVAJV
- [11] Yarov Yu. Digital technologies for monitoring and managing construction projects // Norwegian Journal of development of the International Science. 2025. No. 149. P. 80–83. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14766578> EDN: GSSZSC
- [12] Umarov E. Environmental impact indicators in industrial enterprises // Nordic Studies in Academic Research. 2024. Vol. 3. № 0003.
- [13] Dzwigol H., Kwilinski A., Lyulyov O., Pimonenko T. Digitalization and energy in attaining sustainable development: impact on energy consumption, energy structure, and energy intensity // Energies. 2024. Vol. 17. Iss. 5. Article no. 1213. <https://doi.org/10.3390/en17051213> EDN: GEZJRY

- [14] Dekeyrel S., Fessler M. Digitalisation: an enabler for the clean energy transition // *Journal of Energy & Natural Resources Law*. 2024. Vol. 42. Iss. 2. P. 185–209. <https://doi.org/10.1080/02646811.2023.2254103> EDN: CSLOHH

References

- [1] Morzak GI, Sidorskaya NV, Martynyuk SS. Methodology for reducing carbon footprint for enterprises. *Vestnik of Brest State Technical University*. 2025;(1):159–164. (In Russ.). <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2025-136-1-159-164> EDN: ICKLFM
- [2] Bayramneldieva A, Myratgeldieva A, Babamyradova A. The impact of a green economy on reducing carbon. *Bulletin of Science*. 2024;1(5):13–15. (In Russ.). EDN: SFSDUC
- [3] Liu J, Zhang Z. Integrated energy carbon emission monitoring and digital management system for smart cities. *Frontiers in Energy Research*. 2023;(11):1221345. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1221345> EDN: THVASX
- [4] Saifullin AB. Digital technologies in energy. *Current Problems of Society, Economics and Law in the Context of Global Challenges. Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference. Moscow, June 2, 2022*. L.K. Guriev (ed.) et al. Moscow : LLC “IROK”; 2022. p. 19–23. (In Russ.). EDN: MVVWKH
- [5] Stepanov M. Digitalization of adjustment and maintenance processes for optimizing energy consumption in the oil and gas sector. *Bulletin of Science and Practice*. 2024;10(11):126–132. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/108/16> EDN: HJNAYP
- [6] Pandey V, Sircar A, Bist N, Solanki K, Yadav K. Accelerating the renewable energy sector through Industry 4.0: Optimization opportunities in the digital revolution. *International Journal of Innovation Studies*. 2023;7(2):171–188. <https://doi.org/10.1016/j.ijis.2023.03.003> EDN: UZEEHW
- [7] Stepanov ME, Pshichenko DV, Safronov DS, Kolganov DI. Economic efficiency of intelligent drive systems in the mining industry. *Economic Bulletin*. 2024;3(6):23–31. (In Russ.). EDN: ZSMZBE
- [8] Gaus T., Schlotterbeck M. 2025 Smart manufacturing and operations survey: navigating challenges to implementation. *Deloitte Insights*. 2025. Available from: <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/manufacturing-industrial-products/2025-smart-manufacturing-survey.html> (accessed: 13.10.2025).
- [9] Eshbayev O, Xursandov K, Pulatovna KhU., Sitora A, Jamalova G. Advancing green technology systems through digital economy innovations: a study on sustainable. *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*. 2024;(576):02009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202457602009> EDN: AVTJMM
- [10] Zhdanova N, Sadykina R. Practical aspects of sustainable industrial development technologies. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;(1):130–138. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-130-138](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-130-138) EDN: DAVAJV
- [11] Yarov Y. Digital technologies for monitoring and managing construction projects. *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2025;(149):80–83. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14766578> EDN: GSSZSC
- [12] Umarov E. Environmental impact indicators in industrial enterprises. *Nordic Studies in Academic Research*. 2024;3(0003).
- [13] Dzwigol H, Kwilinski A, Lyulyov O, Pimonenko T. Digitalization and energy in attaining sustainable development: impact on energy consumption, energy structure, and energy intensity. *Energies*. 2024;17(5):1213. <https://doi.org/10.3390/en17051213> EDN: GEZJRY

- [14] Dekeyrel S, Fessler M. Digitalisation: an enabler for the clean energy transition. *Journal of Energy & Natural Resources Law*. 2024;42(2):185–209. <https://doi.org/10.1080/02646811.2023.2254103> EDN: CSLOHH

Сведения об авторах:

Абдуллина Лейла Реналевна, магистр, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0002-1855-7339; eLIBRARY SPIN-код: 7569-4701. E-mail: chechevitsa@ro.ru

Смирнов Владислав Сергеевич, магистр, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1. ORCID: 0009-0008-5003-1282; eLIBRARY SPIN-код: 4638-6788. E-mail: svsl9ea324@student.bmstu.ru

Bio notes:

Leila R. Abdullina, master's degree, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-1855-7339; eLIBRARY SPIN-code: 7569-4701. E-mail: chechevitsa@ro.ru

Vladislav S. Smirnov, master's degree, Bauman Moscow State Technical University, 5/1 2 Baumanskaya St, Moscow, 105005, Russian Federation. ORCID: 0009-0008-5003-1282; eLIBRARY SPIN-code: 4638-6788. E-mail: svsl9ea324@student.bmstu.ru

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-3-364-375

EDN: FNCQWC

УДК 621.355.2:658.382.3

Научная статья / Research article

Оценка производственных факторов при изготовлении литий-ионных аккумуляторов на примере оборудования фирмы Gelon LIB

Р.Г. Ахтямов¹, А.В. Шиховцева², Л.Е. Калугин²,
Е.Ю. Евщик²✉

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора
Александра I, Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии
Российской академии наук, Черноголовка, Российская Федерация
✉liza@icp.ac.ru

Аннотация. Производство литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) сопряжено с комплексом опасных факторов на всех технологических этапах. Существующие исследования часто фрагментарны и не предлагают целостной системы управления рисками, что актуализирует разработку комплексного подхода к обеспечению безопасности и эффективности. Цель исследования — системный анализ производственных рисков на всех этапах изготовления ЛИА, а также разработка практических рекомендаций по созданию эффективной системы безопасности, включающей технические, организационные и кадровые аспекты. Исследование основано на системном анализе технологического процесса производства ЛИА. Используются методы анализа рисков, сравнительная оценка ручных и автоматизированных операций, анализ технических характеристик специализированного оборудования. Результаты структурированы в виде детализированных таблиц оценки рисков для каждого этапа. Выявлены и ранжированы ключевые опасности: токсичность химических компонентов (особенно электролита на основе LiPF_6), пожарно-взрывные риски, воздействие наночастиц и механические травмы. Установлено, что наиболее опасными являются операции с электролитом, ультразвуковой сваркой и сушкой. Доказано значительное снижение риска травматизма и производственного брака при переходе от ручной к автоматизированной сборке. Разработаны и систематизированы конкретные защитные меры: инженерные решения (вентиляция, блокировки), требования к СИЗ, параметры микроклимата, программы обучения и необходимость внедрения систем реального времени. Предложен целостный, поэтапный подход к управлению рисками в производстве ЛИА. Основной вывод заключается в том, что безопасность и экономическая эффективность достигаются через системную комбинацию максимальной автоматизации критических операций, внедрения многоуровневого мониторинга и комплексной защиты персонала. Представленные рекомендации формируют готовую основу для проектирования безопасных производственных линий.

© Ахтямов Р.Г., Шиховцева А.В., Калугин Л.Е., Евщик Е.Ю., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Ключевые слова: производственные риски; автоматизация производства; охрана труда; токсикология

Вклад авторов. Ахтямов Р.Г. — концептуализация, разработка методологии исследования, написание рукописи. Шиховцева А.В., Калугин Л.Е. — курирование данных, написание и подготовка черновика рукописи. Евицки Е.Ю. — администрирование данных, научное руководство исследованием, написание рукописи. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Финансирование. Работа выполнена в соответствии с государственными заданиями Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии РАН № 125033104607-0 (изготовление электродной смеси и электродов) и № 124013000692-4 (сборка батарей и аккумуляторов).

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных. Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

История статьи: поступила в редакцию 09.12.2025; доработана после рецензирования 20.01.2026; принята к публикации 05.02.2026.

Для цитирования: Ахтямов Р.Г., Шиховцева А.В., Калугин Л.Е., Евицки Е.Ю. Оценка производственных факторов при изготовлении литий-ионных аккумуляторов на примере оборудования фирмы Gelon LIB // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 3. С. 364–375. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-364-375> EDN: FNCQWC

Assessment of production factors in the manufacturing of lithium-ion batteries: case study of Gelon LIB equipment

Rasul G. Akhtyamov¹, Anna V. Shikhovtseva², Leonid E. Kalugin²,
Elizaveta Yu. Evshchik²✉

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russian Federation

²Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russian Federation
✉liza@icp.ac.ru

Abstract. The production of lithium-ion batteries (LIBs) is associated with a complex of hazardous factors at all technological stages. Existing studies are often fragmented and do not offer a holistic risk management system, which highlights the need to develop a comprehensive approach to ensuring safety and efficiency. The aim of this work is a systematic analysis of production risks at all stages of LIB manufacturing and the development of practical recommendations for creating an effective safety system, including technical, organizational,

and personnel aspects. The research is based on a systematic analysis of the LIB production technological process. Methods of risk analysis, comparative assessment of manual and automated operations, and analysis of the technical characteristics of specialized equipment were used. The results are structured in the form of detailed risk assessment tables for each stage. Key hazards were identified and ranked: toxicity of chemical components (especially LiPF₆-based electrolyte), fire and explosion risks, nanoparticle exposure, and mechanical injuries. It has been established that the most hazardous operations involve the electrolyte, ultrasonic welding, and drying. A significant reduction in the risk of injuries and production defects during the transition from manual to automated assembly has been proven. Specific protective measures have been developed and systematized: engineering solutions (ventilation, interlocks), personal protective equipment (PPE) requirements, microclimate parameters, training programs, and the need for real-time monitoring systems. This article proposes a holistic, step-by-step approach to risk management in LIB production. The main conclusion is that safety and economic efficiency are achieved through a systematic combination of maximum automation of critical operations, implementation of multi-level monitoring, and comprehensive personnel protection. The presented recommendations form a ready-made basis for designing safe production lines.

Keywords: production risks; automation of production; labor protection; toxicology

Authors' contribution. *R.G. Akhtyamov* — conceptualization, research methodology development, manuscript writing. *A.V. Shikhovtseva, L.E. Kalugin* — data curation, writing — original draft preparation. *E.Yu. Evshchik* — data administration, scientific supervision of the research, manuscript writing. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Funding. The work was carried out in accordance with the state assignments of the Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry of the Russian Academy of Sciences No. 125033104607-0 (manufacture of electrode mixture and electrodes) and No. 124013000692-4 (assembly of cells and batteries).

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article

Data availability. All data obtained during this study are included in the published article.

Article history: received 09.12.2025; revised 20.01.2026; accepted 05.02.2026.

For citation: Akhtyamov RG, Shikhovtseva AV, Kalugin LE, Evshchik EYu. Assessment of production factors in the manufacturing of lithium-ion batteries: case study of Gelon LIB equipment. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(3):364–375. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-364-375> EDN: FNCQWC

Введение

Современные литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) являются ключевым компонентом энергетических систем нового поколения [1]. Оптимизация процесса производства ЛИА с точки зрения безопасности [4], экономической целесообразности [5] и экологической устойчивости [6] имеет особое значение, требуя всестороннего и детального анализа каждого этапа [7]. Производство ЛИА представляет собой многостадийный процесс, сопряженный с рисками: химической опасности компонентов, пожаро- и взрывоопасности, механиче-

ских травм, воздействия наночастиц [4; 8–13]. Существующие исследования часто фрагментарны и не предлагают целостной системы управления рисками на всех технологических этапах [14–19]. Особую значимость приобретает внедрение автоматизации для минимизации человеческого фактора [20].

Однако предлагаемые в большинстве существующих работах подходы часто сосредоточены либо на ограниченном перечне технологических этапов [4; 8–13], либо на отдельных аспектах безопасности [14–19], без интеграции в единую многоуровневую систему управления. В [21] описывается система управления рисками на всех технологических этапах, но она не включает в себя подробный анализ каждой стадии производства литий-ионного аккумулятора с учетом всех возможных факторов риска. Таким образом, в отличие от опубликованных работ, настоящее исследование предлагает сквозной поэтапный анализ всей технологической цепочки, что позволяет выявить взаимосвязи между рисками на разных стадиях и разработать меры по их минимизации. Таким образом, данная работа восполняет пробел, существующий между фрагментарными оценками опасностей и комплексной системой управления рисками, пригодной для непосредственного внедрения в реальных условиях аккумуляторного производства.

Цель исследования — комплексный анализ производственных рисков на всех этапах изготовления ЛИА и разработка практических рекомендаций по созданию эффективной системы безопасности.

Методы исследования

Методология основана на системном анализе технологического процесса производства ЛИА. Используются методы анализа рисков, сравнительная оценка ручных и автоматизированных операций, анализ технических характеристик специализированного оборудования на примере оборудования фирмы Gelon LIB. Технологический процесс включал ключевые этапы: приготовление электродных смесей, изготовление электрода, сборку стека и аккумулятора. Подробное описание этапов производства ЛИА представлено в дополнительных материалах.

Результаты

Наибольшую опасность на этапе приготовления электродной смеси представляют пылевые и химические факторы, а также риск механического травмирования (табл. 1).

По результатам оценки разработаны меры снижения риска, включающие системы местной вентиляции, СИЗ (респираторы FFP2/FFP3, химически стойкие перчатки), заземление, блокировки, контроль параметров. В целях обеспечения безопасных условий труда необходимы строгое соблюдение мер индивидуальной и коллективной защиты, контроль параметров производ-

ственной среды и регулярное обучение персонала. Внедрение предложенных рекомендаций позволит минимизировать профессиональные риски, снизить вероятность аварийных ситуаций и обеспечить стабильное качество выпускаемой продукции.

Таблица 1. Приготовление электродной смеси: результаты оценки производственных факторов и мер по снижению риска

Фактор риска	Источник	Возможные последствия	Меры снижения риска
<i>Взвешивание компонентов (весы)</i>			
Запыленность воздуха	Графит, ацетиленовая сажа, смешанные оксиды лития	Раздражение дыхательных путей, риск взрыва (сажа)	Использование вытяжной вентиляции, средства индивидуальной защиты (респиратор, перчатки)
Контакт с кожей	Карбоксиметилцеллюлоза, стирол-бутадиеновая резина, поливинилиденфторид, N-метилпирролидон	Раздражение кожи, аллергические реакции	Применение спецодежды, перчаток
Статическое электричество	Сухие порошки (графит, сажа)	Искрообразование, риск возгорания	Заземление оборудования, антистатическая обработка
<i>Загрузка компонентов в миксер (планетарный вакуумный миксер GN-PM-5L)</i>			
Механическая травма	Работа с миксером	Защемление, попадание рук в движущиеся части	Блокировка крышки при работе, обучение, инструктажи
Выброс пыли	Засыпка сухих компонентов	Загрязнение воздуха, взрывоопасность	Вакуумное пылеудаление, местная вентиляция
<i>Перемешивание в течение нескольких часов</i>			
Шум	Работа миксера	Нарушение слуха при длительном воздействии	Использование шумозащитных наушников
Вибрация	Движение механизмов миксера	Дискомфорт, усталость оператора	Контроль состояния оборудования, виброизоляция
Нагрев смеси	Трение компонентов	Изменение свойств реагентов, риск перегрева	Контроль температуры, ограничение времени смешивания
<i>Контроль вязкости электродной смеси (вискозиметр)</i>			
Контакт с химикатами	Пробы смеси	Раздражение кожи и/или слизистых	Использование перчаток, очков
Ошибки измерения	Неправильная калибровка	Брак продукции	Регулярная поверка оборудования

Источник: составлено Р.Г. Ахтямовым, А.В. Шиховцевой, Л.Е. Калугиным, Е.Ю. Евщик.

На этапе изготовления электродов наибольшую угрозу представляют механические травмы от вальцов и режущих устройств, термические ожоги при сушке (~120 °С), воздействие испарений растворителей (табл. 2). Предложенные ключевые меры защиты включают в себя защитные ограждения и блокировки, вытяжную вентиляцию, термостойкие перчатки и респираторы FFP3, виброизоляцию.

Таблица 2. Изготовление электродов: результаты оценки производственных факторов и мер по снижению риска

Фактор риска	Источник	Возможные последствия	Меры снижения риска
<i>Установка рулона фольги в машину для нанесения электродной смеси (прибор для нанесения и сушки электродной смеси GN-C300)</i>			
Механическая травма	Работа с рулонами фольги	Порезы, защемление пальцев	Использование защитных перчаток, обучение правилам обращения с материалами
Статическое электричество	Сухая фольга	Искрообразование, риск возгорания	Заземление оборудования, антистатические покрытия
Ошибка центровки рулона	Неправильная установка	Обрыв фольги, простой оборудования	Контроль правильности загрузки, автоматические направляющие
<i>Нанесение электродной смеси на фольгу и сушка (GN-C300)</i>			
Воздействие высоких температур	Сушка при 120 °С	Ожоги, перегрев оборудования	Термоизоляция печи, контроль температуры, СИЗ (термостойкие перчатки)
Испарения растворителей	Сушка электродной смеси	Раздражение дыхательных путей, токсическое воздействие	Вытяжная вентиляция, респираторы (класс A1 или A2)
Попадание смеси на кожу	Нанесение электродной пасты	Раздражение кожи, аллергические реакции	Защитные перчатки, спецодежда
<i>Прокатка рулона электродов на вальцах (вальцы GN-HR-200)</i>			
Механическая травма	Втягивание в валки	Тяжелые травмы конечностей	Блокировка доступа при работе, аварийные стоп-кнопки
Шум и вибрация	Работа вальцов	Ухудшение слуха, усталость	Противошумные наушники (SNR ≥ 25 дБ), виброизоляция
Деформация электродов	Неравномерное давление	Бракованная продукция	Регулировка зазора вальцов, контроль качества
<i>Нарезка электродного рулона на листы (прибор для вырубki электродов GN-S 200P)</i>			
Порезы и травмы	Острые кромки фольги	Ранения рук	Использование защитных перчаток, автоматическая подача материала
Ошибки резки	Смещение материала	Брак продукции	Контроль позиционирования, датчики точности
<i>Нарезка листов на электроды нужного размера (прибор для резки электродов GN-S500)</i>			
Контакт с движущими ножами	Работа гильотинного резака	Травмы пальцев	Защитные кожухи, двухкнопочное включение
Образование металлической пыли	Резка фольги	Раздражение дыхательных путей	Пылеулавливающая система, респираторы

Источник: составлено Р.Г. Ахтямовым, А.В. Шиховцевой, Л.Е. Калугиным, Е.Ю. Евщик.

Таким образом, производственный процесс изготовления электродов характеризуется комплексом опасных факторов, среди которых наиболее значимыми являются механические и термические риски, а также воздействие вредных веществ. Особое внимание следует уделить техническим средствам коллективной защиты и обеспечению работников качественными средствами индивидуальной защиты. Регулярный контроль состояния оборудования и проведение обучающих мероприятий для персонала являются обязательными условиями для поддержания безопасного производственного процесса.

На этапе сборки стека аккумулятора выявлены существенные различия в уровнях риска между ручным и полуавтоматизированным методами произ-

водства (табл. 3). Ручная сборка предполагает высокий риск травм, электростатических разрядов, брака из-за человеческого фактора. При переходе на полуавтоматическую сборку (GN-DP200S) риски травм, брака и влияния электростатики снижаются, но добавляются риск сбоев автоматики и шум.

Таблица 3. Сборка стека: результаты оценки производственных факторов и мер по снижению риска

Фактор риска	Источник	Возможные последствия	Меры снижения риска
<i>Ручная сборка стека (форма из оргстекла)</i>			
Механические повреждения	Острые кромки электродов, неправильное обращение с фольгой	Порезы, микротравмы пальцев	Использование защитных перчаток (нитриловые/антистатические), обучение правилам работы
Статическое электричество	Сухие материалы (сепаратор, электроды)	Искрообразование, риск повреждения чувствительных компонентов	Заземление рабочего места, антистатические браслеты
Ошибки сборки	Неправильное расположение электродов и сепаратора	Короткое замыкание, брак продукции	Визуальный контроль, использование шаблонов
Воздействие пыли/частиц	Частицы металла и полимеров	Раздражение кожи, дыхательных путей	Работа в чистой зоне, использование респиратора (FFP1)
<i>Полуавтоматическая сборка стека (полуавтоматический прибор для укладки стека GN-DP200S)</i>			
Механическая травма	Работа с движущимися частями прибора	Защемление пальцев, травмы	Блокировка доступа при работе, двуручное управление
Ошибки автоматизации	Сбой в подаче электродов/сепаратора	Неправильная сборка, брак	Датчики контроля положения, периодическая проверка оборудования
Электростатические разряды	Автоматическая укладка сухих материалов	Повреждение электроники, риск возгорания	Антистатическое покрытие оборудования, контроль влажности (не более 10 %)
Шум	Работа механизмов прибора	Повышенная утомляемость оператора	Использование наушников (SNR ≥ 20 дБ)

Источник: составлено Р.Г. Ахтямовым, А.В. Шиховцевой, Л.Е. Калугиным, Е.Ю. Евщик.

Проведенный анализ рисков показывает явное преимущество полуавтоматизированного метода сборки как с точки зрения производственной безопасности, так и с позиции стабильности качества продукции (табл. 4). Однако даже при использовании автоматизированного оборудования сохраняется необходимость в строгом соблюдении мер безопасности и регулярном контроле состояния техники. Ручной метод сборки следует рассматривать как временное или резервное решение, допустимое только при невозможности использования автоматизированных линий и при условии усиленных мер защиты персонала.

Внедрение предложенных рекомендаций позволит существенно снизить профессиональные риски, уменьшить количество производственного брака и создать безопасные условия труда вне зависимости от выбранного метода сборки. Особое внимание следует уделить постепенному переходу от ручных

операций к автоматизированным процессам, что является наиболее эффективным путем улучшения как показателей безопасности, так и общей производительности предприятия.

Таблица 4. Сравнительная оценка рисков для двух вариантов сборки

Критерий	Ручная сборка	Полуавтоматическая сборка
Риск травматизма	Высокий (контакт с острыми кромками)	Средний (ограничен доступ к опасным зонам)
Риск брака	Высокий (человеческий фактор)	Низкий (автоматизированный контроль)
Электростатические риски	Средний	Низкий (лучший контроль)
Производительность	Низкая	Высокая
Зависимость от оператора	Критическая	Минимальная

Источник: составлено Р.Г. Ахтямовым, А.В. Шиховцевой, Л.Е. Калугиным, Е.Ю. Евщик.

На этапе финальной стадии изготовления аккумулятора наиболее опасными являются операции с электролитом (LiPF_6), требующие работы в аргоновом боксе из-за риска образования токсичного HF (табл. 5). Критичны также шум и ожоги при ультразвуковой сварке, перегрев при вакуумной сушке, риски короткого замыкания при тестировании.

Предложенные меры включают в себя звукопоглощающие кожухи, роботизацию заливки электролита, многоуровневый термоконтроль, полный комплект СИЗ.

Таблица 5. Изготовление аккумулятора: результаты оценки производственных факторов и мер по снижению риска

Фактор риска	Источник	Возможные последствия	Меры снижения риска
<i>Подготовка корпуса из ламинированного алюминия (прибор для формовки корпуса GN-S230F)</i>			
Механические повреждения	Острые кромки алюминиевой фольги	Порезы рук при формовке корпуса	Использование защитных перчаток (антипорезных)
Деформация корпуса	Неправильная настройка прибора	Брак продукции	Контроль параметров формовки, калибровка оборудования
<i>Ультразвуковая сварка никелевых клемм (ультразвуковая сварка GN-2500)</i>			
Шум и вибрация	Работа ультразвукового сварочного аппарата	Повреждение слуха, усталость оператора	Противошумные наушники ($\text{SNR} \geq 25 \text{ дБ}$)
Термическое воздействие	Нагрев зоны сварки	Ожоги при неосторожном обращении	Термостойкие перчатки, защитные экраны
Некачественное соединение	Неправильные параметры сварки	Снижение проводимости, брак	Контроль качества сварки, регулярная проверка оборудования
<i>Вакуумная сушка стека (вакуумный сушильный шкаф)</i>			
Перегрев компонентов	Высокая температура сушки	Деградация электродов, возгорание	Контроль температуры, автоматическое отключение при перегреве
Разгерметизация вакуума	Неисправность шкафа	Попадание влаги, брак продукции	Регулярное ТО оборудования, датчики контроля вакуума
<i>Запайка корпуса (прибор для запайки GN-HS200)</i>			
Термические ожоги	Горячие поверхности при запайке	Ожоги кожи	Термостойкие перчатки, автоматические щипцы
Негерметичный шов	Неправильные параметры запайки	Утечка электролита, брак	Контроль качества шва, визуальный и приборный контроль

Фактор риска	Источник	Возможные последствия	Меры снижения риска
<i>Заполнение электролитом в аргоновом боксе (аргоновый бокс, прибор для пропитки GN-VS300)</i>			
Воздействие электролита	Контакт с LiPF6 и растворителями	Химические ожоги, токсическое воздействие	Полный комплект СИЗ (перчатки, очки, фартук), вытяжная вентиляция
Утечка аргона	Разгерметизация бокса	Удушье, потеря инертной атмосферы	Датчики контроля состава воздуха, аварийная вентиляция
<i>Вакуумирование и окончательная запайка (GN-HS200V)</i>			
Остаточные газы	Неполное вакуумирование	Вздутие корпуса, снижение емкости	Контроль степени вакуумирования
Повторный нагрев корпуса	Процесс запайки	Деформация корпуса	Точный контроль температуры
<i>Электрохимические тесты (Neware BTS4000-5V20A)</i>			
Короткое замыкание	Неправильное подключение	Возгорание, повреждение оборудования	Обучение персонала, проверка подключений
Перегрев аккумулятора	Высокие токи тестирования	Термический разгон, возгорание	Контроль температуры, автоматическое отключение

Источник: составлено Р.Г. Ахтямовым, А.В. Шиховцевой, Л.Е. Калугиным, Е.Ю. Евщик.

Обсуждение

Проведенный анализ демонстрирует, что безопасность производства ЛИА не может быть обеспечена точечными мерами. Требуется системный подход, интегрирующий три ключевых принципа, таких как:

- 1) максимальная автоматизация критически опасных операций (работа с электролитом, сварка) для исключения прямого контакта персонала с опасностями;
- 2) внедрение многоуровневого мониторинга параметров (температура, влажность, запыленность, состав воздуха) в реальном времени;
- 3) комплексная защита персонала, сочетающая современные инженерные решения (блокировки, вентиляция), адекватные СИЗ и непрерывное обучение.

Особенностью данного исследования является его поэтапность и практическая ориентированность. В отличие от работ, рассматривающих отдельные риски, здесь предложена целостная система управления для всей технологической цепочки, подтвержденная сравнительным анализом эффективности разных методов сборки. Переход к автоматизированным линиям представляет собой наиболее эффективный путь одновременного повышения безопасности, качества и производительности.

Заключение

Проведенное исследование позволило систематизировать ключевые аспекты производства литий-ионных аккумуляторов, уделив особое внимание анализу производственных рисков на каждом технологическом этапе. Уста-

новлено, что наиболее критичными с точки зрения безопасности являются операции, связанные с работой с электролитами, ультразвуковой сваркой и процессами сушки, требующие особых мер защиты.

Результаты исследования демонстрируют, что современные подходы к организации аккумуляторного производства должны основываться на трех ключевых принципах: максимальной автоматизации критически опасных операций, внедрении многоуровневых систем мониторинга параметров и комплексной защите персонала. Особую эффективность показало сочетание технических решений с организационными мерами.

Практическая значимость работы заключается в разработанном комплексе рекомендаций по оптимизации технологических процессов с точки зрения безопасности, выбору средств индивидуальной и коллективной защиты, а также организации системы контроля качества и охраны труда. Реализация предложенных мер позволит существенно повысить безопасность и эффективность производства литий-ионных аккумуляторов при одновременном снижении себестоимости продукции.

В целом проведенное исследование подтверждает, что только системный подход, учитывающий все аспекты производства, от выбора сырья до финального тестирования, может обеспечить создание конкурентоспособного и безопасного аккумуляторного производства.

Список литературы

- [1] Ngoy K.R., Lukong V.T., Yoro K.O., Makambo J.B., Chukwuati N.C., Ibegbulam C., Eterigho-Ikelegbe O., Ukoba K., Jen T.C. Lithium-ion batteries and the future of sustainable energy: A comprehensive review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025. Vol. 223. Article no. 115971. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115971> EDN: FLOWPS
- [2] Ali H., Khan H.A., Khalid M., Pecht M. A review and analysis of the safety labeling of lithium-ion batteries // *Journal of Energy Storage*. 2025. Vol. 120. Article no. 116461. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116461> EDN: ZLTISS
- [3] Nekahi A., Feyzi E., Srivastava M., Yeganehdoust F., Reddy A.K.M.R., Zaghib K. Advanced lithium-ion battery process manufacturing equipment for gigafactories: Past, present, and future perspectives // *iScience*. 2025. Vol. 28. No. 7. Article no. 112691. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112691> EDN: NIZVSR
- [4] Chen Y., Kang Y., Zhao Y., Wang L., Liu J., Li Y., Liang Z., He X., Li X., Tavajohi N., Li B. A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards // *Journal of Energy Chemistry*. 2021. Vol. 59. P. 83–99. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.10.017> EDN: DVVEBL
- [5] Ziegler M.S., Song J., Trancik J.E. Determinants of lithium-ion battery technology cost decline // *Energy & Environmental Science*. 2021. Vol. 12. P. 6074–6098. <https://doi.org/10.1039/D1EE01313K> EDN: MOGEHG
- [6] Gutsch M., Leker J. Costs, carbon footprint, and environmental impacts of lithium-ion batteries — From cathode active material synthesis to cell manufacturing and recycling // *Applied Energy*. 2024. Vol. 353. Article no. 122132. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122132> EDN: ZGTSXL

- [7] Örü̇m Aydin A., Zajonz F., Gü̇nther T., Dermenci K., Berecibar M., Urrutia L. Lithium-ion battery manufacturing: industrial view on processing challenges, possible solutions and recent advances // *Batteries*. 2023. Vol. 9. No. 11. P. 555. <https://doi.org/10.3390/batteries9110555> EDN: EAXPST
- [8] Li J., Fleetwood J., Hawley W.B., Kays W. From materials to cell: state-of-the-art and prospective technologies for lithium-ion battery electrode processing // *Chemical Reviews*. 2021. Vol. 122. No. 1. P. 903–956. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00565> EDN: YUASTM
- [9] Larsson F., Andersson P., Blomqvist P., Mellander B.E. Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. Article no. 10018. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09784-z> EDN: MCPGWD
- [10] Iqbal A., Kakoria A., Riaz S.T., Xu J., Pushparaj R.I., Xu G. Comparative fire hazards of lithium-ion battery chemistries: linking thermal behavior, gas toxicity, and state-of-charge to composite risk profiles // *Journal of Power Sources*. 2025. Vol. 655. Article no. 237914. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.237914> EDN: FATLDA
- [11] Jeong B., Yoon M., Lee J. A Study on the hazard categorization and loss prevention standards of lithium-ion battery manufacturing occupancies // *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 2019. Vol. 19. No.1. P. 249–256. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.1.249>
- [12] Schwaebe B., He H., Glaubensklee Ch., Ogunseitan O.A., Schoenung Ju.M. Chemical hazard assessment toward safer electrolytes for lithium-ion batteries // *Integrated Environmental Assessment and Management*. 2024 Vol. 20. No. 6. P. 2231–2244. <https://doi.org/10.1002/ieam.4963> EDN: XCSBBR
- [13] Wang G., Guo X., Chen J., Han P., Su Q., Guo M., Wang B., Song H. Safety performance and failure criteria of lithium-ion batteries under mechanical abuse // *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 17. Article no. 6346. <https://doi.org/10.3390/en16176346> EDN: FFIQCU
- [14] Yao L., Yu C., Xiao Ya., Cui G., Fei Zh., Qu Ch. A comprehensive review of lithium-ion battery safety issues and fault diagnosis strategies throughout the entire lifecycle // *Journal of Energy Storage*. 2025. Vol. 136. Article no. 118447. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.118447> EDN: JYHGKD
- [15] Sommer A., Bazlen S., Tran H.Ye., Braunwarth W., Daub R. Development and implementation of in-line segmentation for continuous electrode production in lithium-ion battery cell manufacturing for traceability applications // *Procedia CIRP*. 2023. Vol. 120. P. 171–176. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.08.031> EDN: MEFNCF
- [16] Krätzig O., Degen F. A comprehensive review and analysis of technology performance characteristics of lithium-ion battery cell manufacturing: Introducing a Call-for-Innovation-Heatmap // *Journal of Power Sources Advances*. 2025. Vol. 33. Article no. 100174. <https://doi.org/10.1016/j.powera.2025.100174> EDN: DQBHTV
- [17] Lystianingrum V., Priyadi A., Negara I.M.Yu. Lessons learned from large-scale lithium-ion battery energy storage systems incidents: a mini review // *Process Safety Progress*. 2023. Vol. 42. No. 2. P. 348–355. <https://doi.org/10.1002/prs.12448> EDN: KKNUQA
- [18] Baazouzi S., Feistel N., Wanner J., Landwehr I., Fill A., Birke K.P. Design Properties, and Manufacturing of Cylindrical Li-Ion Battery Cells — A Generic Overview // *Batteries*. 2023. Vol. 9. No. 6. Article no. 309. <https://doi.org/10.3390/batteries9060309> EDN: DKHPRE
- [19] Гусева Е.С., Попова С.С. Гусева Е.С., Попова С.С. Особенности кинетики процесса формирования катодного материала состава $\text{Li}_x\text{La}_y\text{Mn}_{1-y}\text{O}_2(\text{C}_{60})_n$ для литий-ионного аккумулятора // *Известия ВУЗов. Химия и химическая технология*. 2019. Т. 62. Вып. 11. С. 99.

- [20] Song J. Integrating automation and big data in lithium-ion battery manufacturing: a case study of the ultium cells joint venture // Current Journal of Applied Science and Technology. 2024. Vol. 43. No. 10. P. 11–23. <https://doi.org/10.9734/cjast/2024/v43i104433> EDN: XLRBBU
- [21] Shukla D., Shankul V. Risk management safety assessment over the life cycle of lithium-ion batteries in EV // International Journal of Recent Engineering Science. 2024. Vol. 11. No. 3. P. 32–47. <https://doi.org/10.14445/23497157/IJRES-V11I3P104> EDN: JKESMN

Сведения об авторах:

Ахтямов Расул Гумерович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологической и экологической безопасности, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9. ORCID: 0000-0001-8732-219X; SPIN-код: 2812-3782. E-mail: ahtamov.zchs@gmail.com.

Шиховцева Анна Владимировна, младший научный сотрудник Лаборатории твердотельных электрохимических систем, Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, 142432, Российская Федерация, Московская обл., г. Черноголовка, пр. академика Семенова, д. 1. ORCID: 0000-0003-4058-2968; eLIBRARY SPIN-код: 5367-2937. E-mail: dissovet04@icp.ac.ru

Леонид Ермолаевич Калугин, кандидат химических наук, инженер Лаборатории технологий материалов и устройств электрохимических источников энергии, Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, 142432, Российская Федерация, Московская обл., г. Черноголовка, пр. академика Семенова, д. 1. ORCID: 0009-0003-9507-1185; eLIBRARY SPIN-код: 5657-5774. E-mail: kleo2712@yandex.ru

Елизавета Юрьевна Евщик, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Лаборатории твердотельных электрохимических систем, Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, 142432, Российская Федерация, Московская обл., г. Черноголовка, пр. академика Семенова, д. 1. ORCID: 0000-0002-3562-8805; eLIBRARY SPIN-код: 5375-9184. E-mail: liza@icp.ac.ru

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-3-376-390

EDN: DURDLT

УДК 697.946

Научная статья / Research article

Вклад источников индивидуального теплоснабжения в загрязнение воздуха городов Сибири и его снижение бытовыми электрофильтрами

С.В. Калашников^{id}✉, А.В. Номоев^{id}, Т.А. Чимытов^{id}, И.А. Южаков^{id},
М. Самбуу^{id}, С.-Э. Цырен-Очир^{id}

Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, Российская Федерация
✉betch_kail@mail.ru

Аннотация. Цель исследования — обоснование целесообразности применения бытовых электрофильтров для снижения выбросов твердых частиц от индивидуальных источников теплоснабжения (ИИТ) в городах Сибири на примере Улан-Удэ. Объект исследования — выбросы твердых загрязняющих веществ от частных котельных и печей, работающих на угле и дровах. Методология включает натурные измерения запыленности дымовых газов (аспирационный метод, термоанемометрия), расчет по формуле Дейча, лабораторное моделирование электрофильтра с золовым уносом и анализ гранулометрического состава. Средняя запыленность дыма ИИТ составляет $1,0 \pm 0,2$ г/м³ при расходе 260 ± 70 м³/ч; оснащение 50 % угольных котельных электрофильтрами с эффективностью 99 % позволит снизить выбросы твердых частиц на 3000–4000 т/год. Разработанный двухзонный электрофильтр с потребляемой мощностью ~315 Вт и габаритами 1,4×0,45×0,7 м может быть интегрирован в дымоход частного дома взамен стандартной секции.

Ключевые слова: выбросы в атмосферу, золовый унос, загрязнение атмосферы, электрофильтр, формула Дейча, коронный разряд, Улан-Удэ

Вклад авторов. Калашников С.В. — концептуализация. Номоев А.В. — ресурсы, получение финансирования. Чимытов Т.А. — создание черновика рукописи. Южаков И.А. — проведение исследования. Самбуу М. — проведение исследования, верификация данных. Цырен-Очир С.-Э. — формальный анализ. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, научная тема FWSF-2024-0013.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Калашников С.В., Номоев А.В., Чимытов Т.А., Южаков И.А., Самбуу М., Цырен-Очир С.-Э., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных. Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

История статьи: поступила в редакцию 08.12.2025; доработана после рецензирования 21.01.2026; принята к публикации 15.02.2026.

Для цитирования: Калашиников С.В., Номоев А.В., Чимытов Т.А., Южаков И.А., Самбуу М., Цырен-Очир С.-Э. Вклад источников индивидуального теплоснабжения в загрязнение воздуха городов Сибири и его снижение бытовыми электрофильтрами // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 3. С. 376–390. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-376-390>
EDN: DURDLT

The contribution of individual heat sources to air pollution in Siberian cities and its reduction by household electrostatic precipitators

Sergey V. Kalashnikov[✉], Andrey V. Nomoev^{id}, Timur A. Chimytov^{id}, Ilya A. Yuzhakov^{id}, Munkhtsetseg Sambuu^{id}, Soyol-Erdene Tseren-Ochir^{id}

Institute of Physical Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation

[✉]betch_kail@mail.ru

Abstract. The aim of the study is to justify the feasibility of using household electrostatic precipitators (ESPs) to reduce particulate emissions from individual heat sources (IHS) in Siberian cities, using Ulan-Ude as a case study. The object of the study is particulate emissions from private coal- and wood-fired boilers and furnaces. Methodology includes field measurements of flue gas dust content (aspiration method, thermoanemometry), Deutsch formula calculations, laboratory ESP modelling with fly ash, and particle size distribution analysis. Average IHS flue gas dust concentration is $1.0 \pm 0.2 \text{ g/m}^3$ at a flow rate of $260 \pm 70 \text{ m}^3/\text{h}$; equipping 50% of coal-fired boilers with ESPs (99% efficiency) would reduce particulate emissions by 3000–4000 t/year. The developed two-zone ESP with power consumption of ~315 W and dimensions of $1.4 \times 0.45 \times 0.7 \text{ m}$ can be integrated into the chimney of a private house instead of a standard section.

Keywords: atmospheric emissions, fly ash, atmospheric pollution, electrostatic precipitator, Deutsch formula, corona discharge, Ulan-Ude

Authors' contribution. S.V. Kalashnikov — conceptualization. A.V. Nomoev — resources, obtaining financing. T.A. Chimytov — writing — review and editing. I.A. Yuzhakov — investigation. M. Sambuu — investigation, validation. S.-E. Tsyren-Ochir — formal analysis. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Funding. The work was carried out with the financial support of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, scientific topic FWSF-2024-0013.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability. All data obtained during this study are included in the published article.

Article history: received 08.12.2025; revised 21.01.2026; accepted 15.02.2026.

For citation: Kalashnikov SV, Nomoev AV, Chimytov TA, Yuzhakov IA, Sambuu M, Tseren-Ochir S-E. The contribution of individual heat sources to air pollution in Siberian cities and its reduction by household electrostatic precipitators. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(3):376–390. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-376-390> EDN: DURDLT

Введение

Вряд ли стоит отдельного упоминания то, что потребность человека в чистом воздухе для дыхания является первоочередной. В Сибирском (СФО) и Дальневосточном федеральном округе (ДФО) насчитывается 39 городов с превышением комплексного индекса загрязнения атмосферного воздуха более чем в 7 раз по данным Росгидромета за 2024 г.¹ [1]. В промышленных городах источниками загрязнения атмосферы, как правило, являются крупные промышленные предприятия. Во многих городах, не имеющих подключения к магистральному газу, превышение допустимых концентраций загрязняющих веществ обусловлено значительным вкладом индивидуальных источников теплоснабжения (в дальнейшем — ИИТ), работающих на угле или дровах. 12 регионов Сибири и Дальнего востока не имеют магистрального газа вообще, в трех регионах к газу подключены менее 20 % населения, а в семи субъектах — менее 10 % [2]. Самый высокий уровень газификации в указанных округах — 27,1 % у Тюменской области.

При этом доля введенного в строй индивидуального жилищного строительства (ИЖС) от общего ввода жилья для Сибирского федерального округа в 2023 г. составляет в среднем 61,3 % [3], для Дальневосточного федерального округа — 56 %. Причем за последние годы прослеживается тенденция к увеличению доли ИЖС, большая часть которого вводится в городах и их агломерациях, увеличивая количество выбросов в атмосферу.

Существенное превышение норм загрязнения воздуха отмечается во многих городах Сибири и Дальнего востока: Братск, Красноярск, Новокузнецк, Норильск, Омск, Иркутск, Чита, Гусиноозёрск, Селенгинск, Улан-Удэ, Кызыл, Абакан, Черногорск, Барнаул и др., характерно и для городов других стран, например Улан-Батора.

¹ Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2024 год. Москва : Росгидромет, 2025. URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/iblock/88f/%D0%9E%D0%B1%D0%B7%D0%BE%D1%80%20%D0%B7%D0%B0%202024%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4_300625.pdf?ysclid=mrachsi2wd806640418 (дата обращения: 05.11.2025).

Рассмотрим проблематику на примере Улан-Удэ — города, который имеет один из самых высоких в ДВФО уровней загрязнения воздуха и при этом характеризуется широким набором причин, приводящих к такой ситуации. В Улан-Удэ насчитывается, по разным данным, от 37 [4] до более 45 (в агломерации — 67) тысяч ИЖС, которые отапливаются большей частью дровами и углем, так как Республика Бурятия не имеет магистральной газификации. При этом ожидается, что число домовладений будет в ближайшее время только расти. Также, помимо промышленных объектов, в городе имеется 144 муниципальных и ведомственных котельных и порядка 2900 малых угольных котлов на складских, производственных, торговых объектах [5]. Это приводит к общеизвестным проблемам с загрязнением воздуха в зимний период и ухудшению здоровья жителей.

В 2024 г. в Улан-Удэ отмечалось превышение ПДК бенз(а)пирена до 38,8 раза, формальдегида в 3,7 раза, взвешенных веществ в 2,4 раза, мелкодисперсных взвешенных частиц размером до 10 мкм и до 2,5 мкм в 1,4 раза (каждый), фенола в 1,3 раза, озона в 1,2 раза² [6]. Улан-Удэ входит в десятку городов России с самым высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха.

В достаточно большой степени неблагоприятное состояние атмосферного воздуха в городе обусловлено наличием большого количества частных домовладений с отоплением углем и дровами, дым от которых не уходит высоко в атмосферу, а в результате температурной инверсии стелется над землей. Являясь децентрализованными источниками, данная категория наиболее трудная с точки зрения ее экологического реформирования. Любые мероприятия в этом направлении являются очень дорогостоящими или для бюджета города (организация централизованного теплоснабжения, модернизация электросетей), или для самих частных домовладений (переход на электроотопление, сжиженный газ, топливные брикеты и пр.).

В целом высокая загазованность воздуха из-за разросшегося ИЖС не уникальна для Улан-Удэ и вызвана в первую очередь отсутствием газовой инфраструктуры, поэтому исследование не ограничивается выбранным городом, хотя и разработано на его примере [7].

Предполагается, что разработка, создание и применение в частных котельных специализированных электрофильтров приведет к значительному снижению загрязняющих выбросов в некоторых городах Сибири.

Цель исследования — анализ режимов работы ИИТ, эскизная разработка модели электрофильтра для них, анализ технико-экономической целесообразности их применения.

² Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Республики Бурятия в 2023 году» / Министерство природных ресурсов и экологии Республики Бурятия. Улан-Удэ, 2024. URL: <https://egov-buryatia.ru/mpr/files/%D0%93%D0%94%202023.pdf> (дата обращения: 24.01.2025).

Исследование общего вклада ИИТ в загрязнение воздуха

По данным ООО «Институт проектирования, экологии и гигиены», который по заказу Министерства природы Республики Бурятия проводил экологическое исследование загрязнения воздуха в г. Улан-Удэ, преобладающими источниками загрязняющих выбросов являются промышленные объекты (около 40 %), индивидуальные источники теплоснабжения (около 55 %) и транспорт (не более 5 %) [8]. К аналогичным данным пришли и исследователи БИП СО РАН [4; 9]. В других городах с высокой долей ИЖС и отсутствием магистрального газа соотношение источников выбросов будет, конечно же, другим, но доля ИИТ в нем будет в любом случае существенна. Разрастающийся частный сектор — жилые кварталы, состоящие из домов с автономными угольными небольшими котельными и дровяными печами — основной источник загрязнения атмосферного воздуха в нескольких десятках городов Сибири и Дальнего Востока.

Среди основных веществ, загрязняющих воздух в Улан-Удэ, лидируют твердые вещества, диоксид серы, оксид углерода, которые в суммарном объеме выбросов составляют 86–88 % [5; 7]. Можно сделать предположение о том, что ИИТ, работающие на угле, выбрасывают в воздух твердых частиц не меньше в удельном исчислении, что и муниципальные котельные, но в большем абсолютном значении. Для оценки запыленности дымовых газов частных котельных авторами работы произведено ее измерение на десяти ИИТ, оснащенных твердотопливными котлами ZOTA «Cuba» (25 кВт, на угле), КО 40ГК (20 кВт, на угле), «Сибирь-GEFEST» КВО 15 ТЭ (15 кВт, на угле), Wirt Smart+ (15 и 25 кВт, на угле), Pixel (8 кВт, на дровах) и с двумя, изготовленными частными предприятиями (с мощностью около 20 кВт, на угле и на дровах).

Измерения производились аспирационным методом. Из выпускной трубы котла аспиратором отбирался дым в течение $t = 5$ мин, по разности масс фильтра до и после отбора определялась масса твердых частиц уноса. Расход дыма котлов вычислялся путем измерения диаметра d его отводной трубы и скорости потока термоанемометром. С использованием полученных данных рассчитывалась запыленность дыма.

По результатам измерений и расчетов для декабря 2024 г со средней температурой наружного воздуха $-18,7$ °С, средняя запыленность дыма от ИИТ составила $1 \pm 0,2$ г/м³, а средний расход дыма — 260 ± 70 м³/ч. По данным [3], в г. Улан-Удэ доля домов с ИИТ в виде печей 77,7 и 22,3 % — в виде котлов. Исходя из общего числа домов, равного 45 тыс., выходит, что котлами оборудовано около 10 тыс. их них. Продолжительность отопительного сезона составляет 7,8 мес., и если предположить, что хотя бы 4 мес. (2880 ч) из них котлы работают в режиме, близком к определенному в декабре, и что они среднем близки к нашей выборке по производительности, то за год в воздух выбрасывается $10\,000 \times 2880 \text{ ч} \times 260 \text{ м}^3/\text{ч} \approx 7,5$ млрд м³ дыма, содержащего

$7,5 \text{ млрд м}^3 \times 1 \text{ г/м}^3 \approx 7500 \text{ т}$ твердых частиц сажи с канцерогенными веществами. Расчет может быть завышен, однако в любом случае речь идет о тысячах тонн золы только от ИИТ, оснащенных твердотопливными котлами, выбрасываемой и осаждающейся в городе и пригороде. К тому же, по данным авторов [4], всего выбрасывается частным сектором порядка 48,6 тыс. т (это включая газообразные вещества) загрязняющих веществ в год, так что наша оценка выглядит вполне реалистично.

Анализ методов снижения выбросов ИИТ

Решить проблему загрязнения воздуха ИИТ возможно при использовании бездымного топлива, переводе на электро- или газовое отопление, при переводе нагрузок с малых котельных на ТЭЦ. Указанные мероприятия являются дорогостоящими проектами с большими сроками реализации. Для снижения выбросов больших котельных на данный момент по федеральной программе «Чистый воздух» в рамках национального проекта «Экологическое благополучие» в ряде городов проводятся мероприятия, включающие увеличение доли электротранспорта, закрытие или оснащение муниципальных котельных электрофильтрами и пр. Однако существенная доля выбросов, как показано выше, производится ИЖС, и для снижения этой доли предлагается чаще всего перевод на электрическое отопление, что требует больших капиталовложений. При этом ввиду высокой стоимости электроэнергии во многих регионах полный перевод отопления ИЖС на электричество выглядит довольно оптимистическим прогнозом — наверняка многие домовладения продолжают пользоваться твердым топливом.

Альтернативой может являться оснащение ИИТ доступными устройствами очищения дыма. Загрязненный газ может быть очищен различными способами: механическим, в силовых полях, сухим и мокрым способом и т.п. Механическая очистка (фильтрация) создает высокое сопротивление потоку и большие расходы на сменные элементы. Из наиболее распространенных способов очистки в силовых полях можно отметить циклоны, использующие инерционную силу для выведения частиц из потока, а также электрофильтры, воздействующие на предварительно заряженные частицы загрязнителя электрическим полем. Циклоны имеют высокое сопротивление, требуют большой скорости потока и могут работать только вместе с дымососами, которых чаще всего в небольших котельных нет. Электрофильтр таких недостатков лишен, однако вместе с тем и более сложен, дорог, требует источника электропитания.

Указанные способы удаляют только твердые частицы из дыма, однако они в большей степени и создают эффект смога над городом, более того, эти частицы адсорбируют многие опасные канцерогенные вещества, такие как, например, бензпирен. Поэтому очистка дыма от сажевых частиц очень актуальна, тем более она реализуема технически проще, чем очистка дыма от вредных газов.

Таким образом, наиболее отработанной и применимой для бытовых условий, не требующей крупных изменений в частных котельных является система очистки с использованием небольшого электрофилтра. Количество выбрасываемого дыма частной котельной невелико, стоит ожидать, что бытовой электрофилтр должен иметь низкие габариты, низкую потребляемую мощность и стоимость.

Производителями представлены электрофилтры или для применения в условиях кухонных помещений общепита, или для промышленных предприятий (табл.). Первые имеют низкую производительность (до 4000 м³/ч) [9], предназначены для монтажа в помещениях и совмещены с другими видами филтров. Такие агрегаты не имеют систем автоматической очистки и складирования уловленной пыли, поэтому требуют периодической промывки. Промышленные электрофилтры характеризуются высокой пропускной способностью (70–430 тыс. м³/ч), очень большими размерами, стоимостью, энергопотреблением и массой — этот класс агрегатов выходит за рамки рассматриваемой темы.

Российские и некоторые зарубежные производители электрофилтров, их производительность и назначение

Фирма-производитель	Производительность, м ³ /ч	Температура газа, °С	Назначение
ООО «НПП «Ятаган»	1000–4000	10–200	Для промышленного или бытового приготовления пищи на кухне
ООО «Завод Экострада»	3000	н.д.	
ООО «Провелдинг»	1000–4000	н.д.	
ООО «Финго-комплекс»	50000–2 000 000	10–425	Обеспыливание газов в энергетике, металлургии, горнодобывающей, химической и других отраслях промышленности
ХК «Кондор Эко»	14000–300 000	до 330	
BotonAir (Китай)	до 30 000	н.д.	Для промышленного приготовления пищи на кухне, некоторые виды промышленного производства
D rr Systems (Германия)	до 1 000 000	н.д.	Обеспыливание газов в различных отраслях промышленности
F.L. Smidth Airtech (Дания)	50 000–2 000 000	н.д.	

Источник: составлено С.В. Калашниковым, А.В. Номоевым.

Однако активные исследования последних лет подтверждают техническую возможность и эффективность создания микроэлектрофилтров именно для малых котельных. В частности, в [10] представлены результаты полевых испытаний компактных электрофилтров в реальных жилых домах: при стабильной работе котла степень очистки достигает 90 %, а при длительной эксплуатации пользователями — 70–82 %, что позволяет значительно снизить концентрацию PM_{2.5} и PM₁₀.

На рынке слабо представлены электрофилтры в качестве готовых технических решений для ИИТ. Учитывая потребность в очистке дымовых газов, имеет смысл оценить как эффективность, так и экономическую обоснованность массового применения электрофилтров целевого для ИИТ типоразмера.

Расчет и экспериментальная проверка электрофильтра

Очистка газов от взвешенных в них твердых или жидких частиц в электрофильтрах происходит под действием электрических сил, для чего частицам сообщается электрический заряд. Заряженные частицы в результате воздействия электрического поля выводятся из очищаемого газового потока и осаждаются на собирающих электродах.

В большинстве применений эти этапы могут выполняться в одной рабочей камере [11]. В однозонных электрофильтрах ряд разрядных проволок (коронирующих электродов) расположен между параллельными собирающими (осадительными) электродами-пластинами, образующими газопоток. Электроды подключены к источнику высокого напряжения. У тонкого электрода возникает коронный разряд, электроны движутся к положительно заряженным осадительным электродам, по пути оседая на частицах пыли и заряжая их. В итоге пыль электрическим полем выводится из потока и оседает на пластинах, которые очищаются механическим воздействием, в результате чего комки осажденной пыли падают в бункеры, расположенные в нижней части фильтра.

Степень очистки газов электрофильтром вычисляется по формуле Дейча [11; 12]

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\omega L}{dv}\right), \quad (1)$$

где L — длина осадительной части электрофильтра, м; v — скорость потока дымовых газов, м/с; ω — средняя скорость частиц поперек электрофильтра, м/с; d — расстояние между коронирующим и осадительным электродом, м. Задав η , d , v и ω , можно рассчитать длину фильтра.

Степень очистки для промышленных электрофильтров составляет 98–99 % [13], то есть довольно высока. Целесообразно задать для фильтра ИИТ значение $\eta = 0,99$.

Чем меньше расстояние между коронирующим и осадительным электродом d , тем выше при прочих равных степень улавливания электрофильтра, однако она ограничивается электрической прочностью разрядного промежутка и при обычном напряжении питания, равном 50 кВ, не может быть менее 100 мм [11; 13].

Скорость движения газа в электрофильтрах не превышает 1–1,5 м/с. С увеличением скорости уменьшается поперечный габарит фильтра, но увеличивается его длина, что для наших целей совершенно нежелательно, поэтому ограничимся низкой скоростью, равной 0,3 м/с. Площадь поперечного сечения активной части фильтра $S = Q/v$, откуда следует, что площадь сечения активной части электрофильтра для производительности 300 м³/ч (удовлетворяющей большинству ИИТ) должна составлять $S = 0,28$ м².

По соображениям удобного монтажа на котельных или печах, а также ради уменьшения количества электродов, изоляторов и элементов системы очистки выгоднее делать электрофильтры высокими, но с ограниченной

шириной. Поэтому лучше выбирать ширину активной части, равную 0,42 м, и соответственно площади сечения высоту, равную 0,67 м.

Зная среднюю скорость дрейфа частиц поперек электрофильтра ω , можно задать и длину осадительной части фильтра L , однако расчет ω основан на эмпирически выведенных закономерностях, которые дают большую погрешность, поэтому было решено определить скорость на натурной модели электрофильтра.

Лабораторный электрофильтр включает в себя один газовый проход. Конструкция фильтра модульная, длина активной части каждого модуля равна 0,96 м, высота — 0,76 м (рис. 1). Измерения производились с использованием одного модуля при расстоянии между осадительными электродами и кончиками игл коронирующих электродов, равном 100 мм. Агрегат оснащен диффузором с газораспределительным устройством и конфузором, на выходе которого установлен тангенциальный вентилятор.



Рис. 1. Лабораторный электрофильтр со снятым осадительным электродом

Источник: фото С.В. Калашникова.

Через фильтр прокачивался воздух комнатной температуры с расходом 150–200 м³/ч, в который инжектировался золовый унос, взятый как с циклонных очистителей муниципальных котельных (работающих на типичном для региона сорте угля со сжиганием его на колосниках, т.е. так же, как и в котлах ИИТ). Анализ гранулометрического состава золового уноса, взятого из этих источников, показал его общую тождественность, т.е. можно сделать вывод, что в среднем зола по размеру частиц, образующихся в различных котлах, практически одинакова (рис. 2). Содержание пыли в воздухе поддерживалось в диапазоне 1–5 г/м³. Входная и выходная запыленность воздуха измерялась

оптическими датчиками, отбор газа для которых производился трубками Пито. Датчики позволяют определить массовое содержание частиц двух диапазонов размеров — 0,3–2,5 и 2,5–10 мкм.

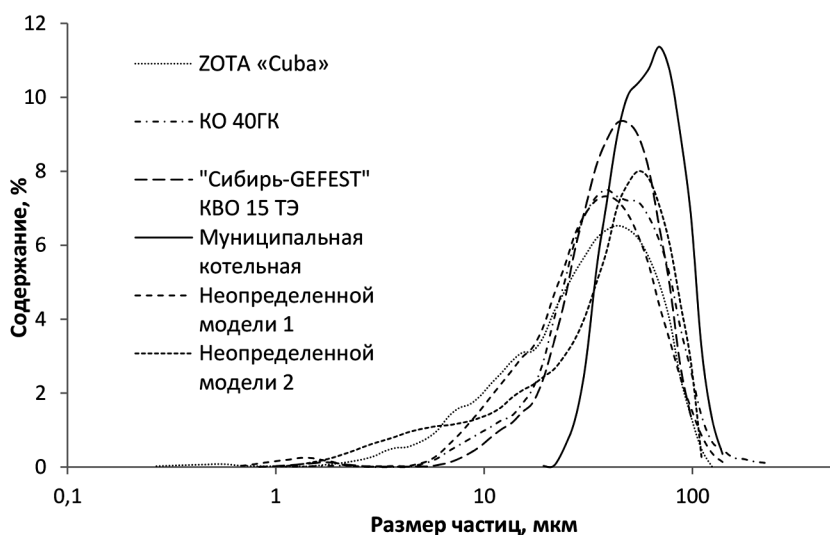


Рис. 2. Гранулометрический состав золы от различных источников выбросов

Источник: составлено С.В. Калашниковым.

Для вычисления поперечной скорости частиц на макете фильтра производилось измерение степени улавливания пыли в зависимости от расстояния, на котором отбирался газ. Полученные кривые входной ($\zeta_{\text{вх.}}$) и выходной ($\zeta_{\text{вых.}}$) запыленности газа от времени эксперимента использованы для вычисления степени улавливания электрофильтром по формуле $\eta = 1 - \zeta_{\text{вых.}} / \zeta_{\text{вх.}}$. На длине осаждения 0,2 м было получено значение степени улавливания пыли около 75 %, на длине 0,9 м — 99 % (рис. 3).

Исходя из известной длины макета электрофильтра и степени осаждения пыли, по формуле (1) была вычислена средняя скорость дрейфа частиц:

$$\omega = -\frac{dv \ln(1-\eta)}{L} = 0,16 \text{ м/с.} \quad (2)$$

Скорость дрейфа частиц, однако, зависит от расстояния между электродами и напряжения на них, а также от размера частиц, так как приобретаемый ими заряд пропорционален их радиусу. Однако для практического расчета при постоянном гранулометрическом составе золы представленный метод определения ω вполне достаточен и может быть применен для расчета длины фильтра при других изначально заданных параметрах.

Таким образом, для очистки 300 м³/ч дыма от твердых частиц необходим электрофильтр с поперечными размерами около 0,45×0,7 м, длиной активной части около 0,9 м (вместе с диффузором и конфузором около 1,3–1,4 м). При рекомендуемом расстоянии между соседними коронирующими электродами

0,1 м [14] их потребуется 9 шт. На ширину активной части такого фильтра необходимо два газовых прохода с межэлектродными расстояниями 100 мм, таким образом, общее число коронирующих электродов равно 18 при длине каждого около 0,7 м, то есть общая их длина составит 12,6 м.

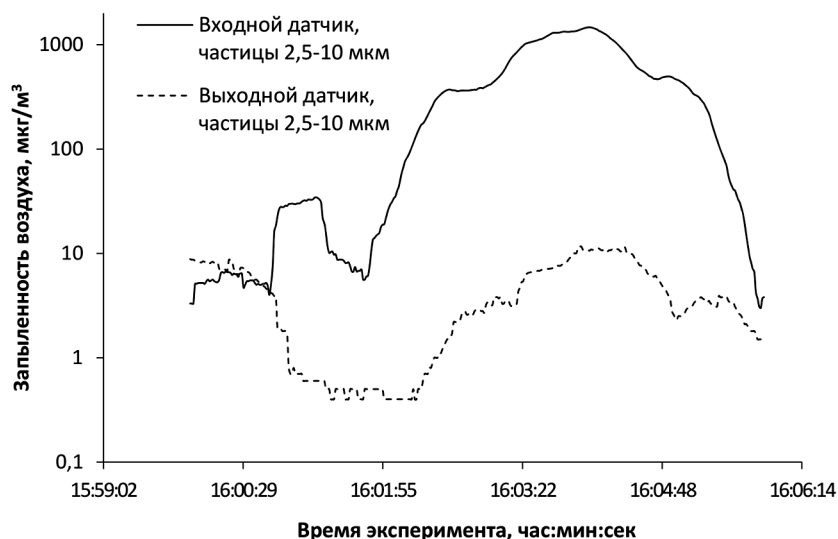


Рис. 3. Данные о запыленности на входе в фильтр и на расстоянии 0,9 м от него. Отношение мгновенной выходной и входной запыленностей дает значение степени улавливания, равное 99 %

Источник: составлено С.В. Калашниковым.

Линейная плотность тока при экспериментальном осаждении составляла 0,5 мА/м. Таким образом, потребляемый ток разрабатываемого электрофильтра будет около $12,6 \text{ м} \times 0,5 \text{ мА/м} = 6,3 \text{ мА}$. Это дает потребляемую мощность фильтром $P = 315 \text{ Вт}$, то есть достаточно умеренную (при среднем значении стоимости электроэнергии в России, равном 4,72 р./кВт·ч, стоимость потребленной энергии в месяц составит около 1070 р.).

ИИТ имеют нестабильный режим работы, характеризующийся в том числе широким диапазоном расхода дыма и его запыленности. Регулирование параметров электропитания рассмотренного однозонного электрофильтра с целью экономии электроэнергии сильно влияет на степень улавливания пыли. Это обусловлено тем, что функция зарядки частиц пыли и функция ее выведения из потока возложены на одно и то же поле. Во всем объеме однозонного электрофильтра создается электродинамическое поле, перенос зарядов между электродами вызывает относительно высокое энергопотребление. Уменьшение тока этого поля даже при низкой запыленности потока приводит к резкому снижению скорости дрейфа частиц в результате снижения степени их заряда. При этом основная зарядка частиц пыли производится на входе в электрофильтр, таким образом, наличие электродинамического поля в большей части объема электрофильтра является избыточным.

Двухзонные электрофилтры имеют отдельные поля для зарядки частиц и для их осаждения. Соответственно, возможно раздельное регулирование степени зарядки и степени осаждения частиц. Ограниченный по площади электродов ионизатор имеет относительно низкое энергопотребление при высокой степени зарядки частиц. Протяженный осадитель может иметь только электростатическое поле, требующее небольшой энергии. По существу, энергия поля осадителя тратится только на дрейф частиц в нем. Чем меньше запыленность потока, тем меньше затрачиваемая энергия.

Таким образом, в двухзонном электрофилтре происходит автоматическое регулирование затраченной энергии. Введение датчиков запыленности или гранулометрического состава пыли позволяет также осуществить и регулирование интенсивности работы ионизатора с целью разумного снижения его энергопотребления и выделения озона.

Заряженная в коронном разряде пыль, летящая с дымом, осаждается на осадительных электродах (рис. 4). Существует предельная толщина слоя пыли, при которой электрофилтр еще может продолжать стабильно работать. Как быстро будет достигнута эта толщина слоя, зависит от запыленности входящего дыма. Так, при запыленности 1 г/м^3 , учитывая площадь двух осадительных электродов нашего электрофилтра ($1,34 \text{ м}^2$) и насыпную плотность золы ($0,7 \text{ г/см}^3$), за 1 ч работы осядет слой толщиной примерно 0,65 мм. Предельной толщиной слоя, начинающего своим отрицательным зарядом экранировать положительный заряд осадительного электрода, можно считать толщину, примерно равную 5 мм [15]. Такой слой при указанной запыленности будет достигнут за ~ 8 ч работы филтра. Таким образом, аппарат может или очищаться периодически вручную, или иметь автоматическую систему очистки со сбором пыли в бункере путем встряхивания осадительных электродов.



Рис. 4. Фотография структуры осажденной пыли в лабораторном электрофилтре

Источник: фото С.В. Калашникова.

Заключение

На основании расчета было выяснено, что даже при степени очистки дыма электрофильтром 99 % его габариты будут вполне допустимыми для монтажа на частных котельных, например, взамен одной стандартной секции дымовой трубы. Как было показано, около 10 тыс. частных малых котельных г. Улан-Удэ выбрасывают в воздух до 7,5 тыс. т твердых частиц. Монтаж электрофильтров хотя бы на 50 % частных котельных, при указанной их степени улавливания, позволил бы снизить выбросы твердых частиц не менее чем на 3000–4000 т в год. Чтобы понять, насколько это много, можно рассмотреть следующую информацию: 1000 т золы при ее насыпной плотности 700 кг/м³ и при полном осаждении покроют площадь города 350 км² слоем в 4 мм.

Следует учитывать, что дровяные печи выбрасывают меньше твердых частиц и таких канцерогенов, как бензпирен, поэтому, несмотря на их большую долю в городе (77 %), именно рассмотренные угольные котлы обеспечивают львиную долю твердых выбросов. Выбросы в 2023 г. мелкодисперсных взвешенных частиц превысили ПДК в 4,7 раза³ [6], вместе с тем мероприятия по использованию электрофильтров в малых котельных дадут возможность привести к норме этот немаловажный фактор качества воздуха.

Однако оснащение даже 5000 частных котельных электрофильтрами довольно затруднительно, ибо ведет к дополнительным затратам домохозяйств и, вероятнее всего, возможно только при соответствующей инициативе местных органов власти. Приведем расчет примерной стоимости рассмотренного в проекте электрофильтра. Наиболее затратной статьей является источник питания с выходным напряжением 50 кВ и током до 7 мА. Для изготовления корпуса фильтра и осадительных электродов необходимо около 4,2 м² нержавеющей листовой стали, а также металлопрофили, метизы и изоляторы. Металлообработка, энергия, сборка, прибыль предприятия, накладные производственные расходы, включая заработную плату рабочим, — основная категория затрат, рассчитать которую достаточно трудно на данном этапе. Однако анализ показал, что стоимость электрофильтра, выпускающегося массово на одном из предприятий, уже специализирующихся на аналогичной продукции, может составлять не более 50 % стоимости твердотопливного котла, что хотя и затратно, но вполне позволительно ради дыхания чистым воздухом.

Такой электрофильтр может быть освоен, например, на ОАО «Улан-Удэнском приборостроительном производственном объединении», которое как раз освоило производство электрофильтров разработки ИФМ СО РАН для малых муниципальных котельных с производительностью по дыму 10–30 тыс. м³/ч.

³ Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Республики Бурятия в 2023 году» / Министерство природных ресурсов и экологии Республики Бурятия. Улан-Удэ, 2024. URL: <https://egov-buryatia.ru/mpr/files/%D0%93%D0%94%202023.pdf> (дата обращения: 24.01.2025).

Список литературы

- [1] Будилова Е.В., Лагутин М.Б. Загрязнение атмосферного воздуха и демографические показатели здоровья в городах России // Вестник Московского университета. Серия 23 : Антропология. 2021. № 4. С. 81–99. <https://doi.org/10.32521/2074-8132.2021.4.081-099> EDN: CRGERJ
- [2] Семикашиев В.В., Гайворонская М.С. Анализ текущего состояния и перспективы газификации России на период до 2030 г. // Проблемы прогнозирования. 2022. № 1. С. 91–100. <https://doi.org/10.47711/0868-6351-190-91-100> EDN: TYKYLO
- [3] Бреславский А.С. «Пригородная революция» в региональном срезе (Улан-Удэ) // Крестьяноведение. 2017. Т. 2. № 1. С. 90–101. <https://doi.org/10.22394/2500-1809-2017-2-1-90-101> EDN: ZCINAV
- [4] Урбанова Ч.Б., Бабииков В.А., Петров С.А., Гомбоев Б.О. Особенности загрязнения воздушного бассейна в городе Улан-Удэ // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2022. Т. 16. № 3. С. 103–109. <https://doi.org/10.31161/1995-0675-2022-16-4-103-109> EDN: JCXSJV
- [5] Урбанова Ч.Б., Бабииков В.А., Петров С.А., Гомбоев Б.О. Проблема загрязнения воздуха городской среды (на примере г. Улан-Удэ) // Природа внутренней Азии. 2022. № 4 (22). С. 133–137. <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2022-4-133-137> EDN: JFJXJW
- [6] Gomboev B.O., Dambueva I.K., Khankhareev S.S., Batomunkuev V.S., Zangeeva N.R., Tsydypov V.E., Sharaldaev B.B., Badmaev A.G., Zhamyanov D.Ts.-D., Bagaeva E.E., Madeeva E.V., Motoshkina M.A., Ayusheeva V.G., Rygzyunov T.S., Tsybikova A.B., Ayurzhanaev A.A., Sodnomov B.V., Banzaraktcaev Z.E., Alekseev A.V., Lygdenova A.B., Norboeva B.S. Atmospheric Air Pollution by Stationary Sources in Ulan-Ude (Buryatia, Russia) and Its Impact on Public Health // International Journal of Environmental Research and Public Health. Vol. 19. Iss. 24. Article no. 16385. <https://doi.org/10.3390/ijerph192416385> EDN: SKHZXT
- [7] Волкодаева М.В., Карелин А.О., Ломтев А.Ю., Канчан Я.С., Левкин А.В., Тимин С.Д. Учет выбросов загрязняющих веществ от автономных источников теплоснабжения индивидуальных жилых домов при проведении сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха для населенных пунктов // Гигиена и санитария. 2023. Т. 102. № 2. С. 141–147. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-2-141-147> EDN: NYBMYL
- [8] Базаров А.Б., Баранов А.О., Павлов В.Н., Слепенкова Ю.М., Тагаева Т.О. Анализ и прогноз состояния окружающей среды Республики Бурятия в новых условиях // Мир экономики и управления. 2022. Т. 22. № 2. С. 36–53. <https://doi.org/10.25205/2542-0429-2022-22-2-36-54> EDN: HOMIYP
- [9] Kubica R., Kiraga K., Jewiarz M., Pacura W., Domagala Ju., Tomasz M. Abating particulate emissions from small combustion installations: field testing of the micro-scale electrostatic precipitators // Applied Sciences (Switzerland). 2026. Vol. 16. No. 4. P. 2115. <https://doi.org/10.3390/app16042115> EDN: KLBWRG
- [10] Molchanov O., Krpec K., Horák J., Kuboňová L., Hopan F., Ryšavý J. Application and evaluation of electrostatic precipitation for control PM and NOx emissions from small-scale combustions // Fire. 2024. Vol. 7. No. 10. P. 356. <https://doi.org/10.3390/fire7100356> EDN: ASLSUX
- [11] Гузаев В.А., Троицкий А.А., Шастин С.Н. Реконструкция электрофильтров на базе современных технических решений // Экологический вестник России. 2012. Т. 7. С. 46–51. EDN: PCJCH
- [12] Xu X., Gao X., Yan P., Zhu W., Zheng C., Wang Y., Luo Z., Cen K. Particle migration and collection in a high-temperature electrostatic precipitator // Separation and Purification Technology. 2015. Vol. 143. P. 184–191. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.01.016>

- [13] *Jaworek A., Marchewicz A., Sobczyk A.T., Krupa A., Czech T.* Two-stage vs. single-stage electrostatic precipitators: comparison of collection efficiency for submicron particles // *Journal of Electrostatics*. 2019. Vol. 98. P. 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2019.02.004>.
- [14] *Chen B., Li H., He Yu., Liu B., Zhang L.* Study on performance of electrostatic precipitator under multi-physics coupling // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26. P. 35023–35033. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06623-8> EDN: EUWCGK
- [15] *Holubčík M., Čajová Kantová N., Trnka J., Jandačka J.* Decreasing solid aerosols from small heat sources using the optimized electrostatic precipitator // *Atmosphere*. 2022. Vol. 13. No. 9. P. 1438. <https://doi.org/10.3390/atmos13091438> EDN: DGGWUR

Сведения об авторах:

Калашников Сергей Васильевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физической электроники и радиофизики, Институт физического материаловедения СО РАН, Российская Федерация, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6. ORCID: 0000-0003-3272-0072; eLIBRARY SPIN-код: 3164-6450. E-mail: betch_kail@mail.ru

Номоев Андрей Валерьевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физического материаловедения, Институт физического материаловедения СО РАН, Российская Федерация, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6. ORCID: 0009-0000-6201-6743; eLIBRARY SPIN-код: 2781-4995. E-mail: nomoevav@mail.ru

Чимытов Тимур Андреевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физического материаловедения, Институт физического материаловедения СО РАН, Российская Федерация, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6. ORCID: 0000-0003-3264-7792; eLIBRARY SPIN-код: 1183-1501. E-mail: tchimytov@gmail.com

Южаков Илья Андреевич, инженер лаборатории физического материаловедения, Институт физического материаловедения СО РАН, Российская Федерация, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6. ORCID: 0009-0001-8315-3656; eLIBRARY SPIN-код: 4217-1049. E-mail: yuzhakov.0402@yandex.ru

Самбуу Мунхцэцэг, исследователь, Департамент физики, Отдел естественных наук, Школа искусств и наук, Национальный университет Монголии, Монголия, 14201, г. Улан-Батор, район Баянгол, 11-й хороо (микрорайон), местность Баруун Тасган, д. 976. ORCID: 0009-0005-6169-5293. E-mail: munkhtsetseg_s@num.edu.mn

Цырен-Очир Соел-Эрденэ, профессор, Департамент инженерии окружающей среды и лесного хозяйства, директор Центра экологических технологий и развития, Школа инженерии и технологий, Национальный университет Монголии, Монголия, 14201, г. Улан-Батор, район Баянгол, 11-й хороо (микрорайон), местность Баруун Тасган, д. 976. ORCID: 0000-0002-6356-1361. E-mail: soyol_erdene@num.edu.mn

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-3-391-406

EDN: FJONDR

УДК 628.35

Научная статья / Research article

Оценка содержания и миграции ионов тяжелых металлов в системе биологической очистки сточных вод с реализованным А2/О-процессом

А.Р. Новикова, Е.С. Балымова  

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань,
Российская Федерация
 ilc2013@inbox.ru

Аннотация. Оценка содержания ионов тяжелых металлов в компонентах системы биологической очистки сточных вод и изучение их миграции в процессе биоочистки является перспективным направлением исследований для обеспечения стабильности процесса очистки сточных вод, в связи с чем выбрано в качестве цели исследовательской работы. Объектом изучения являлись сточная вода и активный ил очистных сооружений Республики Татарстан с реализованным А2/О-процессом. Отбор проб проводился на каждом этапе технологического процесса, включая анаэробную, аноксидную, аэробную зоны и вторичный отстойник. Определение массовых концентраций металлов (Fe, Mn, Cu, Ni, Pb, Cd, Co, Cr, Zn) осуществлялось методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии. Установлено, что наибольшее содержание в активном иле и сточной воде характерно для ионов железа, марганца и цинка. Концентрация металлов в хлопьях активного ила значительно ниже нормативных требований. Выявлено, что аноксидная зона вносит наибольший вклад в мобилизацию тяжелых металлов, преимущественно за счет восстановления их до более подвижных форм в результате использования как альтернативных акцепторов электронов денитрифицирующими бактериями. Рассчитаны коэффициенты миграции металлов по зонам очистки, максимальный коэффициент характерен для середины оксидной зоны узла биологической очистки (на примере ионов железа). Накопление металлов в биомассе является потенциальным источником загрязнения при утилизации ила и рециркуляции биомассы с высоким содержанием ионов металлов в хлопьях активного ила как скрытый дестабилизирующий фактор процесса биоочистки.

Ключевые слова: 2/О-процесс, активный ил, пламенная атомно-абсорбционная спектроскопия, денитрификация, мобилизация металлов

Вклад авторов. Новикова А.Р. — проведение экспериментов, написание статьи, подготовка иллюстраций. Балымова Е.С. — идея эксперимента, планирование и проведение исследования, подготовка иллюстраций, научное руководство. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

© Новикова А.Р., Балымова Е.С., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных. Данные, использованные в этом исследовании, могут быть предоставлены авторами по обоснованному запросу в связи с необходимостью соблюдения конфиденциальности участников.

История статьи: поступила в редакцию 14.03.2026; доработана после рецензирования 30.03.2026; принята к публикации 08.04.2026.

Для цитирования: Новикова А.Р., Балымова Е.С. Оценка содержания и миграции ионов тяжелых металлов в системе биологической очистки сточных вод с реализованным А2/О-процессом // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 3. С. 391–406. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-391-406> EDN: FJONDR

Assessment of heavy metal ion content and migration in wastewater biological treatment system with implemented A2/O-process

Aigul R. Novikova, Elena S. Balymova  

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

 ilc2013@inbox.ru

Abstract. The assessment of heavy metal ion content in the components of a biological wastewater treatment system and the study of their migration during biological treatment is a promising research area for ensuring the stability of the wastewater treatment process, and therefore was chosen as the objective of this study. The study focused on wastewater and activated sludge from treatment facilities in the Republic of Tatarstan using the Anaerobic-Anoxic-Oxic-process (A2/O-process). Sampling was conducted at each stage of the process, including the anaerobic, anoxic, and aerobic zones and the secondary clarifier. Mass concentrations of metals (Fe, Mn, Cu, Ni, Pb, Cd, Co, Cr, and Zn) were determined using flame atomic absorption spectrometry. Iron, manganese, and zinc ions were found to have the highest concentrations in activated sludge and wastewater. The concentration of metals in activated sludge flocs was significantly lower than regulatory requirements. It was found that the anoxic zone makes the greatest contribution to heavy metal mobilization, primarily due to their reduction to more mobile forms as a result of their use by denitrifying bacteria as alternative electron acceptors. Metal migration coefficients were calculated for each treatment zone, with the maximum coefficient observed in the middle of the oxide zone of the biological treatment unit (using iron ions as an example). The accumulation of metals in biomass is a potential source of pollution during sludge disposal and the recirculation of biomass with high metal ion content in activated sludge flocs, acting as a hidden destabilizing factor in the biological treatment process.

Keywords: A2/O-process, activated sludge, flame atomic absorption spectrometry, denitrification, metal mobilization

Authors' contribution. *A.R. Novikova* — conducting experiments, writing the article, preparing illustrations. *E.S. Balymova* — idea of the experiment, planning and conducting the research, preparing illustrations, scientific supervision. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability. The data used in this study are available from the authors upon reasonable request due to the need to maintain the confidentiality of the participants.

Article history: received 14.03.2026; revised 30.03.2026; accepted 08.04.2026.

For citation: Novikova AR, Balymova ES. Assessment of heavy metal ion content and migration in wastewater biological treatment system with implemented A2/O-process. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(3):391–406. (In Russ.). <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-391-406> EDN: FJONDR

Введение

Ионы тяжелых металлов (ИТМ), такие как Pb^{2+} , Hg^{2+} , Cd^{2+} , As^{3+} , As^{5+} , Cr^{3+} , Cr^{6+} , обладают высокой токсичностью для живых организмов и способны накапливаться в объектах окружающей среды, создавая долгосрочные и нередко скрытые экологические риски [1-3]. К основным источникам загрязнения относятся промышленные выбросы (металлургия, горнодобывающая отрасль [4]), сточные воды (химические производства, металлургия, сельское хозяйство [5]) и атмосферные осадки с частицами пыли и аэрозолей [6]. В связи с этим ключевыми зонами риска являются водоемы в развитых промышленных регионах. Опасность ИТМ обусловлена биохимическими механизмами и устойчивостью в экосистемах [7]. При высоких концентрациях ИТМ нарушаются клеточные процессы с образованием активных форм кислорода, происходит блокировка ферментативных систем с нарушением метаболизма и репродуктивных функций бактериальных клеток, так как тяжелые металлы связываются с белками и нуклеиновыми кислотами, изменяя их структуру [7–9].

Для снижения опасности накопления тяжелых металлов и нагрузки на окружающую природную среду особое внимание следует уделить мониторингу качества сточных вод после биологической очистки, так как это прямой путь поступления ИТМ в природные водоемы. Их содержание в различных типах вод может варьироваться в значительном диапазоне в связи с широким применением металлов в промышленности, например, в сточных водах химической и нефтехимической промышленности содержатся ионы Cd^{2+} в кон-

центрации 0,001–0,2 мг/дм³; Pb²⁺ — 0,01–1,5 мг/дм³; Cr⁶⁺ — 0,02–0,8 мг/дм³; Ni²⁺ — 0,05–2,0 мг/дм³ [10]. Рост урбанизации и индустриализации привел к повышенному загрязнению водных ресурсов ИТМ, что представляет серьезную угрозу для здоровья человека и экосистем. Тяжелые металлы не поддаются биоразложению и могут накапливаться в окружающей природной среде, достигая опасных концентраций в живых организмах [11]. Учитывая опасность тяжелых металлов для объектов окружающей среды, следует проводить контроль за поступлением их со сточными водами, их воздействием на активный ил, осуществляющий очистку, и накоплением металлов в биомассе ила.

Цель исследования — оценка содержания тяжелых металлов в компонентах системы биологической очистки и изучение их миграции в процессе биоочистки.

Задачи, решаемые в работе:

- 1) оценка содержания тяжелых металлов в активном иле и сточных водах в процессе водоочистки (до и после);
- 2) оценка накопления и миграции тяжелых металлов в компонентах системы биологической очистки на примере очистных сооружений с реализованным А2/О-процессом.

Очистные сооружения служат эффективной линией защиты от загрязнения ИТМ, поскольку предназначены для удаления загрязняющих веществ из сточных вод в результате протекающих физико-химических и биохимических процессов. Однако сами очистные сооружения могут стать потенциальными источниками загрязнения тяжелыми металлами, если эффективность процесса недостаточна.

Одним из эффективных процессов с высокой адаптивностью к региональным условиям и сочетанием стабильности традиционной биологической очистки с возможностями глубокой денитрификации и дефосфатации является А2/О-процесс¹ [12]. Процесс А2/О в последние годы широко используется для очистки муниципальных и промышленных сточных вод в России, однако сведения о влиянии и эффективности очистки сточных вод от ИТМ, содержании их в компонентах системы биоочистки единичны или полностью отсутствуют. Для классического процесса биологической очистки (с аэробной зоной) эффективность очистки от ИТМ составляет в среднем 40–65 % (табл. 1)².

¹ ИТС 10-2019 Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов : информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Москва : Бюро НДТ, 2019. 417 с.

² Никифорова Л.О., Белопольский Л.М. Влияние тяжелых металлов на процессы биохимического окисления органических веществ: теория и практика. Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 78 с. EDN: QNMTZT

Таблица 1. Эффективность очистки сточных вод и предельно допустимая концентрация для биологической очистки (ПДК_{БОВ})

Ион металла	ПДК _{БОВ} , мг/дм ³	Эффективность удаления на биологических очистных сооружениях, %
Fe ³⁺	5	65
Mn ²⁺	30	Нет данных
Zn ²⁺	1	6
Ni ²⁺	0,5	40
Pb ²⁺	0,1	40
Cu ²⁺	0,5	65
Cr ³⁺	2,5	65
Cr ⁶⁺	–	50
Co ²⁺	1,0	40
Cd ²⁺	0,1	50

Примечание. БОВ — биологическая очистка воды.

Источник: составлено А.Р. Новиковой, Е.С. Балымовой.

Table 1. Efficiency of wastewater treatment and maximum permissible concentration for biological treatment (MPC_{BWT})

Metal ion	MPC _{BWT} , mg/l	Removal efficiency at biological treatment plants, %
Fe ³⁺	5	65
Mn ²⁺	30	No data
Zn ²⁺	1	6
Ni ²⁺	0.5	40
Pb ²⁺	0.1	40
Cu ²⁺	0.5	65
Cr ³⁺	2.5	65
Cr ⁶⁺	–	50
Co ²⁺	1.0	40
Cd ²⁺	0.1	50

Note. BWT — biological wastewater treatment.

Source: compiled by A.R. Novikova, E.S. Balymova.

Материалы и методы

Объектом исследования являлись сточная вода и активный ил, отобран- ные на действующих очистных сооружениях Республики Татарстан с реали- зованным А2/О-процессом, схема которых представлена на рис. 1. Проведен анализ 72 образцов сточной воды (до и после очистки) и 36 образцов активно- го ила, отобранных в течение одного года исследований.

Пробы отбирались на различных этапах процесса очистки с учетом гидродинамики процесса (табл. 2). Осуществлен анализ 27 образцов сточ- ной воды и 21 образца активного ила, отобранных с учетом гидродинамики А2/О-процесса.

Определение массовой концентрации активного ила проводили грави- метрическим методом по ФР 1.31.2008.04397.

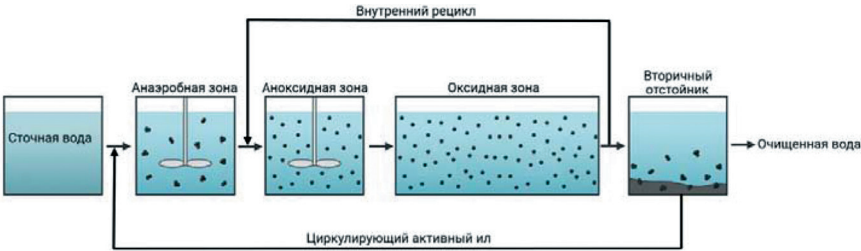


Рис. 1. Схема узла биологической очистки очистных сооружений с реализованным А2/О-процессом
Источник: составлено А.Р. Новиковой, Е.С. Балымовой.

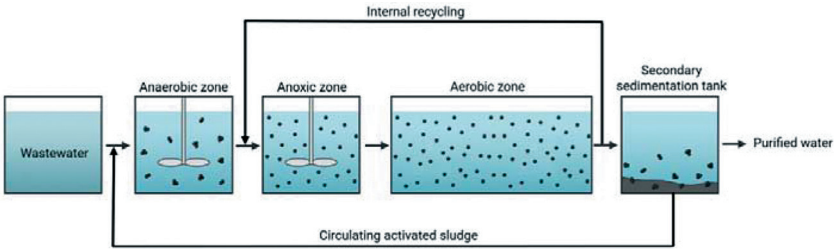


Figure 1. Schematic diagram of the biological treatment unit of a wastewater treatment plant with the implemented A2/O process
Source: compiled by A.R. Novikova, E.S. Balymova.

Таблица 2. Места отбора проб

Место отбора проб	Сточная вода	Активный ил
Сточная вода на входе в анаэробную зону	+	–
Рецикл активного ила со вторичных отстойников	+	+
Анаэробная зона (середина)	+	+
Аноксидная зона (вход, после смешения с внутренним рециклом)	+	+
Аноксидная зона (выход)	+	+
Оксидная зона (середина)	+	+
Оксидная зона (выход)	+	+
Внутренний рецикл	+	+
Очищенная вода	+	–

Примечание: «+» — проба отбиралась; «–» — проба отсутствует.
Источник: составлено А.Р. Новиковой, Е.С. Балымовой.

Table 2. Sampling locations

Sampling location	Wastewater	Activated sludge
Wastewater entering the anaerobic zone	+	–
Recycling of activated sludge from secondary settling tanks	+	+
Anaerobic zone (middle)	+	+
Anoxic zone (inlet, after mixing with internal recycle)	+	+
Anoxic zone (exit)	+	+
Oxide zone (middle)	+	+
Oxide zone (output)	+	+
Internal recycling	+	+
Treated wastewater	+	–

Note: «+» — sample was taken; «–» — sample is missing.
Source: compiled by A.R. Novikova, E.S. Balymova.

Определение массовых концентраций металлов (железа, кадмия, кобальта, марганца, меди, никеля, свинца, хрома и цинка) в пробах сточных вод по ПНД Ф 14.1:2:4.139-98 и вытяжек из активного ила по ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3-36-2002 проводили методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) на спектрофотометре SHIMADZU AA-7000 [13].

Миграция тяжелых металлов в компонентах системы биологической очистки оценивалась путем расчета коэффициентов распределения металлов (K_d), которые определялись как отношение концентрации металла в активном иле (C_s) к концентрации металла в сточной воде (C_w).

Аналитические измерения проводили в трех параллельных пробах для каждого образца. Для оценки точности результатов рассчитывали суммарную стандартную относительную неопределенность измерений. Статистическую значимость различий между сериями измерений определяли с применением парного t -критерия Стьюдента. Доверительные интервалы для средних значений устанавливали при $p \leq 0,05$. Все вычисления осуществлялись с использованием программного пакета Statistica 13.3.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные исследования осуществлялись на очистных сооружениях, использующих А2/О-процесс для очистки бытовых и промышленных сточных вод в Республике Татарстан. Усредненные результаты определения ионов тяжелых металлов в сточных водах (до и после очистки) и активном иле приведены в табл. 3.

Сточные воды после очистки на изучаемых очистных сооружениях согласно нормам по железу, марганцу и цинку можно отнести к недостаточно очищенным. Для свинца, кадмия и хрома характерны минимальные концентрации как в исследуемых сточных водах, так и в активном иле. Во всех пробах наибольшее содержание среди всех определяемых ИТМ характерно для железа, марганца и цинка, а в пробах активного ила дополнительно — медь, никель и кобальт. Концентрация меди во всех исследованных пробах ила варьируется в пределах 50–150 мг/кг, это значение ниже критического (500 мг/кг по исследованиям Н.С. Жмур) [14]. Концентрация ИТМ в хлопьях активного ила значительно ниже нормы, предъявляемой к осадкам сточных вод. Необходимо отметить, что при минимальных концентрациях меди и кобальта в поступающих и очищенных сточных водах отмечено их накопление в хлопьях активного ила. Это свидетельствует о периодическом (возможно залповом) кратковременном поступлении данных металлов со сточными водами, вероятно, не регистрируемом в рамках производственного лабораторного контроля. Такой фактор может приводить к дестабилизации биологической очистки сточных вод.

Таблица 3. Усредненное содержание металлов в сточных водах и активном иле за период исследования

Металл	Концентрация, мг/дм³		ПДК _{рх}	Активный ил	Концентрация, мг/кг сухого вещества			
	Сточная вода до очистки	Сточная вода после очистки			Требования			
					ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 для I группы осадков	для II группы осадков	для биологической рекультивации	ГОСТ Р 54534-2011 для технической рекультивации
Fe	0,16 ± 0,03	0,10 ± 0,03	0,1 0,05*	1686,27 ± 505,88	–	–	–	–
Mn	0,046 ± 0,013	0,024 ± 0,007	0,01 0,05*	2234,89 ± 670,47	–	–	–	–
Zn	0,066 ± 0,018	0,060 ± 0,017	0,01 0,05*	852,61 ± 255,78	1750	3500	3500	7000
Ni	0,015 ± 0,001	<0,01	0,01 0,01*	183,12 ± 54,94	200	400	400	800
Pb	<0,005	<0,005	0,006 0,01*	<10	250	500	500	1000
Cu	<0,01	<0,01	0,001 0,005*	150,46 ± 45,14	750	1500	750	1500
Cr	<0,01	<0,01	0,02 (Cr ⁶⁺) 0,07 (Cr ³⁺)	<5	500	1000	1000	2000
Co	<0,01	<0,01	0,01 0,005*	8,58 ± 2,57	–	–	–	–
Cd	<0,0025	<0,0025	0,005 0,01*	<1	15	30	30	60

Примечания: ПДК_{рх} — предельно допустимая концентрация загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения; * — норматив для морской воды.
Источник: составлено А.Р. Новиковой, Е.С. Бальмовой.

Table 3. Average content of metals in wastewater and activated sludge during the study period

Metal	Concentration, mg/l		MPC _н	Activated sludge	Concentration, mg/kg dry matter			
	Wastewater before treatment	Wastewater after treatment			Requirements			
					GOST R 17.4.3.07-2001			
					for precipitation group I	for precipitation group II	GOST R 54534-2011 for technical reclamation	
Fe	0.16 ± 0.03	0.10 ± 0.03	0.1 0.05*	1686.27 ± 505.88	–	–	–	
Mn	0.046 ± 0.013	0.024 ± 0.007	0.01 0.05*	2234.89 ± 670.47	–	–	–	
Zn	0.066 ± 0.018	0.060 ± 0.017	0.01 0.05*	852.61 ± 255.78	1750	3500	7000	
Ni	0.015 ± 0.001	< 0.01	0.01 0.01*	183.12 ± 54.94	200	400	800	
Pb	< 0.005	< 0.005	0.006 0.01*	< 10	250	500	1000	
Cu	< 0.01	< 0.01	0.001 0.005*	150.46 ± 45.14	750	1500	1500	
Cr	< 0.01	< 0.01	0.02 (Cr ⁶⁺) 0.07 (Cr ³⁺)	< 5	500	1000	2000	
Co	< 0.01	< 0.01	0.01 0.005*	8.58 ± 2.57	–	–	-	
Cd	< 0.0025	< 0.0025	0.005 0.01*	< 1	15	30	60	

Notes: MPC_{Fi} — maximum permissible concentration of pollutants in waters of water bodies of fishery importance; * — standard for sea water.
Source: compiled by A.R. Novikova, E.S. Balyмова.

На следующем этапе оценили возможную миграцию ИТМ в процессе биочистки. Результаты исследований (табл. 4) показали, что поступающая на очистку сточная вода содержала значительные концентрации тяжелых металлов, наиболее значимые концентрации характерны для железа, марганца, цинка и никеля.

Максимальное накопление железа и марганца в биомассе наблюдается в анаэробной и аэробной зонах, резкое снижение содержания этих металлов в активном иле на выходе из аноксидной зоны (в 20–25 раз для железа) указывает на процессы высвобождения ИТМ, так как денитрифицирующие бактерии используют железо (III) и марганец (IV) как альтернативные акцепторы электронов, восстанавливая их до более подвижных форм (Fe^{2+} , Mn^{2+}). Концентрации в очищенной воде стабильны и близки к исходным, что свидетельствует о преобладании сорбционных механизмов удаления. Однако динамическое равновесие между сорбцией и десорбцией может привести к вторичному загрязнению при нарушении гидродинамического режима.

Цинк, никель и медь демонстрируют сходную динамику в процессе очистки с максимальной сорбцией в анаэробной зоне, снижением в аноксидной, повторным ростом в аэробной. Концентрации в очищенной воде находятся ниже пределов обнаружения для меди и никеля или близки к фоновым для цинка, что подтверждает высокую эффективность биосорбции, так как в аэробных условиях увеличивается продукция внеклеточных полисахаридов с высоким содержанием функциональных групп, способных к комплексообразованию. Доступность и содержание карбоксильных групп заметно влияет на связывание металлов и усиливается при уменьшении степени этерификации макромолекулы, при переходе от групп $-\text{COOCH}_3$ в группы $-\text{COOH}$ [15].

Концентрации свинца, кадмия, хрома и кобальта в сточной воде и активном иле во всех пробах находятся ниже пределов обнаружения методов атомно-абсорбционной спектроскопии. Это может свидетельствовать как о низком исходном содержании данных элементов в сточных водах предприятия, так и об их эффективном связывании на предшествующих стадиях очистки (механической, физико-химической).

Во вторичном отстойнике происходит гравитационное разделение фаз (активный ил и сточная вода), что обеспечивает концентрирование ИТМ в циркулирующем активном иле. Рецикл активного ила создает замкнутый цикл миграции металлов, повышая общую эффективность их улавливания. Избыточный ил, удаляемый из системы, представляет собой потенциальный источник вторичного загрязнения и требует специальных методов утилизации (стабилизация, термическая обработка, захоронение).

Коэффициент миграции металлов является важным показателем эффективности очистки сточных вод от тяжелых металлов. Изменение коэффициента миграции по зонам биологической очистки отражает различные механизмы связывания металлов в каждой зоне А2/О-процесса. Расчетный коэффициент миграции для железа (в качестве примера) по зонам биологической очистки представлен на рис. 2.

Таблица 4. Содержание тяжелых металлов в сточных водах и активном иле, отобранных с учетом гидродинамики процесса очистки

Проба		Концентрация, мг/дм³									
		Fe	Mn	Zn	Ni	Pb	Cu	Cr	Co	Cd	
Сточная вода на входе в анаэробную зону	СВ	0,43 ± 0,09	0,14 ± 0,03	0,066 ± 0,018	0,018 ± 0,001	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0025	
	АИ	0,34 ± 0,07	0,14 ± 0,03	0,053 ± 0,015	0,010 ± 0,004	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0025	
Рецикл активного ила со вторичных отстойников	СВ	527,80 ± 158,34	975,25 ± 292,58	256,06 ± 76,82	49,98 ± 14,99	< 10	56,51 ± 16,95	< 5	< 5	< 1	
	АИ	0,31 ± 0,06	0,15 ± 0,03	0,072 ± 0,020	0,020 ± 0,006	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0025	
Анаэробная зона (середина)	СВ	1974,20 ± 592,26	1195,96 ± 358,79	1026,89 ± 308,07	281,71 ± 84,51	< 10	157,57 ± 47,27	< 5	8,34 ± 2,502	< 1	
	АИ	0,10 ± 0,03	0,089 ± 0,025	0,052 ± 0,015	0,022 ± 0,006	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0025	
Аноксидная зона (вход, после смешения с внутренним рециклом)	СВ	1454,87 ± 436,46	922,90 ± 276,87	219,38 ± 65,81	168,80 ± 50,64	< 10	150,71 ± 45,21	< 5	9,40 ± 2,82	< 1	
	АИ	0,12 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,049 ± 0,014	0,015 ± 0,004	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0025	
Аноксидная зона (выход)	СВ	68,89 ± 20,67	516,92 ± 155,08	249,34 ± 74,80	55,33 ± 16,60	< 10	30,68 ± 9,20	< 5	< 5	< 1	
	АИ	0,066 ± 0,018	0,12 ± 0,02	0,074 ± 0,021	0,019 ± 0,005	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0025	
Оксидная зона (середина)	СВ	1686,27 ± 505,88	2234,89 ± 670,47	852,61 ± 255,78	183,12 ± 54,94	< 10	150,46 ± 45,14	< 5	8,58 ± 2,57	< 1	
	АИ	0,13 ± 0,03	0,12 ± 0,03	0,069 ± 0,019	< 0,01	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0025	
Оксидная зона (выход)	СВ	1478,59 ± 443,58	2029,56 ± 608,87	871,49 ± 261,45	196,68 ± 59,00	< 10	150,08 ± 45,02	< 5	8,36 ± 2,51	< 1	
	АИ	0,15 ± 0,03	0,10 ± 0,02	0,088 ± 0,025	< 0,01	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0025	
Внутренний рецикл	СВ	1055,03 ± 316,51	1114,28 ± 334,28	154,27 ± 46,28	159,50 ± 47,85	< 10	136,80 ± 41,04	< 5	6,49 ± 1,95	< 1	
	АИ	0,13 ± 0,03	0,091 ± 0,025	0,080 ± 0,022	< 0,01	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0025	

Примечания: СВ — сточная вода; АИ — активный ил.
Источник: составлено А.Р. Новиковой, Е.С. Бальмовой.

Table 4. Content of heavy metals in wastewater and activated sludge, selected taking into account the hydrodynamics of the treatment process

Sample		Concentration, mg/l								
		Fe	Mn	Zn	Ni	Pb	Cu	Cr	Co	Cd
Wastewater entering the anaerobic zone	VW	0.43 ± 0.09	0.14 ± 0.03	0.066 ± 0.018	0.018 ± 0.001	< 0.005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.0025
	AS	527.80 ± 158.34	975.25 ± 292.58	256.06 ± 76.82	49.98 ± 14.99	< 10	56.51 ± 16.95	< 5	< 5	< 1
Recycling of activated sludge from secondary settling tanks	VW	0.34 ± 0.07	0.14 ± 0.03	0.053 ± 0.015	0.010 ± 0.004	< 0.005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.0025
	AS	1974.20 ± 592.26	1195.96 ± 358.79	1026.89 ± 308.07	281.71 ± 84.51	< 10	157.57 ± 47.27	< 5	8.34 ± 2.502	< 1
Anaerobic zone (middle)	VW	0.31 ± 0.06	0.15 ± 0.03	0.072 ± 0.020	0.020 ± 0.006	< 0.005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.0025
	AS	1974.20 ± 592.26	1195.96 ± 358.79	1026.89 ± 308.07	281.71 ± 84.51	< 10	157.57 ± 47.27	< 5	8.34 ± 2.502	< 1
Anoxic zone (inlet, after mixing with internal recycle)	VW	0.10 ± 0.03	0.089 ± 0.025	0.052 ± 0.015	0.022 ± 0.006	< 0.005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.0025
	AS	1454.87 ± 436.46	922.90 ± 276.87	219.38 ± 65.81	168.80 ± 50.64	< 10	150.71 ± 45.21	< 5	9.40 ± 2.82	< 1
Anoxic zone (exit)	VW	0.12 ± 0.02	0.11 ± 0.02	0.049 ± 0.014	0.015 ± 0.004	< 0.005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.0025
	AS	68.89 ± 20.67	516.92 ± 155.08	249.34 ± 74.80	55.33 ± 16.60	< 10	30.68 ± 9.20	< 5	< 5	< 1
Oxide zone (middle)	VW	0.066 ± 0.018	0.12 ± 0.02	0.074 ± 0.021	0.019 ± 0.005	< 0.005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.0025
	AS	1686.27 ± 505.88	2234.89 ± 670.47	852.61 ± 255.78	183.12 ± 54.94	< 10	150.46 ± 45.14	< 5	8.58 ± 2.57	< 1
Oxide zone (output)	VW	0.13 ± 0.03	0.12 ± 0.03	0.069 ± 0.019	< 0.01	< 0.005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.0025
	AS	1478.59 ± 443.58	2029.56 ± 608.87	871.49 ± 261.45	196.68 ± 59.00	< 10	150.08 ± 45.02	< 5	8.36 ± 2.51	< 1
Internal recycling	VW	0.15 ± 0.03	0.10 ± 0.02	0.088 ± 0.025	< 0.01	< 0.005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.0025
	AS	1055.03 ± 316.51	1114.28 ± 334.28	154.27 ± 46.28	159.50 ± 47.85	< 10	136.80 ± 41.04	< 5	6.49 ± 1.95	< 1
Treated wastewater	VW	0.13 ± 0.03	0.091 ± 0.025	0.080 ± 0.022	< 0.01	< 0.005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.0025

Notes: VW — wastewater, AS — activated sludge.
Source: compiled by A.R. Novikova, E.S. Balymova.

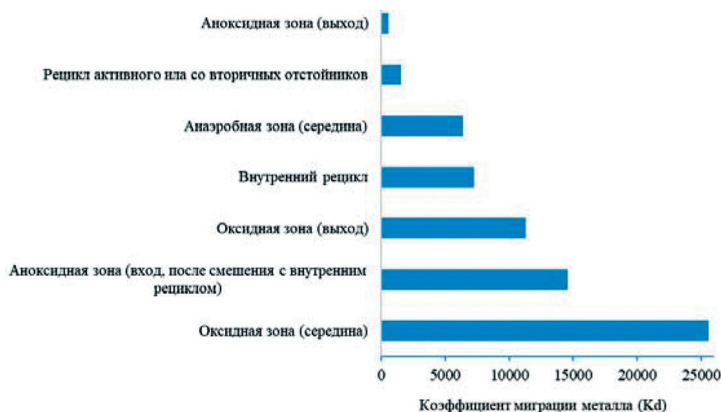


Рис. 2. Коэффициент миграции железа по зонам биологической очистки

Источник: составлено А.Р. Новиковой, Е.С. Балымовой.

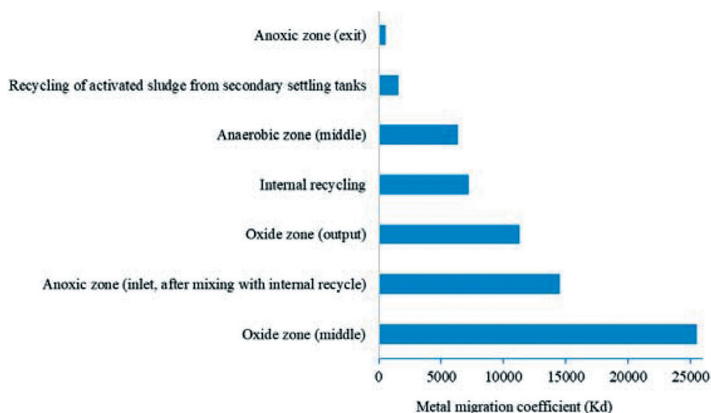


Figure 2. Iron migration coefficient by biological treatment zones

Source: compiled by A.R. Novikova, E.S. Balymova.

Высокие значения K_d свидетельствуют о преобладании процессов сорбции и иммобилизации металлов в биомассе ила, тогда как низкие значения указывают на переход металлов в растворенную форму. Можно отметить, что на выходе из аноксидной зоны происходит резкое падение K_d , это указывает на необходимость строгого контроля соотношения нитрат-ионов и органического субстрата для предотвращения вторичного загрязнения ИТМ. Оксидная зона обеспечивает наиболее надежное связывание железа, это подтверждают максимальные значения K_d . Потоки рецикла (внутренний рецикл и циркулирующий активный ил) являются буферной системой с умеренными значениями K_d , что свидетельствует о стабильности процесса и способности системы компенсировать локальные колебания.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что система биологической очистки с реализованным А2/О-процессом является эффективной в удалении тяжелых металлов из сточных вод. Аноксидная зона играет ключевую роль в мобилизации металлов, а в оксидной зоне происходит свя-

зывание тяжелых металлов с экзополисахаридным матриксом активного ила. При сорбции тяжелых металлов возможно их накопление в концентрации, при которой они будут токсикантами для бактерий активного ила. В настоящее время эти концентрации не определены, что является скрытым риском для системы биологической очистки при рециркуляции ила с высоким содержанием ИТМ [14]. Накопление тяжелых металлов в биомассе также является потенциальным источником загрязнения окружающей природной среды, особенно в случае использования избыточного ила для рекультивации или в качестве удобрения.

Заключение

Оценено содержание ИТМ в активном иле и сточных водах в процессе водоочистки очистных сооружений с реализованным А2/О-процессом. Для свинца, кадмия и хрома характерны минимальные концентрации. Во всех пробах наибольшее содержание среди всех определяемых металлов характерно для железа, марганца и цинка.

Оценена миграция металлов в компонентах системы биологической очистки очистных сооружений с реализованным А2/О-процессом. Оксидная зона обеспечивает наиболее надежное связывание ионов железа (максимальные значения K_d).

Рекомендовано проводить мониторинг аноксидной зоны из-за риска вторичного загрязнения ИТМ, а также входной контроль токсичных микроэлементов (Pb, Cd, Cr), поскольку их присутствие даже в следовых количествах может ингибировать ключевые группы микроорганизмов (нитрификаторов, денитрификаторов).

Список литературы / References

- [1] Parray JA, Shameem N, Haghi AK. *Sustainable Urban Environment and Waste Management*. Singapore: Springer Nature; 2025. <https://doi.org/10.1007/978-981-96-1140-9> EDN: KHFЕНО
- [2] Hussain I, Majeed A, Al-Rawi SS, Ibrahim AH, Iqbal MA, Hanif A, Asad M, Ahmad F, Shahzadi A, Haider MT. From wastewater to sustainability: tackling heavy metal contamination in agriculture with conventional and AI techniques. *Chemistry Africa*. 2025;8(5):1743–1762. <http://doi.org/10.1007/s42250-025-01311-2> EDN: KHFЕНО
- [3] Tolkachev GYu, Korzhenevskiy BI, Kolomiitsev NV. Features of the study contamination of sediments by the trace elements. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2024;32(4):325–336. (In Russ.). <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-4-325-336> EDN: MSXQQH
 Толкачев Г.Ю., Корженевский Б.И., Коломийцев Н.В. Особенности изучения загрязнения микроэлементами донных отложений водных объектов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 4. С. 325–336. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-4-325-336> EDN: MSXQQH

- [4] Rajan M, Karunanidhi D, Jaya J, Preethi B, Subramani T, Aravinthasamy P. A comprehensive review on human health hazards due to groundwater contamination: a global perspective. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2024;135:103637. <http://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103637> EDN: XHRLNM
- [5] Rule KL, Comber SDW, Ross D, Thornton A, Makropoulos CK, Rautiu R. Diffuse sources of heavy metals entering an urban wastewater catchment. *Chemosphere*. 2006;63(1):64–72. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.07.052> EDN: KIAAAB
- [6] Sachdev S, Ansari SA, Ansari MI, Fujita M, Hasanuzzaman M. Abiotic stress and reactive oxygen species: generation, signaling, and defense mechanisms. *Antioxidants*. 2021;10(2):277. <http://doi.org/10.3390/antiox10020277> EDN: ZNNXOM
- [7] Kaleem Z, Xu W, Ulhassan Z, Shahbaz H, He D, Naeem S, Ali S, Shah AM, Sheteiwiy MS, Zhou W. Harnessing the potential of copper-based nanoparticles in mitigating abiotic and biotic stresses in crops. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024;31:59727–59748. <http://doi.org/10.1007/s11356-024-35174-w> EDN: XLSEAU
- [8] Akhmadullina FYu, Balymova ES, Zakirov RK. New organizational principles of combined treatment of the electroplating industry wastewater. *Tsvetnye Metally*. 2019;10:85–91. (In Russ.) <http://doi.org/10.17580/tsm.2019.10.14> EDN: GTGYQO
Ахмадуллина Ф.Ю., Балымова Е.С., Закиров Р.К. Новые принципы организации комбинированной совместной очистки сточных вод гальванопроизводства // Цветные металлы. 2019. № 10. С. 85–91. <http://doi.org/10.17580/tsm.2019.10.14> EDN: GTGYQO
- [9] Ejaz U, Khan SM, Khalid N, Ahmad Z, Jehangir S, Rizvi ZF, Lho LH, Han H, Raposo A. Detoxifying the heavy metals: a multipronged study of tolerance strategies against heavy metals toxicity in plants. *Frontiers in Plant Science*. 2023;14:37251771. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1154571> EDN: TZJAJ5
- [10] Teplay GA. Heavy metals as a factor of environmental pollution (review). *Astrakhan Bulletin of Ecological Education*. 2013;(1):182–192. (In Russ.) EDN: PXNTRR
Теплая Г.А. Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды (обзор литературы) // Астраханский вестник экологического образования. 2013. № 1 (23). С. 182–192. EDN: PXNTRR
- [11] Ali H, Khan E, Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*. 2019;2019:6730305. <http://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- [12] Guo H, Yao H-Y, Huang Qi-Qi, Li T, Show De-Ya, Ling M, Yan Yu-G, Show K-Ye, Lee D-J. Anaerobic-anoxic-oxic biological treatment of high-strength, highly recalcitrant polyphenylene sulfide wastewater. *Bioresource Technology*. 2023;371:128640. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128640> EDN: WXQJRJ
- [13] Kochanov MA, Ladonin DV. Determination of the content of mobile forms of heavy metals by atomic absorption spectrometry with various types of atomization. *RosAgrohimsluzhba: Pochvy. Udobreniya. Urozhaj*. 2025;5(5):18–22. (In Russ.) EDN: PDFFRM
Кочанов М.А., Ладонин Д.В. Определение содержания подвижных форм тяжелых металлов методами атомно-абсорбционной спектроскопии с различными типами атомизации // РосАгрохимслужба: Почвы. Удобрения. Урожай. 2025. № 5 (5). С. 18–22. EDN: PDFFRM
- [14] Zhmur NS. *Technological and biochemical processes for wastewater treatment at facilities with aeration tanks (Tekhnologicheskie i biokhimicheskie protsessy ochistki stochnykh vod na sooruzheniyakh s aerotenkami)*. Moscow: AKVAROS Publ.; 2003. (In Russ.) EDN: QNKHHB
Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. Москва : АКВАРОС. 2003. 512 с. EDN: QNKHHB

- [15] Abarca-Cabrera L, Fraga-García P, Berensmeier S. Bio-nano interactions: binding proteins, polysaccharides, lipids and nucleic acids onto magnetic nanoparticles. *Biomaterials Research*. 2021;12(25):18. <https://doi.org/10.1186/s40824-021-00212-y>

Сведения об авторах:

Новикова Айгуль Рафаэлевна, аспирант кафедры промышленной биотехнологии, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Российская Федерация, 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68. E-mail: aignovikova@yandex.ru

Балымова Елена Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной биотехнологии, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Российская Федерация, 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68. ORCID: 0000-0002-4268-7600; eLIBRARY SPIN-код: 8906-5120. E-mail: ilc2013@inbox.ru

Bio notes:

Aigul R. Novikova, postgraduate student of Department of Industrial Biotechnology, Kazan National Research Technological University, 68 Karl Marx St, Kazan, 420015, Russian Federation. E-mail: aignovikova@yandex.ru

Elena S. Balymova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial Biotechnology, Kazan National Research Technological University, 68 Karl Marx St, Kazan, 420015, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-4268-7600; eLIBRARY SPIN-code: 8906-5120. E-mail: ilc2013@inbox.ru

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-3-407-420

EDN: FLXONB

УДК 504.054/.064.2

Научная статья / Research article

Моделирование распространения угольной пыли при функционировании АО «Порт Ванино» до и после установки ветро-пылезащитного экрана

А.И. Лукьянов^{id}✉, Е.В. Дахова^{id}, Л.П. Майорова^{id}

Тихоокеанский государственный университет имени М.П. Даниловского, Хабаровск,
Российская Федерация
✉008362@togudv.ru

Аннотация. Актуальность работы определяется необходимостью обеспечения экологической безопасности при перевалке угля на неспециализированном терминале АО «Порт Ванино». Уровень загрязнения атмосферного воздуха пылью угольной в жилой зоне поселка и над акваторией бухты Ванина определялся на основе моделирования рассеивания выбросов в атмосфере в программе УПРЗА «Эколог-4.6». Учен 91 источник выбросов пыли угольной. Рассмотрено 10 вариантов организации работ. Расчеты рассеивания показали, что проведенные АО «Порт Ванино» воздухоохраные мероприятия недостаточно эффективны. По наиболее неблагоприятному варианту организации работ приземные концентрации над акваторией бухты составят от 0,579 до 2,37 мг/м³, в жилой застройке — от 0,049 до 0,115 мг/м³ (от 0,16 до 0,38 долей ПДК), максимальный вклад дает пыление складов. Применение экрана высотой 20 м по всему периметру складов позволяет снизить приземные концентрации в 10 раз и обеспечить соблюдение нормативных требований и снижение высасывания пыли на акваторию бухты. Потенциальный риск развития неспецифических токсических эффектов при хронической интоксикации в контрольных точках в жилой застройке снижается от категории «опасный» до «приемлемый», что подтверждает эффективность предложенного мероприятия.

Ключевые слова: пыление при перегрузке угля, моделирование рассеивания выбросов, технологии пылеподавления

Вклад авторов. Лукьянов А.И. — формальный анализ, проведение исследования, визуализация, написание, рецензирование и редактирование рукописи. Дахова Е.В. — верификация данных, подготовка и написание черновика рукописи. Майорова Л.П. — концептуализация, руководство исследованием. Все авторы участвовали в подведении итогов и подготовке заключения. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Лукьянов А.И., Дахова Е.В., Майорова Л.П., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных. Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

История статьи: поступила в редакцию 09.06.2025; доработана после рецензирования 01.04.2026; принята к публикации 16.04.2026.

Для цитирования: Лукьянов А.И., Дахова Е.В., Майорова Л.П. Моделирование распространения угольной пыли при функционировании АО «Порт Ванино» до и после установки ветро-пылезащитного экрана // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 3. С. 407–420. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-407-420> EDN: FLXONB

Simulation of the coal dust spread during the operation at JSC Vanino Port before and after the installation of a wind and dust screen

Alexey I. Lukyanov^{}^{}, Ekaterina V. Dakhova^{}, Liydmila P. Mayorova^{}

Pacific National University named after M.P. Danilovskiy, Khabarovsk, Russian Federation
✉008362@togudv.ru

Abstract. The relevance of the work is determined by the need to ensure environmental safety during coal transshipment at the non-specialized terminal of JSC Vanino Port. The level of atmospheric air pollution with coal dust in the residential area of the settlement and above the water area of Vanina Bay was determined based on modeling the dispersion of emissions in the atmosphere in the program of the Environmental Protection Agency “Ecologist-4.6.” 91 sources of coal dust emissions were taken into account. 10 options for the organization of work have been considered. Dispersion calculations have shown that the air protection measures carried out by Port Vanino JSC are not effective enough. Dispersion calculations have shown that the air protection measures carried out by JSC Port Vanino are insufficiently effective. According to the most unfavorable variant of the organization of work, the ground concentrations over the bay water area will be from 0.579 to 2.37 mg/m³, in residential areas — from 0.049 to 0.115 mg/m³ (from 0.16 to 0.38 shares of the MPC), the maximum contribution is given by dusting of warehouses. The use of a 20-meter-high screen around the entire perimeter of the warehouses makes it possible to reduce surface concentrations by 10 times, ensure compliance with regulatory requirements, and reduce dust deposition in the bay area. The potential risk of developing non-specific toxic effects in chronic intoxication at control points in residential buildings is reduced from the category of “dangerous” to “acceptable”, which confirms the effectiveness of the proposed measure.

Keywords: dusting during coal transshipment, emission dispersion modeling, dust suppression technologies

Authors’ contribution. A.I. Lukyanov — formal analysis, conducting research, visualization, writing — reviewing and editing the manuscript. E.V. Dakhova — data verification, writing — preparing a draft of the manuscript. L.P. Mayorova — conceptualization, research management. All authors participated in summarizing and preparing the conclusion. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Conflicts of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability. All data obtained during this study are included in the published article.

Article history: received 09.06.2025; revised 01.04.2026; accepted 16.04.2026.

For citation: Lukyanov AI, Dakhova EV, Mayorova LP. Simulation of the coal dust spread during the operation at JSC Vanino Port before and after the installation of a wind and dust screen. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(3):407–420. (In Russ.). <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-407-420> EDN: FLXONB

Введение

Важной задачей в области защиты окружающей среды является оценка влияния крупных угольных терминалов на экологическое состояние близлежащих городов в целом и на состав атмосферных взвесей в частности [1–4]. Перечислим основные источники пыления при перевалке угля в морских портах [3].

– Открытые склады угля, обеспечивающие круглосуточный и круглогодичный существенный вклад в пыление. Однако применение закрытых складов на сегодняшний день вопрос дискуссионный.

– Узлы пересыпки и дробильно-сортировочные установки (ДСУ). Перегрузка из вагонов на склад может выполняться грейферами или вагонопрокидывателями. Перемещение материала по периметру склада осуществляется конвейером или спецтехникой, ДСУ работают главным образом в зимний период и являются мощным источником пылевыделения.

– Перегрузка со склада в трюм судна. Осуществляется конвейерным транспортом; с помощью пневмоустановок; с использованием грейферных кранов и перегружателей (наиболее распространен и обеспечивает максимальное пыление [4]). В результате в радиусе 10 м от места разгрузки грейфера концентрация пыли в воздухе в 7–50 раз превышает ПДК [5].

– Спецтехника и транспорт. Пыление имеет место при работе спецтехники (мобильные дробильные установки, экскаваторы, бульдозеры, погрузчики и т.д.) и движении автотранспорта по дорогам.

Внимание исследователей сосредоточено на угольной пыли как опасной форме техногенного загрязнения [6; 7]. Пыление на угольных терминалах происходит за счет ветровой эрозии и механического воздействия. На специализированных терминалах пылеобразование ниже по сравнению с грейферной технологией перевалки, так как процессы перегрузки в большинстве случаев происходят в закрытых технологических узлах, что препятствует распространению пыли и повышает эффективность мероприятий по пылеподавлению и пылеулавливанию.

При оценке состояния запыленности атмосферы, разработке способов и средств борьбы с пылью, выборе и внедрении обеспыливающих мероприятий необходимо учитывать применяемую технологию работ, технологическую операцию и конструктивные особенности используемых машин,

свойства материала и образующейся при этом пыли, климатические и метеорологические условия района, в котором расположен объект, времена года и другие факторы [7]. Базовым, основополагающим принципом при ведении работ с углем в морских терминалах должен стать переход на наилучшие доступные технологии (НДТ) путем реализации комплекса мероприятий организационного и технического характера, направленных, в первую очередь, на минимизацию воздействия на атмосферный воздух¹.

Большинство специалистов сходятся во мнении, что не существует единого решения всех сложных проблем борьбы с пылью и универсального, полностью безопасного и продуктивного метода обеспыливания [8; 9]. В каждом конкретном случае эти вопросы решаются индивидуально. При выработке метода пылеподавления необходимо проанализировать следующие вопросы: что является основным источником образования пыли и где он находится, за счет какого процесса образуется наибольшее количество пыли, попадающей в воздух, и где располагаются наиболее чувствительные к воздействию воздушной пыли зоны [1–7].

Одним из вариантов снижения распространения пыли при операциях с углем на угольных причалах и терминалах является возведение ветро-пылезащитных экранов, контролирующих и изменяющих направление потоков ветра, уменьшающих их скорость, силу и размер вихревых потоков [10; 11].

Цель исследования — обоснование необходимости природоохранных мероприятий на терминале АО «Порт Ванино» по снижению приземных концентраций угольной пыли до нормативных значений и уменьшение осадения пыли на акваторию бухты с подтверждением эффективности математическим моделированием и расчетами потенциального риска для здоровья населения.

С целью получения данных по распространению угольной пыли в п. Ванино и на прилегающей территории при функционировании АО «Порт Ванино» было выполнено компьютерное моделирование.

Материалы и методы исследования

АО «Порт Ванино» расположен на северо-западном материковом берегу Татарского пролива в естественной глубоководной бухте Ванина. Перевалка угля осуществляется на неспециализированных причалах № 5, 6, 7, 10, 15, 16, 17. Общая площадь угольных складов — 73 500 м². Вместимость — 280 000 м³. Выгрузка из полувагона — классическая грейферная с помощью порталного крана либо стрелового погрузчика. После формирования штабеля угля, прошедшего через дробильно-сортировочные установки и магнитный сепаратор,

¹ ИТС 46-2019. Сокращение выбросов загрязняющих веществ, сбросов загрязняющих веществ при хранении и складировании товаров (грузов). Москва : Бюро НДТ, 2019, с поправкой от 17 марта 2020 г. // Росстандарт. URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/NDT/actualizationdirectory2019> (дата обращения: 02.04.2025).

погрузка на судно осуществляется порталным краном. При эксплуатации неспециализированного терминала отмечался высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха угольной пылью в поселках Токи и Ванино. Первый митинг, на котором ванинцы высказали свои претензии к руководству морского порта, прошел в мае 2013 г. Проблема вышла на уровень Росприроднадзора, Государственной Думы РФ и Президента РФ. По предписанию Росприроднадзора на терминале был реализован ряд мероприятий по снижению пыления² [1; 12–14].

В соответствии с СанПиН 1.2.3685-21³ пыль каменного угля нормируется по коду 3749. ПДК_{мр} составляет 0,3 мг/м³, ПДК_{сс} — 0,1 мг/м³, класс опасности — 3.

Моделирование распространения угольной пыли в жилой зоне п. Ванино и на прилегающей территории проведено в 2024 г. с использованием УПРЗА «Эколог-4.6» с учетом расположения терминалов погрузки угля и выполняемых на них операций. Рассмотрено 10 вариантов организации работ с различными вариантами сочетания одновременно осуществляемых производственных операций. Учтен 91 источник выбросов пыли угольной в атмосферный воздух (13 штабелей угля на трех складах плюс сопутствующие операции) (рис. 1).

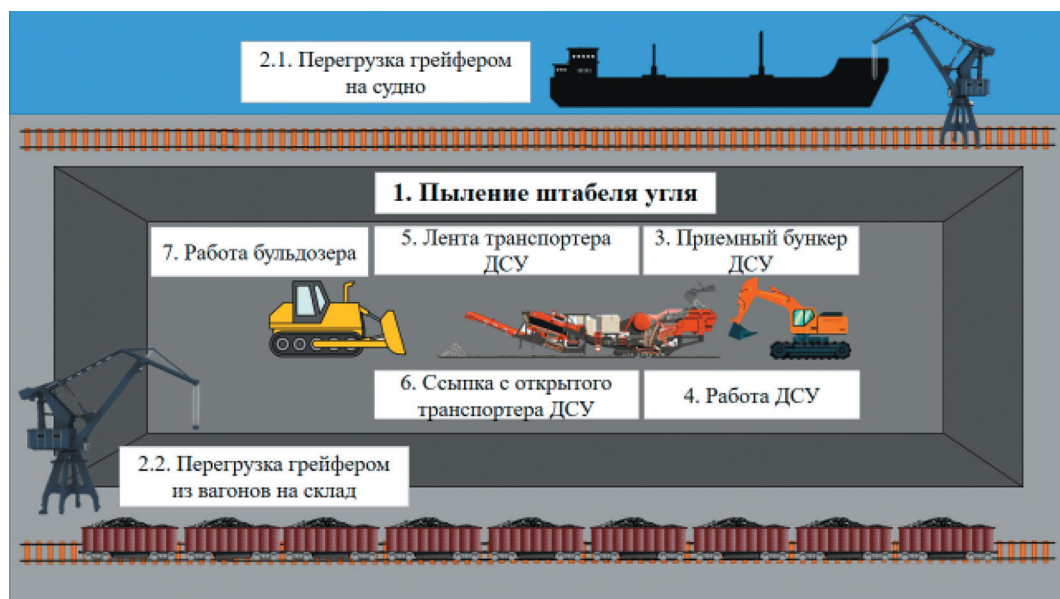


Рис. 1. Схема организации работ с группами учетных источников

Источник: составлено А.И. Лукьяновым.

² Киреева А. Путин: открытая перевалка угля создает большие экологические проблемы // Всероссийский экологический портал. 17.08.2017. URL: <https://ecoportal.su/news/view/93741.html?ysclid=mrс5wdyo66195998755> (дата обращения: 02.04.2025).

³ СанПиН 01.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Зарегистрировано в Минюсте России 29 января 2021 г. № 62296. URL: https://nagut6.gosuslugi.ru/netcat_files/174/2801/SP123685_21.pdf?ysclid=mrс60z2ne6228570556 (дата обращения: 02.04.2025).

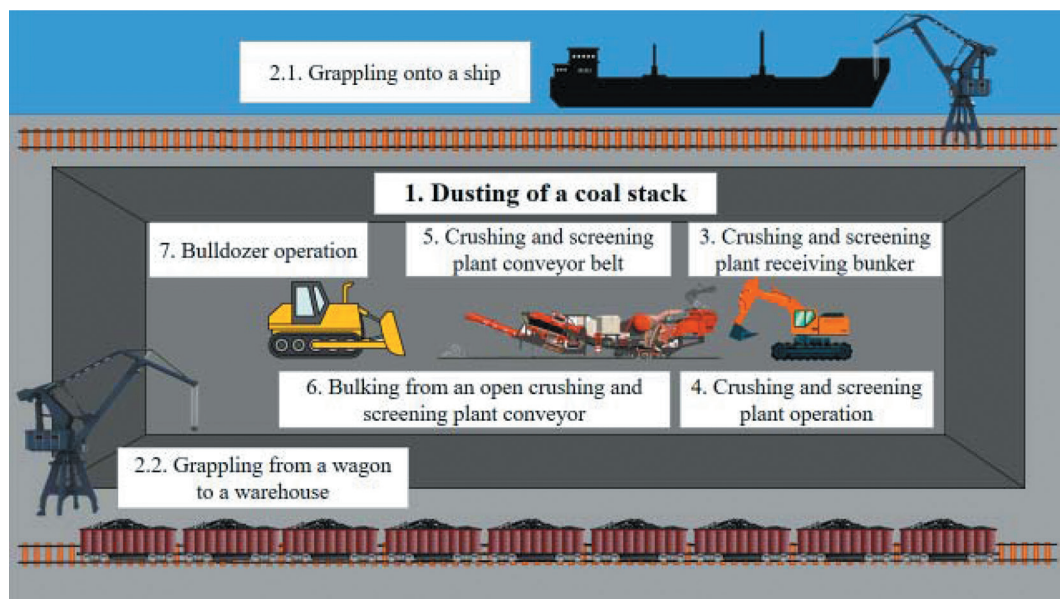


Figure 1. The scheme of organization of work with groups of the considered sources

Source: compiled by A.I. Lukyanov.

Для расчета принято, что на каждом штабеле угля одновременно источниками выделения являются склад (пыление), перегрузка грейфером (вагон-склад или склад-судно), ДСУ со средствами пылеподавления, ссыпание угля в приемный бункер ДСУ, работа ленточного конвейера, ссыпка угля с открытого транспортера сортировочной машины, пыление при работе бульдозера. Учитывалось, что территория АО «Порт Ванино» функционально разделена на два производственно-перегрузочных участка ППУ-1 и ППУ-2, расположенных на противоположных сторонах бухты Ванина⁴ [1].

Ситуационная карта-схема размещения источников выбросов и контрольных точек приведена на рис. 2, метеопараметры, определяющие условия рассеивания, — в таблице.

Для оценки воздействия угольной пыли на здоровье населения был рассчитан потенциальный риск развития неспецифических токсических эффектов при хронической интоксикации в точках, принадлежавших жилой застройке (точки 1–4, 7 на рис. 2).

Расчеты выбросов пыли угольной выполнены по методикам⁵.

⁴ Акционерное общество «Ванинский морской торговый порт» : офиц. сайт. URL: <https://www.vaninoport.ru/> (дата обращения: 02.04.2025).

⁵ Методика расчета вредных выбросов (сбросов) для комплекса оборудования открытых горных работ (на основе удельных показателей) / Нац. науч. центр горного произ-ва институт горного дела им. А.А. Скочинского. Люберцы : ННЦ ГП ИГИ, 1999. 68 с.; Отраслевая методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу вредных веществ предприятиями по добыче угля / ФГУП МНИИЭКО ТЭК. Пермь, 2003. 115 с.; Методическое пособие по расчету выбросов от неорганизованных источников в промышленности строительных материалов / ЗАО «НИПИОТСТРОМ». Новороссийск, 2001. 27 с.; Временные методические указания по рас-



Рис. 2. Ситуационная карта-схема расположения источников выбросов и контрольных точек

Источник: составлено А.И. Лукьяновым, карта взята с сервиса Яндекс Карты
https://yandex.ru/maps/geo/rabochiy_posyolok_vanino/53067763/?ll=140.277040%2C49.088971&z=13.39
 (дата обращения: 02.04.2025)

Figure 2. Situational map-diagram of the location of emission sources and control points

Source: compiled by A.I. Lukyanov, the map is adapted from Yandex.Maps
https://yandex.ru/maps/geo/rabochiy_posyolok_vanino/53067763/?ll=140.277040%2C49.088971&z=13.39
 (accessed: 02.04.2025)

Метеорологические характеристики и коэффициенты, определяющие условия рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере [1]

Метеорологические параметры, ед. изм.	Значения
Коэффициент, зависящий от стратификации атмосферы для районов ДВ, А	200
Коэффициент рельефа местности	1,10
Средняя максимальная температура воздуха наиболее жаркого месяца, °С	22,5
Средняя минимальная температура воздуха наиболее холодного месяца, °С	–15,9
Скорость ветра, повторяемость превышения которой 5 %, U*, м/с	8,2

Источник: составлено А.И. Лукьяновым.

Meteorological characteristics and coefficients determining the conditions for the dispersion of pollutants in the atmosphere [1]

Meteorological parameters, units	Values
The coefficient, depending on the stratification of the atmosphere for the regions of the Far East, A	200
The terrain coefficient	1.10
The average maximum air temperature of the hottest month, °C	22.5
The average minimum air temperature of the coldest month, °C	–15.9
Wind speed with a frequency exceeding 5%, U*, m/s	8.2

Source: compiled by A.I. Lukyanov.

чету выбросов загрязняющих веществ (пыли) в атмосферу при складировании и перегрузке сыпучих материалов на предприятиях речного флота. Белгород : БТИСМ, 1992. 35 с.; Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (Дополненное и переработанное). Санкт-Петербург : ОАО «НИИ Атмосфера», 2012. 224 с.

В соответствии с Методическими рекомендациями⁶ потенциальный риск рассчитывается по формуле

$$P = 1 - \exp[-0,174 \cdot (\frac{C_{ij}}{\text{ПДК}_{\text{cc}} \cdot K_3})^n \cdot t],$$

где P — вероятность развития неспецифических токсических эффектов при хронической интоксикации в заданных условиях (от 0 до 1); C_{ij} — концентрация примеси, мг/м³; K_3 — коэффициент запаса, определяемый в зависимости от класса опасности примеси: 1-й класс — 7,5; 2-й класс — 6,0; 3-й класс — 4,5; 4-й класс — 3,0; ПДК_{cc} — среднесуточная ПДК, мг/м³; n — коэффициент, определяемый в зависимости от класса опасности примеси: 1-й класс — 2,4; 2-й класс — 1,31; 3-й класс — 1,0; 4-й класс — 0,86; t — отношение длительности воздействия загрязнения в годах к средней продолжительности жизни человека (70 лет).

Результаты и обсуждение

Результаты моделирования в виде картосхем приземных концентраций пыли угольной по наиболее неблагоприятному варианту представлены на рис. 3. На территории бухты Ванина приземные концентрации изменяются в пределах от 0,579 до 2,37 мг/м³ (что соответствует 1,93–7,9 доли ПДК). Максимальный вклад в загрязнение вносят склады и ДСУ. На территории поселка в контрольных точках приземные концентрации пыли угольной изменяются в интервале от 0,488 до 1,145 мг/м³ (от 1,63 до 3,82 долей ПДК).

При моделировании с учетом предлагаемых мер учитывался 91 источник с применением экрана высотой 20 м по всему периметру складов, с оставлением технических проездов. Скорость ветра варьировалась от 0 до 8,2 м/с (рис. 4). Эффективность экрана в соответствии с ИТС-46 выбрана 90 %.

На территории бухты Ванина с учетом внедрения мероприятий приземные концентрации изменяются в пределах от 0,057 до 0,237 мг/м³ (от 0,19 до 0,79 доли ПДК). В контрольных точках жилой застройки — от 0,049 до 0,115 мг/м³ (от 0,16 до 0,38 долей ПДК) (рис. 5). Данные коррелируют с предыдущими исследованиями пылевой нагрузки в данных точках [1; 15].

Значения потенциального риска в точках, принадлежащих жилой застройке, до установки экрана находятся в диапазоне 0,17–0,37, что соответствует категории «опасный», после установки экранов — 0,02–0,05 («приемлемый»), что подтверждает эффективность предложенного мероприятия.

⁶ Комплексная гигиеническая оценка степени напряженности медико-экологической ситуации различных территорий, обусловленной загрязнением токсикантами среды обитания населения : методические рекомендации (утв. Минздравом России 30.07.1997 № 2510/5716-97-32) // МЕГАНОРМ : система нормативных документов. URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/metodicheskie-rekomendacii/1/kompleksnaya_gigienicheskaya_otseuka_stepeni_napryazhennosti.html?ysclid=mrc71zjf88450656701 (дата обращения: 02.04.2025).

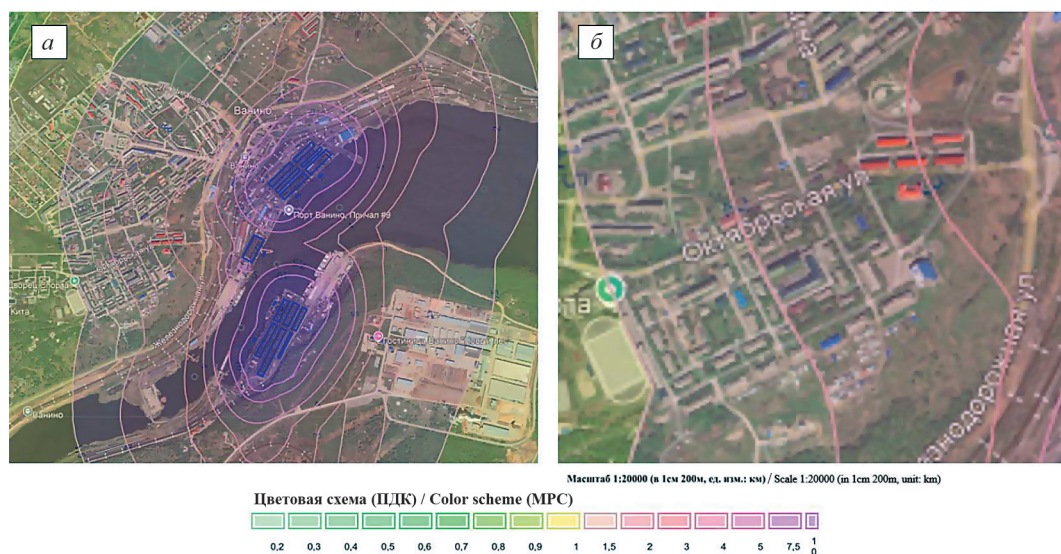


Рис. 3. Картограммы приземных концентраций угольной пыли:

а — территория бухты Ванина; б — территория поселка Ванино

Источник: составлено А.И. Лукьяновым с помощью программы УПРЗА Эколог 4, фирмы «Интеграл», карта взята с сервиса Яндекс Карты. URL: https://yandex.ru/maps/geo/rabochiy_posyolok_vanino/53067763/?ll=140.277040%2C49.088971&z=13.39 (дата обращения: 02.04.2025).

Figure 3. Cartographic diagrams of surface concentrations of coal dust:

а — the territory of Vanina Bay; б — the territory of the village of Vanino

Source: compiled by A.I. Lukyanov using the UPRZA Ecologist 4 program from Integral, the map is adapted from Yandex.Maps. Available from: https://yandex.ru/maps/geo/rabochiy_posyolok_vanino/53067763/?ll=140.277040%2C49.088971&z=13.39 (accessed: 02.04.2025).

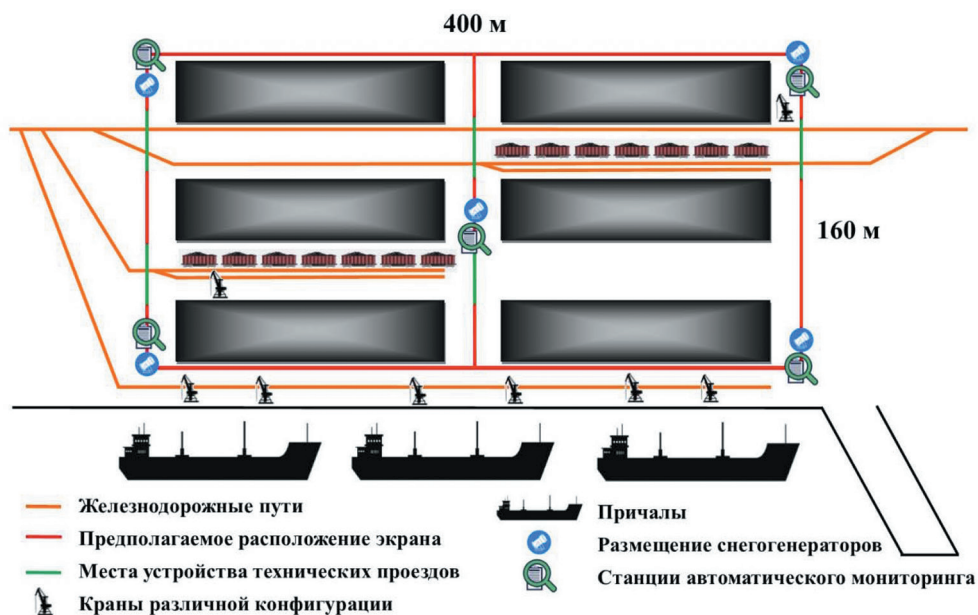


Рис. 4. Схема локализации предлагаемых мероприятий

Источник: составлено А.И. Лукьяновым.

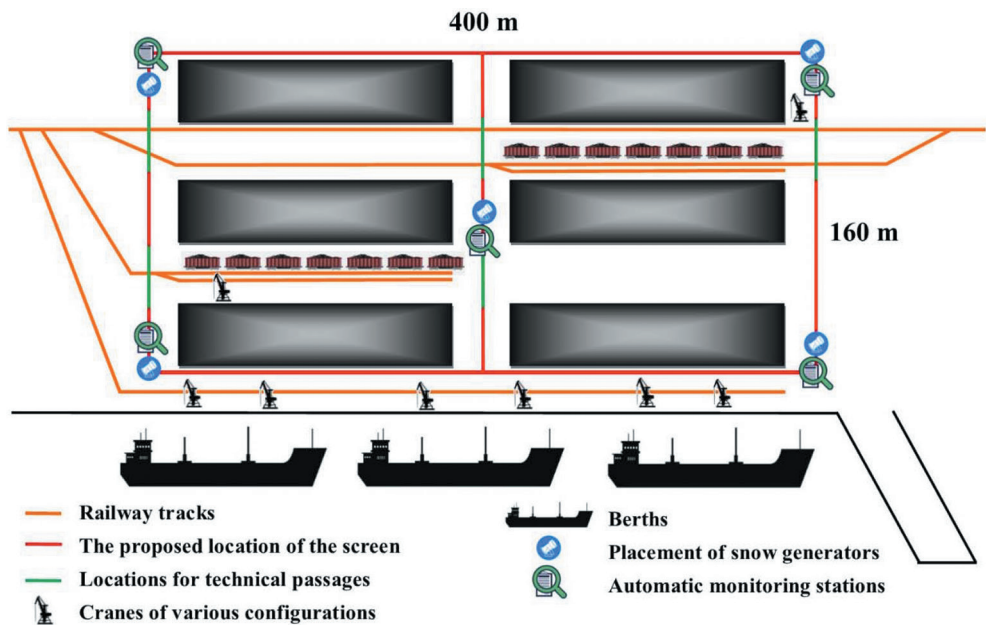


Figure 4. The localization scheme of the proposed activities

Source: compiled by A. I. Lukyanov.

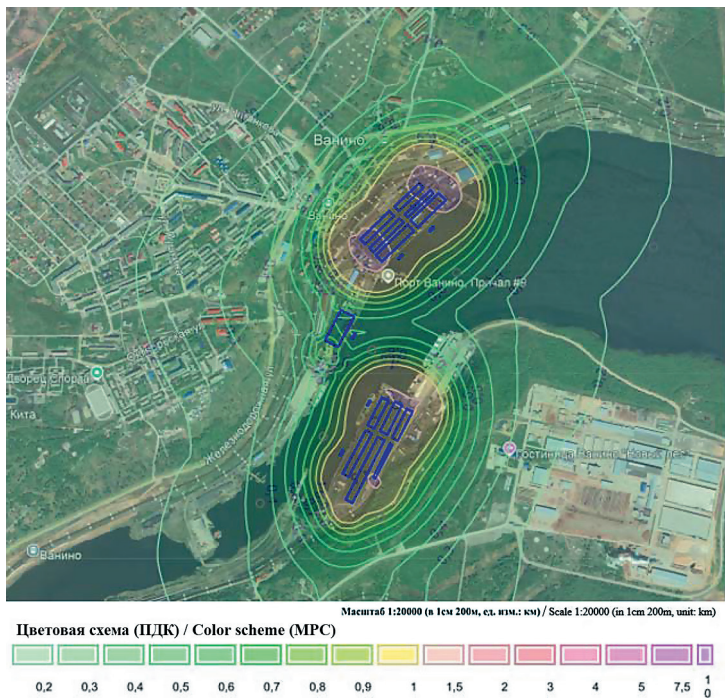


Рис. 5. Картограмма приземных концентраций угольной пыли после установки ветро-пылезащитного экрана

Источник: составлено А.И. Лукьяновым с помощью программы УПРЗА Эколог 4, фирмы «Интеграл», карта взята с сервиса Яндекс Карты. URL: https://yandex.ru/maps/geo/rabochiy_posyolok_vanino/53067763/?ll=140.277040%2C49.088971&z=13.39 (дата обращения: 02.04.2025).

Figure 5. Cartographic diagram of surface concentrations of coal dust after the installation of a wind-dust screen

Source: compiled by A.I. Lukyanov using the UPRZA Ecologist 4 program from Integral, the map is adapted from Yandex.Maps. Available from: https://yandex.ru/maps/geo/rabochiy_posyolok_vanino/53067763/?ll=140.277040%2C49.088971&z=13.39 (accessed: 02.04.2025).

Заключение

Реализованные АО «Порт Ванино» мероприятия по пылеподавлению недостаточно эффективны. Установка экрана по всему периметру складов будет способствовать уменьшению приземных концентраций над акваторией бухты, и, соответственно, осаднения пыли на водную поверхность, а также снижению воздействия пыли на население п. Ванино и работников порта (потенциальный риск воздействия на здоровье населения снижается с «опасного» до «приемлемого»).

Список литературы

- [1] Майорова Л.П., Лукьянов А.И., Дахова Е.В. Моделирование распространения взвеси угольной пыли при хранении и погрузочно-разгрузочных работах в портах (на примере порта Ванино) // Инновации и инвестиции. 2021. № 7. С. 89–94. EDN: URYDGE
- [2] Голохваст К.С., Чайка В.В., Никифоров П.А., Блиновская Я.Ю., Филонова Е.А., Семенухин В.А. Влияние крупного угольного терминала на состав атмосферных взвесей населенного пункта // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. 2015. № 56. С. 73–77. EDN: TUVCAR
- [3] Христофоров А.А., Кузнецов Д.А., Артюшин И.А. Способы и средства борьбы с пылью и контроля концентрации пыли в атмосфере угольных терминалов морских портов с использованием последних достижений в области автоматизации и пылеподавления // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2017. № 3. С. 57–67. EDN: ZGPIUF
- [4] Отделкин Н.С., Адамов Е.И. Оценка потерь сыпучих грузов при обработке транспортными средствами грейферными кранами // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2011. № 3. С. 146–149. EDN: OIVVJL
- [5] Адамов Е.И., Отделкин Н.С., Сикарев С.Н. Устройства, снижающие потери сыпучих грузов при перегрузке грейферными кранами // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2014. № 6 (28). С. 129–133. EDN: TDOCKB
- [6] Голохваст К.С., Куприянов А.Н., Манаков Ю.А., Никифоров П.А., Чайка В.В., Гульков А.Н. атмосферные взвеси Караканского угольного разреза Кузбасса: гранулометрический анализ // Экология человека. 2014. Т. 21. № 10. С. 19–24. <https://doi.org/10.17816/humeco17192>
- [7] Крылов Д.А. Угольная и газовая промышленность России: воздействие на природу и человека // Энергия: экономика, техника и экология. 2003. № 9. С. 16–22. EDN: OORHLV
- [8] Огай С.А., Огай А.С., Непейвода В.Г. Экологические проблемы перевалки сыпучих грузов в морских портах // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2006. № 6 (6). С. 76–80. EDN: KYFMDP
- [9] Васина Д., Рапопорт И., Тесленко И. Решение экологических проблем открытых угольных терминалов Владивостока // International Journal of Professional Science. 2021. № 6. С. 27–36. EDN: LCGRFS
- [10] Костюничев Д.Н., Отделкин Н.С. Оценка работоспособности сетчатых экранов по снижению пылевыбросов сыпучих грузов с открытых складов портов // Вестник

- государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2024. Т. 16. № 1. С. 55–63. <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2024-16-1-55-63> EDN: KKAQND
- [11] *Московская И.В., Лазарева Л.П.* Анализ эффективности применения ветро-пылезащитных экранов на открытых складах угольных терминалов // Евразийский Союз Ученых. 2015. № 6-2 (15). С. 140–144. EDN: WXFOUZ
- [12] *Сергеев А.С.* Проблемы развития морских портов ДВФО в новом статусе «Свободного порта Владивосток» // Азиатско-Тихоокеанский регион: экономика, политика, право. 2017. Т. 19. № 1. С. 72–81. <https://doi.org/10.24866/1813-3274/2017-1/72-81> EDN: YQNK TZ
- [13] *Смирнов Ю.Д., Иванов А.В.* Разработка инновационного пылеподавляющего устройства для условий северных регионов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 6. С. 187–190. EDN: NDLRMX
- [14] *Холодов А.С., Кириченко К.Ю., Захаренко А.М., Вахнюк И.А., Волкова В.Н., Голохваст К.С.* Анализ атмосферной взвеси рабочего поселка Ванино (Хабаровский край) // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2023. № 4 (230). С. 145–160 https://doi.org/10.37102/0869-7698_2023_230_04_10 EDN: VVWRQV
- [15] *Лукьянов А.И., Дахова Е.В., Майорова Л.П.* Оценка загрязнения снежного покрова тяжелыми металлами как один из методов мониторинга атмосферного воздуха на примере населенных пунктов Дальнего Востока // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2022. Т. 30. № 3. С. 407–416. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-3-407-416> EDN: WSSOSW

References

- [1] Mayorova LP, Lukyanov AI, Dakhova EV. Modeling the spread of coal dust suspension during storage and loading/unloading operations in ports (for example, the port of Vanino). *Innovation & Investment*. 2021;(7):89–94. (In Russ.) EDN: URYDGE
- [2] Golokhvast KS, Chaika VV, Nikiforov PA, Blinovskaya YaYu, Filonova EA, Semenikhin VA. Influence of the large coal terminal on composition of atmospheric suspensions of the settlement. *Bulletin Physiology and Pathology of Respiration*. 2015;(56):73–77 (In Russ.) EDN: TUVCAR
- [3] Khristoforov AA, Kuznetsov DA, Artyushin IA. Methods and means of dust control and control of dust concentration in the atmosphere of the coal terminals of marine ports with the use of the latest achievements in automation and dust supply. *Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety)*. 2017;(3):57–67 (In Russ.) EDN: ZGPUIF
- [4] Otdelkin NS, Adamov EI. Assessment of bulk cargo losses during handling of vehicles with grab cranes. *Bulletin of Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping*. 2011;3(11):146a–149 (In Russ.) EDN: OIVVJL
- [5] Adamov EI, Otdelkin NS, Sikarev SN. Devices reducing bulk cargo losses during reloading with grab cranes. *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo I Rechnogo Flota Imeni Admirala S.O. Makarova*. 2014;(6):129–133. (In Russ.) EDN: TDOCKB
- [6] Krylov DA, Putintseva VE. Fuel and energy complex and ecology. *Energy: Economics, Technology, Ecology*. 1995;2:48–53. (In Russ.)

- [6] Golokhvast KS, Kupriyanov AN, Manakov JA, Nikiforov PA, Chaika VV, Gulkov AN. Atmospheric suspenses of the Karakansky coal section of Kuzbass: particle size analysis. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2014;21(10):19–24. <https://doi.org/10.17816/humeco17192>
- [7] Krylov DA. Coal and gas industry of Russia: impact on nature and humans. *Energiia: Ekonomika, Tekhnika, Ekologiya*. 2003;9:16–22. (In Russ.) EDN: OORHLV
- [8] Ogay SA, Ogay AS, Nepeyvoda VG. Environmental problems of bulk cargo transshipment in seaports. *Transport of the Russian Federation. Journal of Science, Practice, Economy*. 2006;6(6):76–80. (In Russ.) EDN: KYFMDP
- [9] Vasina D, Rapoport I, Teslenko I. Solving environmental problems of open coal terminals in Vladivostok. *International Journal of Professional Science*. 2021;(6). 27–36. EDN: LCGRFS
- [10] Kostyunichev DN, Otdelkin NS. Assessment of the meshed screens operability to reduce dust emissions of bulk cargo from the ports open warehouses. *Bulletin of Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping*. 2024;16(1):55–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2024-16-1-55-63> EDN: KKAQND
- [11] Moskovaya IV, Lazareva LP. Analysis of the effectiveness of wind and dust protection screens at open storage areas of coal terminals. *Eurasian Union of Scientists*. 2015;6–2:140–144. (In Russ.) EDN: WXFOUZ
- [12] Sergeev AS. Development of FEFD seaports in the new status of “the Free Port of Vladivostok”. *Pacific Rim: Economics, Politics, Law*. 2017;19(1):72–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.24866/1813-3274/2017-1/72-81> EDN: YQNKTZ
- [13] Smirnov YuD, Ivanov AV. Development of an innovative dust suppression device for conditions of northern regions. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2010;(6):187–190. (In Russ.) EDN: NDLRMX
- [14] Kholodov AS, Kirichenko KYu, Zakharenko AM, Vakhniuk IA, Volkova VN, Golokhvast KS. The analysis of particulate matter in Vanino settlement (Khabarovsk territory, Russia). *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2023;(4):145–160. (In Russ.) https://doi.org/10.37102/0869-7698_2023_230_04_10 EDN: VVWRQV
- [15] Lukyanov AI, Dakhova EV, Mayorova LP. Assessment of snow cover pollution by heavy metals as one of the methods of atmospheric air monitoring on the example of settlements in the Far East. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2022;30(3):407–416. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-3-407-416> EDN: WSSOSW

Сведения об авторах:

Лукьянов Алексей Игоревич, старший преподаватель высшей школы Управления природными ресурсами, Тихоокеанский государственный университет имени М.П. Даниловского, Российская Федерация, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, д. 136. ORCID: 0000-0002-6936-6807; eLIBRARY SPIN-код: 6952-7589. E-mail: 008362@togudv.ru

Дахова Екатерина Валерьевна, кандидат технических наук, доцент высшей школы Управления природными ресурсами, Тихоокеанский государственный университет имени М.П. Даниловского, Российская Федерация, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, д. 136. ORCID: 0000-0003-0179-8563; eLIBRARY SPIN-код: 6871-2827. E-mail: 010770@togudv.ru

Майорова Людмила Петровна, доктор химических наук, доцент, профессор высшей школы Управления природными ресурсами, Тихоокеанский государственный университет имени М.П. Даниловского, Российская Федерация, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, д. 136. ORCID: 0000-0002-6326-982X; eLIBRARY SPIN-код: 5904-3031. E-mail: 000318@togudv.ru

Bio notes:

Alexey I. Lukyanov, Senior Lecturer at the Higher School of Natural Resources Management, Pacific National University named after M.P. Danilovskiy, 136 Pacific St, Khabarovsk, 680035, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-6936-6807; eLIBRARY SPIN-code: 6952-7589. E-mail: 008362@togudv.ru

Ekaterina V. Dakhova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Higher School of Natural Resources Management, Pacific National University named after M.P. Danilovskiy, 136 Pacific St, Khabarovsk, 680035, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-0179-8563; eLIBRARY SPIN-code: 6871-2827. E-mail: 010770@togudv.ru

Liydmila P. Mayorova, Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Professor, Higher School of Natural Resources Management, Pacific National University named after M.P. Danilovskiy, 136 Pacific St, Khabarovsk, 680035, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-6326-982X; eLIBRARY SPIN-code: 5904-3031. E-mail: 000318@togudv.ru

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-3-421-432

EDN: FIGZPE

УДК 504.75:504.054:504.064

Научная статья / Research article

Экологические аспекты прошлой добычи урана в Центральной Азии и Монголии

У. Мирсаидов¹, Х.М. Назаров¹✉, Д. Цэрэн²,
Ж. Чимэдбазарын²

¹Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности
Национальной Академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

²Институт физики и технологии Монгольской Академии наук, Улан-Батор, Монголия

✉ holmurod18@mail.ru

Аннотация. Цель исследования — обобщение данных о формировании и современном состоянии урановых хвостохранилищ в странах Центральной Азии и Монголии, а также разработка рекомендаций по улучшению радиэкологической обстановки. Объект исследования — урановые хвостохранилища и прилегающие к ним территории в странах Центральной Азии и Монголии. Использованы материалы ранее выполненных исследований. Радиационный мониторинг проводился с применением современных приборов и оборудования производства Российской Федерации («Доза»), Республики Беларусь («Атомтех»), США (Canberra) и Германии (Thermo). Установлено, что негативное радиологическое воздействие хвостохранилищ на окружающую среду и население обусловлено сходством природно-климатических условий и особенностями переработки урановых руд. Выявлено, что в странах Центральной Азии часть хвостохранилищ остается нерекультивированной, тогда как в Монголии урановые отходы до настоящего времени не охвачены рекультивационными мероприятиями. На отдельных участках мощность дозы гамма-излучения достигает 3,5 мкЗв/ч, что превышает фоновые значения почти в 12 раз. Обоснована необходимость реализации комплекса мер, включающего организацию системного радиационного контроля, реабилитацию загрязненных территорий и расширение межгосударственного взаимодействия при реализации национальных и международных проектов.

Ключевые слова: урановое производство, урановые хвостохранилища, мощность дозы, загрязнение, рекультивация

Вклад авторов. Мирсаидов У. — руководство исследованием, создание рукописи и ее редактирование. Назаров Х.М. — концептуализация, верификация данных, создание черновика рукописи. Цэрэн Д. — администрирование проекта, визуализация. Чимэдбазарын Ж. — проведение исследования, верификация данных. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

© Мирсаидов У., Назаров Х.М., Цэрэн Д., Чимэдбазарын Ж., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Финансирование. Исследования проведены в рамках научно-исследовательских работ Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана на тему «Радиоэкологическая оценка и радиационный мониторинг экосистем на примере Таджикистана» (2025–2029 гг.). Гос. регистрация № 0125 TJ 1657.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории технических услуг Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана за оказание содействия в организации и проведении исследований.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных. Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

История статьи: поступила в редакцию 22.10.2025; доработана после рецензирования 28.04.2026; принята к публикации 07.05.2026.

Для цитирования: *Мирсаидов У., Назаров Х.М., Цэрэн Д., Чимэдбазарын Ж.* Экологические аспекты прошлой добычи урана в Центральной Азии и Монголии // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 3. С. 421–432. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-421-432> EDN: FIGZPE

Environmental aspects of past uranium mining in Central Asia and Mongolia

Ulmas Mirsaidov¹, Kholmurod M. Nazarov¹✉, Davaadorj Tseren²,
Jargal Chimedbazaryn²

¹*Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Safety and Security Agency of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan*

²*Institute of Physics and Technology Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia*
✉holmurod18@mail.ru

Abstract. The aim of the work is to generalize data on the formation and current state of uranium tailings in the countries of Central Asia and Mongolia, as well as to develop recommendations for improving the radioecological situation. The object of study is uranium tailings and adjacent territories in the countries of Central Asia and Mongolia. The study is based on the analysis of previously published research conducted in the specified countries. Radiation monitoring was carried out using modern instruments and equipment manufactured in the Russian Federation (Doza), the Republic of Belarus (Atomtex), the USA (Canberra), and Germany (Thermo). It was established that the negative radiological impact of uranium tailings

on the environment and population is driven by similarities in natural and climatic conditions and the specific features of uranium ore processing. In Central Asia, a number of tailings remain unreclaimed, while in Mongolia uranium waste has not yet been subjected to remediation measures. In certain local areas, the gamma dose rate reaches up to 3.5 $\mu\text{Sv/h}$, which is nearly 12 times higher than background levels. The necessity of implementing a comprehensive set of measures is substantiated, including the establishment of systematic radiation monitoring, rehabilitation of contaminated areas, and strengthening of interstate cooperation in the implementation of national and international projects.

Keywords: uranium production, uranium tailings, dose rate, pollution, reclamation

Authors' contribution. *U. Mirsaidov* — supervision, writing-review and editing; *Kh.M. Nazarov* — conceptualization, validation, writing-original draft; *D. Tseren* — project administration, visualization; *J. Chimedbazaryn* — investigation, validation. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Funding. The research was conducted as part of the research project of Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Safety and Security Agency of the National Academy of Sciences of Tajikistan on the topic: “Radioecological assessment and radiation monitoring of ecosystems using Tajikistan as an example” (2025–2029). State Registration No 0125 TJ 1657.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the staff of the Technical Services Laboratory of Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Safety and Security Agency of the National Academy of Sciences of Tajikistan for their assistance in organizing and conducting the research.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability. All data obtained during this study are included in the published article

Article history: received 22.10.2025; revised 28.04.2026; accepted 07.05.2026.

For citation: Mirsaidov U, Nazarov KhM, Tseren D, Chimedbazaryn J. Environmental aspects of past uranium mining in Central Asia and Mongolia. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(3):421–432. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-421-432> EDN: FIGZPE

Введение

Производство урана и его растущая индустрия требуют особого внимания к рискам, которые могут возникнуть в результате добычи, переработки и хранения этого радиоактивного материала. В странах Центральной Азии в период 1942–1996 гг. прошлого века осуществлялась деятельность по добыче и переработке урановых руд, в результате чего образовались значительные объемы радиоактивных отходов [1].

В более поздний срок к добыче урановых руд в период бывшего советского времени была также привлечена Монгольская Народная Республика [2]. Монголия имеет колоритную историю относительно деятельности связанной

с ураном, как результат сотрудничества на протяжении более 60 лет с крупными компаниями из России, США, Канады, Китая, Франции и Чешской Республики. Развитие уранового производства в Монгольской Народной Республике можно условно разделить на три этапа.

1. *Становление*: интенсивные геологические изыскания, открытия и разработки перспективных месторождений (1960–1995 гг.).

2. *Стагнация*: приостановление производства, реструктуризация активов (1994–2016 гг.).

3. *Возрождение*: открытие и эксплуатация новых месторождений, восстановление активности (с 2016 г. по настоящее время).

Каждый из этапов развития связан с проблемами радиационной защиты, охраной окружающей среды, персонала и населения. В связи с возрастанием тенденции возобновления уранодобывающей активности в настоящее время в Монголии внесение ясности, определение и оценка возможных экологических влияний рудников, прекративших производственную деятельность, становятся актуальной задачей.

Цель исследования — обобщение имеющихся материалов по формированию и современному состоянию урановых хвостохранилищ в странах Центральной Азии и Монголии и выработка рекомендаций по улучшению радиоэкологической обстановки в этих странах.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования выбраны урановые хвостохранилища и их природно-техногенные участки, прилегающие к ним территории в странах Центральной Азии и Монголии.

Радиоактивные урановые отходы в Таджикистане. В результате деятельности Государственного унитарного предприятия «Таджредмет» (бывший Ленинабадский горно-химический комбинат, ранее — 6-й комбинат) на территории Республики Таджикистан образовались объекты размещения отходов уранового производства, включая хвостохранилища, а также отвалы вскрышных пород и забалансовых руд. Общее количество отходов, накопленных в этот период, составляет 55 млн т на площади 170 га с суммарной активностью 6,5–7,7 тыс. Кюри. Практически все основные объекты уранового наследия расположены в Северном Таджикистане в горной местности рядом с населенными пунктами: Истиклол, Бустон, Худжанд, Адрасман [3].

Радиоактивные урановые отходы в Кыргызстане. В Кыргызстане на 6 площадках расположены 33 радиоактивных хвостохранилищ и 25 горных отвалов [4].

Радиоактивные урановые отходы в Узбекистане. На территории Янгиабадского рудного поля имеются четыре закрытых урановых рудника и 29 отвалов пустых пород около штолен и стволов шахт. Общий объем накопленного здесь загрязненного материала составляет порядка 500 тыс. м³. В основном

забалансовые руды из мест первичной добычи урановых руд в Центральном-Кызылкумском регионе были перевезены в окрестности г. Учкудук, где были складированы и находятся там до настоящего времени¹.

Радиоактивные урановые отходы в Казахстане. Впервые уран в Казахстане начали добывать еще в 1948 г. В 1963 г., в целях расширения добычи полезных ископаемых, бывшим министерством среднего машиностроения СССР на полуострове Мангышлак был заложен город Шевченко (ныне Актау) и создано ведущее градообразующее предприятие — Прикаспийский горно-металлургический комбинат, в структуру которого вошел обогатительный химико-гидрометаллургический завод. Объем накопленных радиоактивных отходов уранодобывающих предприятий составляет 61 млн т с суммарной активностью 6,23 ПБк [5].

Радиоактивные урановые отвалы в Монголии. Ориентировочные оценки объема урановых отходов, образовавшихся на территории Монголии в течение 1988–1995 гг., составляют до 2 млн т [6], с учетом только отвалов, складированных забалансовых руд.

В соответствии с соглашением между правительствами СССР и Монгольской Народной Республики от 23 декабря 1981 г. «О разработке урановых месторождений на территории Монгольской Народной Республики» и на основании постановления Совета Министров СССР от 17 мая 1982 г. № 543-150сс Приаргунский горно-химический комбинат приступил в 1983 г. к строительству советского горнодобывающего предприятия «Эрдес» на территории Монголии на базе месторождения «Дорнод», входящего в группу урановых месторождений Дорнодского рудного поля, расположенного в 300 км от г. Краснокаменска в Забайкальском крае Российской Федерации. Карьер «Дорнод» производительностью 400 тыс. руды в год был введен в эксплуатацию в 1988 г. Производство урана в это время составляло 860 т U_3O_8 в год. С 1989 по 1991 г. было отгружено около 500 тыс. т руды, еще около 300 тыс. т было накоплено на рудных складах [2].

Кроме открытого карьера, на том же месторождении был организован подземный рудник № 7. Однако в связи с изменившейся конъюнктурой на урановое сырье финансирование строительства предприятия «Эрдес» было прекращено, как и масштабные поиски урана. В марте 1995 г. отгрузку руды из Монголии прекратили, хотя добыча продолжалась до конца 1996 г.

В ходе радиационных мониторингов были применены современные приборы и оборудования — комплект RackEye FHT1377 (Thermo Scientific, Германия) и дозиметры ДКС-96 («Доза», Россия), ДКС-АТ1123 («Атомтех», Беларусь).

Отбор проб и пробоподготовка осуществлены в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-83, ГОСТ 17.4.4.02-84 и ГОСТ 17.4.3.01-2017.

¹ The Environmental Behaviour of Uranium / F.P. Carvalho, S. Fesenko, A.R. Harbottle et al. // Technical Reports Series No. 488. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2023. P. 334–336.

Измерения суммарной альфа- и бета-активности образцов почв проводились на гамма-спектрометре («Canberra Industries», США) и альфа-бета радиометром УМФ-2000.

Определение содержания тяжелых металлов осуществлялось методом рентгенофлуоресцентного анализа на приборе «Спектроскан МАКС-GV» и методом атомно-абсорбционной спектрометрии на спектрофотометре «Квант-2А» производства НПО «Кортек».

Результаты и обсуждение

Состояние урановых объектов Таджикистана. Некоторые оценки современного состояния бывших урановых объектов в Таджикистане представлены в работах [7–10].

Урановые хвостохранилища г. Истиклол. В 2022–2023 гг. осуществлена реабилитация урановой площадки «Табошар». В результате выравнивания отвала «Фабрики бедных руд» ее площадь увеличилась почти в два раза (с 7,9 до 14,5 га), крутизна наклона террикона понизилась с 60–70° до 18–22°, а высота с 60 до 35 м. Мощности дозы гамма-излучения на поверхности отвала достигли уровня фона — 0,30 мкЗв/ч, при характерном диапазоне 0,17–0,65 мкЗв/ч. Также была дополнительно усилена мощность покрытия поверхности урановых хвостохранилищ «I–IV очереди» нейтральным грунтом, в результате чего мощность дозы гамма-излучения на их поверхности достигла 0,25 мкЗв/ч, при характерном диапазоне 0,18–0,36 мкЗв/ч.

Хвостохранилище цеха № 3. Значение мощности дозы гамма-излучения в окружении отвалов были определены на уровне 0,4–0,7 мкЗв/ч и достигала 3,0–4,0 мкЗв/ч в местах, где находятся отвалы забалансовых руд. Требуется проведение дополнительных работ по его рекультивации.

Адрасманское хвостохранилище находится на консервации, у подножья склона которого имеются следы выноса материала хвостохранилища на нижнем участке сая (горной речки). На таких участках наблюдаются повышенные уровни мощности дозы гамма-излучения 1,2–2,5 мкЗв/ч. Считаем необходимым реконструировать имеющийся водоотводный канал.

Состояние урановых объектов Кыргызстана. В районе поселка Мин-Куш расположены четыре хвостохранилища (Туюк-Суу, Талды-Булак, Как и Дальнее), содержащие радиоактивные материалы, общим объемом 1,15 млн м³ и общей площадью 196,5 тыс. м², а также четыре горных отвала [11–13]. Среднее значение мощности дозы гамма-излучения на поверхности хвостохранилищ составляет 0,3–0,6 мкЗв/ч, хотя на некоторых участках отмечено значение 5–12 мкЗв/ч. Работы по рекультивации в поселке Мин-Куш находятся на завершающей стадии.

Хвостохранилище «Каджи-Сай». В 2019 г. завершена рекультивация хвостохранилища. На поверхности хвостохранилища мощность дозы гамма-излучения составляет в среднем 0,3–0,6 мкЗв/ч.

Горные отвалы в районе поселка Шекафтар. Среднее значение мощности дозы гамма-излучения на поверхности отвалов составляет 0,6–1,5 мкЗв/ч. Отвалы, расположенные на берегу р. Сумсар, интенсивно размываются водами реки.

Хвостохранилище «Майлуу-Суу». Значение мощности дозы гамма-излучения на поверхности хвостохранилища находится в пределах 0,6–1,0 мкЗв/ч. Ведутся работы по рекультивации хвостохранилищ, шахтоотвалов, промышленных зданий и штолен уранового комплекса в городе Майлуу-Суу.

Состояние урановых объектов Узбекистана. В руднике Чаркесар-1 отвалы горной породы расположены в случайно выбранных углублениях рельефа на днище и по бортам долины. Средний фон гамма-излучения окрестностей участка составляет 0,6 мкЗв/ч. На поверхности отвалов горных пород мощность дозы гамма-излучения изменяется от 0,8 до 2,5 мкЗв/ч. Уровень естественного фона гамма-излучения поверхности горных пород в окрестностях рудника Чаркесар-2 составляет около 0,3–0,4 мкЗв/ч, суммарная удельная альфа-активность пород изменяется в диапазоне 1,0–1,3 кБк/кг.

Хвостохранилища гидрометаллургического завода г. Навои и в окрестностях г. Учкудук. Шламы хвостохранилища сформировались при переработке руд месторождений Сугралы, Сабырсай и Учкудук. Мощность дозы на поверхности отходов изменяется в пределах 5,0–17,0 мкЗв/ч, удельная суммарная альфа-активность материала хвостов 90–100 тыс. Бк/кг².

Состояние урановых объектов Казахстана. Отвалы и хвостохранилища вблизи поселка Заозерный и г. Степногорск охватывают примерно 734 га и содержатся около 46 млн т отходов уранового производства с активностью 5,92 ПБк [14]. Поверхность рудных отвалов рудника № 9 покрыта слоем глины в 1 м, мощность дозы гамма-излучения составляет 0,2 мкЗв/ч.

Состояние урановых объектов Монголии. Отвалы забалансовых руд горного способа добычи определяют повышение радиоактивности на локальных площадях в интервале 3,5–15,0 мкЗв/ч на фоне 0,22–0,32 мкЗв/ч.

Что касается жидких отходов, компания *Western Prospector* выкачала из законсервированной шахты на месторождении «Гурванбулак» и слила их в фильтрационное озеро вблизи шахты. Выявленная максимальная мощность дозы на Гурванбулакском месторождении доходит до 1860 мкЗв/ч, что в 29,2 раза превышает мировое среднее значение радиационного фона [2; 15].

Урановые карьеры в Таджикистане, Казахстане и Монголии. После прекращения добычи урановой руды открытым способом в указанных странах карьеры заполнялись грунтовыми водами, при этом концентрации ²³⁸U и ²³⁴U находятся в диапазоне 20–30 Бк/л (рисунок).

² The Environmental Behaviour of Uranium / F.P. Carvalho, S. Fesenko, A.R. Harbottle et al. // Technical Reports Series No. 488. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2023. P. 334–336.



Общий вид бывших урановых карьер:

а — рудника Табошар, Таджикистан; б — рудника Курдай, Казахстан; в — рудника Гурванбулак, Монголия

Источник: фото выполнено Х.М. Назаровым, Ж. Чимэдбазарыным.

Относительно высокие концентрации урана 1200–1400 мкг/л были обнаружены в затопленном карьере в Курдае, Казахстан. Измерение монгольских и японских ученых в 2013 г. вблизи карьера месторождения Гурванбулак (Монголия) показало высокую эффективную эквивалентную дозу 250 мкЗв/ч, что в 5 раз превышает мировое среднее значение радиационного фона. Более подробные данные по воде уранового карьера г. Истиклола приведены в табл. 1.

Таблица 1. Концентрация активности урана в водах на участке Табошарского рудника Таджикистана

Расположение	Концентрация активности				
	U, мг/л	²³⁸ U, Бк/л	²³⁴ U, Бк/л	²³⁴ U / ²³⁸ U	²²⁶ Ra, Бк/л
Шахта	1660	20,5	20,9	1,02	1,13
Выход из штольни № 2	1430	17,6	17,9	1,02	0,87
Река Сырдарья	35,3	0,44	0,73	1,66	0,006

Источник: составлено Х.М. Назаровым, Ж. Чимэдбазарыным.

Эрозионные состояния урановых хвостохранилищ в странах Центральной Азии. Обильные атмосферные осадки часто в странах Центральной Азии приводят к эрозионному воздействию водных потоков на поверхности хвостохранилищ региона³.

Эколого-геохимическая оценка загрязненности территории вокруг хвостохранилищ. Экологическое состояние урановых месторождений и прилегающих местностей после стольких лет прекращения их деятельности в странах Центральной Азии и Монголии подлежит детальному изучению для уточнения возможных последствий и целесообразности проведения при необходимости восстановительных работ.

Ситуация в Таджикистане. На Дигмайском хвостохранилище радиологический риск остается относительно высоким, так как оно считается действующим и его поверхность до сих пор остается открытой. Растительность территории, прилегающей к указанному хвостохранилищу, представлена эфемерно-эфемероидными и полынными сообществами. В ее составе встреча-

³ The Environmental Behaviour of Uranium / F.P. Carvalho, S. Fesenko, A.R. Harbottle et al. // Technical Reports Series No. 488. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2023. P. 334–336.

ются петрофитный кустарник курчавка, травянистые многолетники (мятлик, тюльпан, лук и катран), а также эфемеровое разнотравье. Результаты биогеохимического опробования представлены в табл. 2.

Таблица 2. Среднее содержание элементов в растении полыни и почве на территории вокруг Дигмайского хвостохранилища (Таджикистан)

Элементы	Годы замеров								
	2001			2015			2020		
	растение, %	почва, %	$K_{\text{бп}}$	растение, %	почва, %	$K_{\text{бп}}$	растение, %	почва, %	$K_{\text{бп}}$
Mn	0,011	0,04	0,3	0,001	0,001	1,0	0,065	0,0088	0,8
Ni	0,001	0,0018	0,6	0,0025	0,003	0,8	0,0025	0,0031	0,8
V	0,0024	0,002	1,2	0,005	0,002	2,5	0,0054	0,002	2,8
Cr	0,0018	0,0022	0,8	0,0022	0,0011	2,0	0,006	0,0087	0,8
Pb	0,0056	0,0006	9,5	0,002	0,001	2,0	0,007	0,0025	2,3
Zn	0,0086	0,001	8,6	0,0066	0,001	6,6	0,0085	0,0015	5,2
U	0,001	0,0007	1,3	0,001	0,0008	1,2	0,002	0,0011	2,0

Источник: составлено Х.М. Назаровым, Ж. Чимэбазарыным.

Сравнительный анализ данных табл. 2 показал, что биохимические процессы в слоях растений и почвы повлияли на количество подвижных форм отдельных элементов. За этот период содержание свинца в почвах увеличилось примерно в 2,6 раза, в то время как содержание ванадия осталось неизменным. Высокий рост загрязнения отмечался в 2015 г. Это обусловлено высушиванием прудка хвостохранилища, увеличением пылящей поверхности и объемов выносимого материала. В период 2016–2017 гг. по инициативе Исполнительного органа государственной власти в Согдийской области была проведена частичная рекультивация (200 тыс. м²) поверхности хвостохранилища. Это способствовало некоторому улучшению радиоэкологической ситуации на прилегающих территориях вокруг хвостохранилища. Подтверждением этого служат данные, полученные в 2020 г.

Ситуация в Кыргызстане. Содержание микроэлементов в почвенном покрове на территории урановой природно-техногенной провинции Мин-Куш находится в пределах допустимых концентраций, за исключением почв хвостохранилищ «Туюк-Суу» и «Дальний», штольной на жилых площадках № 17 и 21. На указанных объектах выявлены повышенные концентрации Mn, Co, Ni, Ti, Cr и Pb по сравнению с предельно допустимыми концентрациями и установленными биогеохимическими критериями [16]. Установлено, что в почвах отдельных природно-техногенных участков данного хвостохранилища удельная активность естественных радионуклидов превышает Кларковые значения: ²³⁸U в 10–15 раз, ²²⁶Ra в 15–20 раз, ²³²Th и ⁴⁰K в 1–1,5 раза.

Ситуация в Монголии. Природные радиоактивные элементы (Th, U и Rn) сопутствуют процессам горнодобывающего производства меди, молибдена, железа и вольфрама. Регулярное проведение взрывных работ способствует высвобождению значительных количеств радона из недр, что приводит к фор-

мированию зоны повышенной концентрации радона. Под воздействием ветровых потоков данная зона может распространяться в направлении близлежащего населенного пункта — города Эрдэнэт.

Хвостовой материал характеризуется высоким содержанием мелко-дисперсных частиц: около 76 % составляют частицы размером менее 80 мкм, а около 24 % — частицы размером менее 10 мкм. При скорости ветра свыше 5,4 м/с эти частицы легко переходят во взвешенное состояние и переносятся воздушными потоками в виде пыли. Находясь во взвешенном состоянии, пыль оказывает неблагоприятное воздействие на здоровье населения и животных, прежде всего на органы дыхания, а также способствует ухудшению качества атмосферного воздуха⁴.

Биогеохимические карты — схемы пространственного распределения элементов на территории предприятия «Эрдэнэтин-Овоо» — являются подтверждением вышесказанному. Содержания элементов (Cs, Tb, Ta, Th) объясняются природными факторами, причем содержания Ta, Th могут объясняться геологическими факторами. Полученные данные могут быть использованы для разработки и реализации программы реабилитации урановых отходов в г. Эрдэнэт Монголии.

Заключение

Анализ состояния радиоактивных хвостохранилищ — уранового наследия советского периода в странах Центральной Азии и Монголии — показывает идентичность формирования значительного количества радиоактивного хвостового материала. В связи с тем, что места добычи и переработки урана в этих странах Центральной Азии размещены в гористой местности над долиной трансграничной реки Сырдарья, проходящей по их территории, загрязнение радионуклидами от такого наследия имеет тенденцию к широкому распространению. В процессе пыления хвостохранилища в атмосферу поступает большое количество твердых частиц, негативно влияющих на здоровье населения, а также на окружающую среду.

Таким образом, в целях обеспечения радиационной безопасности в странах Центральной Азии и Монголии необходимо принять комплекс неотложных мер, включающих:

- системный радиологический контроль по всей территории горнодобывающих предприятий;
- установление конкретных источников радиационного воздействия;
- разработка и реализация программы реабилитации урановых отходов.

Считаем целесообразным обеспечение единого подхода указанных стран Центральной Азии и Монголии к решению существующих проблем по реабили-

⁴ Бямбасурэн Б. Геоэкологические проблемы хвостохранилищ месторождения Эрдэнэт и их проявление в биогеохимических полях (Монголия) : магистерская дис. Томск, 2019. 126 с.

литации территорий, подвергшихся радиационному воздействию, усиления координации и взаимодействия в данном направлении по реализации крупных национальных и международных проектов с участием международных организаций.

Рекомендации:

По Таджикистану. В дальнейшем разработать и реализовать проекты по безопасному управлению урановым наследием Северного Таджикистана:

– закрыть поверхности Дигмайского хвостохранилища местным грунтом из прилегающих холмов;

– передислоцировать хвосты из Адрасманского хвостохранилища в безопасное место или усилить дамбу и построить водоотводной канал;

– провести рекультивационные работы на поверхности хвостохранилища цеха № 3 гидрометаллургического завода г. Истиклола.

По Кыргызстану. Рассмотреть возможность приведения в безопасное состояние пяти наиболее крупных хвостохранилищ — 3 в поселке Сумсар, 2 в поселке Кан и горных отвалов в Тоо-Моюн и в поселке Кызыл-Жар.

По Монголии. Разработать и реализовать стратегию мероприятий по рекультивации радиоактивных хвостохранилищ уранового производства на период 2026–2030 гг.

Список литературы

- [1] Сырьевая база атомной промышленности. События, люди, достижения / под общ. ред. Н.П. Петрухина ; авт.-сост. Ю.В. Нестеров, Н.П. Петрухин. Москва : Атомредметзолото, 2015. 286 с.
- [2] Ren M. Uranium of Mongolia // *Economic Geology*. 2007. Vol. 102. No. 2. P. 335. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.2.335>
- [3] Мирсаидов И., Назаров Х.М., Саломов Дж.А. Радиоактивные хвостохранилища Таджикистана: проблемы и решения. Душанбе : ООО «Аршан», 2022. 206 с.
- [4] Дженбаев Б.М., Калдыбаев Б.К., Жолболдиев Б.Т. Проблемы радиоэкологии и радиационной безопасности бывших урановых производств в Кыргызстане // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2013. Т. 53. № 4. С. 428–431. <https://doi.org/10.7868/S0869803113040061> EDN: QYNKLF
- [5] Ветров В.И., Кротков В.В., Куниченко В.В. Создание предприятий по добыче и переработке урановых руд // *Создание первой советской ядерной бомбы*. Москва : Энергоиздат, 1995. С. 170–198.
- [6] Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. Москва : ИздАТ, 2000. 382 с.
- [7] Мирсаидзода И., Ахмедов М.З., Баротов Б.Б., Назаров Х.М., Хамидов Ф.А. Радиоэкологическая ситуация в Республики Таджикистан. Душанбе : Дониш, 2021. 114 с.
- [8] Назаров Х.М., Эрматов К.А., Саломов Д.А., Бахронов С.М., Мирсаидов У.М. Оценка потенциальной радиационной опасности бывших урановых объектов для населения г. Истиклол Республики Таджикистан // *Радиационная гигиена*. 2018. Т. 11. № 2. С. 83–90. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-2-83-90> EDN: OYVYFL

- [9] Назаров Х.М., Эрматов К.А., Бахронов С.М., Мухамедова С.Г., Мирсаидов У.М. Оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилища Дигмай (Таджикистан) для населения, проживающего вокруг него // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12. № 1. С. 115–121. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-1-115-121> EDN: ZDWZXX
- [10] Хакимова Н.У., Зоитова М.А. Урановые хвостохранилища г. Истиклола: история, проблемы, решения // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 2. С. 102–113. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-2-102-113> EDN: QELGQR
- [11] Жолболдиев Б.Т. Радиоэкологическая оценка загрязнения территории бывшего уранового производства Каджи-Сай : дис. ... канд. биол. наук. Бишкек, 2016. 111 с.
- [12] Жумалиев Т.Н. Экология почвенного покрова урановой природно-техногенной провинции Мин-Куш : дис. ... канд. биол. наук. Бишкек, 2023. 148 с.
- [13] Жолболдиев Б.Т. Современная радиационная обстановка на участке Каджи-Сай — Ак-Терек Иссык-Кульской области // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2016. № 1. С. 111–113. EDN: VRGAGJ
- [14] Хусаинов А.Т., Софронова Л.И. Влияние урановых хвостохранилищ Степногорского гидрометаллургического завода на загрязнение поверхностных и подземных вод // Вестник науки КазАТУ им. С. Сейфуллина. 2011. № 4 (71). С. 44–50.
- [15] Erkhembayar Ts., Yasuda N., Muhammad Q., Nizam R., Khosbayar E., Chimedtsogzol N., Erdenegerel Ch. Radioactive background in some uranium deposits of Mongolia // The International Journal of Engineering and Science. 2023. Vol. 12. No. 12. P. 29–38. <https://doi.org/10.9790/1813-12122839>
- [16] Прохоренко В.А., Худайбергенова Э.М., Жолболдиев Б.Т., Узбеков Б.А. Изотопный состав почвенного покрова ураново-природно-техногенной провинции Каджи-Сай // Известия Национальной академии наук Кыргызстана. 2015. № 3. С. 26–29. EDN: ХСРТМХ

Сведения об авторах:

Мирсаидов Улмас, доктор химических наук, профессор, академик НАН Таджикистана, главный научный сотрудник Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана, Таджикистан, 734025, г. Душанбе, пр. Рудаки, д. 33. ORCID: 0009-0003-8023-8771. E-mail: ulmas2005@mail.ru

Назаров Холмурод Марипович, доктор технических наук, профессор, заместитель директора Филиала Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана в Согдийской области, Таджикистан, 735730, г. Бустон, ул. Б. Гафуров, д. 1а. ORCID: 0009-0001-5844-6166. eLIBRARY SPIN-код: 7176-2070. E-mail: holmurod18@mail.ru

Цэрэн Даваадорж, кандидат физико-математических наук по ядерной физике, член Совета по радиационной безопасности Комиссии по атомной энергии Монголии, Лаборатория радиационной биофизики, Институт физики и технологий Монгольской академии наук, Монголия, 17032, г. Улан-Батор, Хан-Уульский район, ул. Хороо Уйдверчдин, д. 2. ORCID: 0009-0004-0544-4708. E-mail: tseren_davaadorj@yahoo.de

Чимэдбазарын Жаргал, кандидат физико-математических наук, ядерная физика, ядерная инженерия, ядерный топливный цикл и нераспространение, член Совета ученых Комиссии по ядерной энергии Монголии, Монголия, 17032, г. Улан-Батор, Хан-Уульский район, ул. Хороо Уйдверчдин, д. 2. ORCID: 0009-0002-5467-1072. E-mail: jargal.chimedbazaryn@gmail.com

ЭКОЛОГИЯ ECOLOGY

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-3-433-447

EDN: EZQFPX

УДК 574:504.064

Научная статья / Research article

Оценка состояния зеленых насаждений г. Таруса

Е.А. Парахина^{id}, В.А. Брундукова^{id}✉*Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация*✉ mashkova-vanat@rudn.ru

Аннотация. Исследование посвящено комплексному изучению состояния зеленых насаждений города Таруса Калужской области, направленному на оценку экологического состояния ландшафтов и разработку рекомендаций для их устойчивого развития. Проведены инвентаризация флоры, оценка состояния деревьев, кустарников, газонов и цветников в различных функциональных зонах (транспортной, селитебной, общественной, промышленной), а также применен метод NDVI для анализа динамики растительного покрова. Результаты исследования выявили значительную деградацию зеленых насаждений: 36 % деревьев и 55 % газонов находятся в неудовлетворительном состоянии, а 59 % видов растений встречаются фрагментарно. На основе полученных данных предложены меры по оптимизации городского озеленения, включая санитарную обрезку, посадку устойчивых видов и борьбу с инвазионными растениями. Практическая значимость работы заключается в возможности применения результатов для градостроительного планирования и экологического мониторинга не только в Тарусе, но и в других малых исторических городах.

Ключевые слова: антропогенная нагрузка, урбанизированная среда, устойчивое развитие, NDVI

Вклад авторов. *Парахина Е.А.* — концептуализация, методология, администрирование проекта, руководство исследованием. *Брундукова В.А.* — проведение исследования, формальный анализ, создание рукописи и ее редактирование, визуализация. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках НИР 202727-0-000 «Зеленая инфраструктура как основа экологического благополучия и устойчивого развития урбанизированной среды».

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Парахина Е.А., Брундукова В.А., 2026

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных. Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

История статьи: поступила в редакцию 09.11.2025; доработана после рецензирования 12.02.2026; принята к публикации 02.03.2026.

Для цитирования: Парахина Е.А., Брундукова В.А. Оценка состояния зеленых насаждений г. Таруса // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 3. С. 433–447. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-433-447> EDN: EZQFPX

Assessment of the state of green areas in Tarusa

Elena A. Parakhina , Varvara A. Brundukova  

RUDN University, Moscow, Russian Federation

 mashkova-vanat@rudn.ru

Abstract. The research is devoted to a comprehensive study of the state of green plantations in the town of Tarusa, the Kaluga Region, aimed at assessing the ecological condition of the landscapes and developing recommendations for their sustainable development. The work involved an inventory of flora, an assessment of the state of trees, shrubs, lawns, and flower beds in various functional zones (transport, residential, public, industrial), and the NDVI method was applied to analyze the dynamics of vegetation cover. The results of the study revealed significant degradation of green spaces: 36% of trees and 55% of lawns are in an unsatisfactory condition, and 59% of plant species are found fragmentarily. Based on the data obtained, measures for the optimization of urban landscaping are proposed, including sanitary pruning, planting of resistant species, and control of invasive plants. The practical significance of the work lies in the possibility of using the results for urban planning and environmental monitoring not only in Tarusa but also in other small historical towns.

Keywords: anthropogenic load, urban environment, sustainable development, NDVI

Authors' contribution. *E.A. Parakhina* — conceptualization, methodology, project administration, supervision. *V.A. Brundukova* — investigation, formal analysis, writing and editing of the manuscript, visualization. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Funding. The study was carried out within the framework of Research Work No. 202727-0-000 “Green in-frastructure as a basis for environmental well-being and sustainable development of an urbanized environment.”

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability. All data obtained during this study are included in the published article.

Article history: received 09.11.2025; revised 12.02.2026; accepted 02.03.2026.

For citation: Parakhina EA, Brundukova VA. Assessment of the state of green areas in Tarusa. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(3):433–447. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-433-447> EDN: EZQFPX

Введение

Город Таруса — небольшой по площади и населению город Калужской области, административный центр Тарусского муниципального округа¹. Площадь округа — 715 км², площадь города Таруса — 12 км². По состоянию на 31 декабря 2021 г. население Тарусского муниципального округа составляет 15 384 чел., города Таруса — 9918 чел.²

Сохранение природного наследия и устойчивое развитие региона являются важными задачами. В городах формируются урбозкосистемы, имеющие сложное строение и находящиеся под постоянным антропогенным влиянием. Малые города, к которым относится и Таруса, требуют большого внимания в связи с их уязвимостью, в том числе и экологической. При этом изучению урбозкосистем малых городов уделяется мало внимания [1–8].

Основные геоморфологические элементы, присущие ландшафтам города: холмы, овраги и балки, пойма реки Оки. Климат умеренно континентальный.

Развитие туризма приводит к растущему антропогенному воздействию. Увеличение рекреационной нагрузки, застройка территорий и изменение природных ландшафтов требуют комплексного анализа экологического состояния города. Особую значимость приобретает изучение зеленых насаждений, которые выполняют ключевые функции в поддержании экологического равновесия городской экосистемы [9–11].

Цель исследования — оценка современного состояния экосистем Тарусы и разработка рекомендаций для их устойчивого развития. В рамках работы решались следующие задачи:

- 1) анализ видового состава флоры и степень распространения каждого вида по функциональным зонам;
- 2) оценка жизненного состояния деревьев, кустарников и трав с использованием полевых методов и расчета NDVI;
- 3) разработка мер по оптимизации городского озеленения.

Исследования проводились в 2023–2025 гг. Впервые выполнена комплексная инвентаризация зеленых насаждений Тарусы, выявлены зоны наибольшей экологической нагрузки и предложены адаптивные решения для их восстановления.

¹ Информация о Тарусе // Администрация (исполнительно-распорядительный орган) городского поселения «Город Таруса». URL: <https://tarusagorod.ru/informaciya-o-taruse.html> (дата обращения: 05.09.2025).

² Тарусский район // Администрация МР «Тарусский район». URL: <https://tarusa.gosuslugi.ru/o-munitsipalnom-obrazovanii/> (дата обращения: 05.09.2025).

Методы исследования

Комплексная оценка городских экосистем проводилась через самый активный компонент — растения. В пределах города Тарусы были выделены четыре функциональные зоны:

- 1) транспортная — проанализировано состояние придорожных газонов, а также древесно-кустарниковых растений (при их наличии);
- 2) селитебная — объектом оценки стали зеленые насаждения жилых кварталов: газоны, цветники, кустарники и деревья;
- 3) общественная — оценке подлежало состояние всех элементов озеленения: парковых газонов, декоративных клумб, древесных насаждений;
- 4) промышленная — изучено состояние насаждений, расположенных в пределах промышленных районов.

Были заложены пробные площадки во всех функциональных зонах (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения точек оценки состояния городской растительности в Тарусе

Источник: составлено В.А. Брундуковой по: Карта точек по оценке состояния зеленых насаждений.

URL: <https://yandex.ru/maps/20208/tarusa/?ll=37.166359>

%2C54.729619&mode=usermaps&source=constructorLink&um=constructor

%3Aac874c981addcc86ecf594f1e9a04be60a42d95cc967e405aed55b9c3a0fc64f&z=13

(дата обращения: 03.08.2025).

В основу оценки положена балльная система в соответствии с приказом Госстроя РФ от 15 декабря 1999 г. № 153 «Об утверждении правил создания, охраны и содержания зеленых насаждений в городах Российской Федерации». Согласно методике зеленые насаждения оцениваются по трехбалльной системе: 3 балла — хорошее состояния (отсутствие повреждений, нормальное развитие); 2 балла — удовлетворительное состояния (незначительные повреждения,

сниженная жизнеспособность); 1 балл — неудовлетворительное состояние (сильные повреждения, угнетенность); 0 баллов — объект не встречается на участке.

Был составлен список видового разнообразия высших сосудистых растений, встреченных на пробных площадках. Для каждого вида приведены его характеристики: таксономическая оценка, морфологические особенности, зоны произрастания, частота встречаемости. Это позволило получить данные о флоре исследуемой территории [12].

Для выявления закономерностей пространственного распределения видов проанализирована степень распространенности каждого вида.

Оценка жизненного состояния растений производилась в вегетационные сезоны 2023–2025 гг. согласно методике, утвержденной приказом Госстроя РФ от 15 декабря 1999 г. № 153 «Об утверждении правил создания, охраны и содержания зеленых насаждений в городах Российской Федерации»³. Также использовались и дистанционные методы. Был рассчитан NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). NDVI рассчитывается по формуле

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}},$$

где NIR — отраженная инфракрасная радиация; RED — отраженная красная радиация.

Для расчета индекса NDVI использовались космические снимки Landsat 8, которые впоследствии были обработаны в среде QGIS. Визуализация полученных результатов выполнена с помощью цветового градиента: от красного (минимальные значения вегетационной активности) до зеленого (максимальные значения). На основе рассчитанных данных вся территория была классифицирована по пороговым значениям NDVI на классы: густая растительность, разреженная растительность, открытая почва, водные объекты, искусственные поверхности [13].

Результаты и обсуждение

В ходе работы проведены полевые исследования на 32 пробных площадках в городе Таруса, охватывающих разные функциональные зоны. На основе полученных данных составлен аннотированный список флоры, включающий все выявленные виды и их характеристики. Полученные результаты наглядно отражают состояние растительности в условиях антропогенного воздействия и позволяет оценить степень трансформации городских экосистем [2].

³ Приказ Государственного комитета Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу от 15 декабря 1999 г. № 153 «Об утверждении правил создания, охраны и содержания зеленых насаждений в городах Российской Федерации». URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=49758&ysclid=mq0owj5to069896350> (дата обращения: 12.07.2025).

В результате оценки на 32 пробных площадках был зафиксирован 71 вид высших сосудистых растений. Среди древесных растений доминируют ель обыкновенная (*Picea abies* (L.) Н. Karst.), отмеченная на 7 точках исследования, а также клен ясенелистный (*Acer negundo* L.) и липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.), частота встречаемости которых составила 6 участков. Среди травянистых растений наиболее часто отмечен лопух паутинистый (*Arctium tomentosum* Mill.) — на 7 участках. 59 % видов встречаются на площадках единожды.

В систематической структуре флоры Тарусы, согласно полученным данным, ведущее положение занимают семейства *Rosaceae*, *Salicaceae* и *Aceraceae*. Это в целом согласуется с исследованиями по другим городам: в Кинешме крупными семействами являются *Rosaceae* (42 вида) и *Salicaceae* (20 видов), а в Дубне — *Rosaceae* (40 видов) и *Salicaceae* (22 вида) [6; 7]. Преобладание этих семейств отражает общие тенденции формирования флоры в урбанизированных условиях умеренной зоны.

Растительность Тарусы характеризуется преобладанием деревьев над кустарниками и лианами, что типично для городских дендрофлор Центральной России. В Кинешме также доминируют деревья, хотя доля кустарников там выше [14]. В Дубне, напротив, отмечено большее разнообразие кустарниковых форм, что может быть связано с более широким использованием их в стихийном озеленении частного сектора [15].

Общей проблемой для Тарусы, Кинешмы и Дубны является внедрение инвазионных видов в природные сообщества. В Кинешме 12 видов являются инвазионными (например, *Acer negundo* L., *Populus alba* L., *Fraxinus pennsylvanica* Marsh.) [14]. В Дубне агрессивное поведение отмечено у *Acer negundo* L., *Amelanchier spicata* (Lam.) K. Koch, *Hippophae rhamnoides* L. и других видов [15]. В Тарусе, согласно проведенным наблюдениям, также активно расселяются инвазионные виды (например, *Acer negundo* L., *Solidago canadensis* L.), что требует постоянного мониторинга и контроля за их распространением.

Устойчивость урбоэкосистем зависит не только от видового разнообразия, но и от жизненного состояния растений. В результате анализа полученных данных в ходе исследования была создана сводная таблица с оценкой их жизненного состояния (табл. 1).

Данный подход позволил унифицировать оценку состояния древесно-кустарниковой растительности, цветников и газонов для последующего анализа и сравнения.

Анализ состояния древесных насаждений позволил выявить следующее: более трети (36 %) всех участков характеризуются неудовлетворительным состоянием деревьев. Наиболее часто древесные растения в таком состоянии встречаются в селитебных (7 участков) и транспортных (2 участка) зонах. Удовлетворительное и хорошее состояние фиксируется значительно реже —

на 6 и 10 % участков соответственно, причем деревья с соответствующими жизненными состояниями рассредоточены по разным функциональным зонам. Важным фактором является полное отсутствие деревьев почти на половине (48 %) обследованных пробных площадках (рис. 2).

Таблица 1. Жизненное состояние растений города Таруса

Номер участка	Жизненное состояние деревьев	Жизненное состояние кустарников	Жизненное состояние газонов	Жизненное состояние цветников
1	0	0	1	0
2	2	0	1	0
3	3	2	1	0
4	0	1	2	0
5	1	3	2	2
6	1	1	1	0
7	0	0	2	0
8	1	1	2	0
9	0	2	1	0
10	0	3	2	1
11	0	2	0	2
12	0	1	1	0
13	1	1	1	0
14	1	1	1	1
15	1	2	1	0
16	1	0	1	0
17	1	0	1	0
18	3	2	1	0
19	1	0	1	0
20	0	1	2	1
21	3	0	2	0
22	0	3	2	3
23	0	2	2	2
24	0	2	0	2
25	0	2	3	2
26	1	0	1	1
27	0	0	1	1
28	0	1	1	1
29	0	2	2	1
30	1	0	1	0
31	2	0	2	0
32	0	0	1	0

Источник: составлено В.А. Брундуковой.

Жизненное состояние кустарников, в отличие от деревьев, на территории г. Таруса лучше (рис. 3). Хотя доля участков, полностью лишенных кустарников, также высока (38 %), их удовлетворительное состояние встречается почти втрое чаще (28 % против 6 % у деревьев). Эти участки в основном сосредоточены в селитебных и общественных зонах (по 4 участка). При этом доля

насаждений в неудовлетворительном (25 %) и хорошем (9 %) состоянии распределена по разным функциональным зонам без выраженного доминирования какой-либо одной.

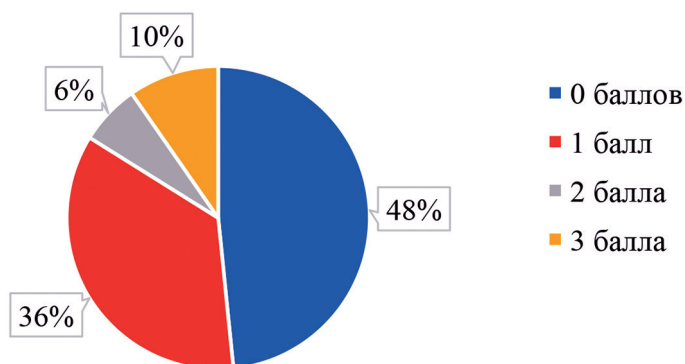


Рис. 2. Жизненное состояние деревьев

Источник: составлено В.А. Брундуковой.

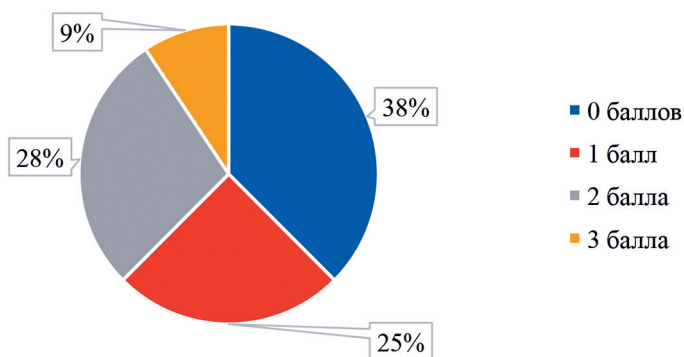


Рис. 3. Жизненное состояние кустарников

Источник: составлено В.А. Брундуковой.

По результатам анализа жизненного состояния травянистых растений на газонах выявлена критическая ситуация: более половины (55 %) участков имеют неудовлетворительное покрытие, причем проблема наиболее остро стоит в селитебной зоне (9 участков) (рис. 4). Газоны в удовлетворительном состоянии встречаются реже (36 %) и также в основном сконцентрированы в жилых районах. Хорошее состояние газона было зафиксировано лишь на одном участке (3 %) в общественной зоне. Еще 6 % территорий полностью лишены газонов.

Оценивая жизненное состояние растений цветников, важно отметить, что они полностью отсутствуют на 59 % обследованных территорий (рис. 5). Из имеющихся цветников большая часть (22 % от общего числа пробных площадок) находится в неудовлетворительном состоянии, причем они сосредоточены в общественной и селитебной зонах. Удовлетворительное состояние

зафиксировано у растений цветников лишь на 16 % участков. Примечательно, что цветник в хорошем состоянии был найден всего на одном участке (3 %) в общественной зоне, что подчеркивает остроту проблемы.

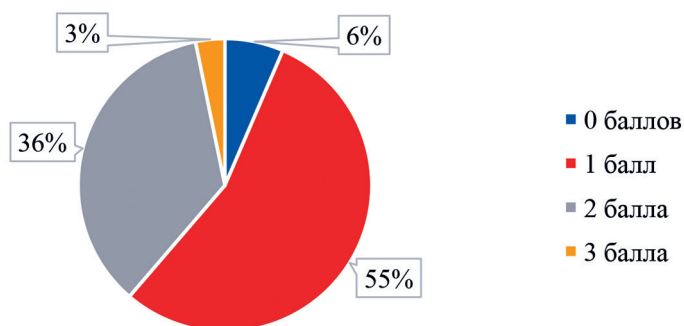


Рис. 4. Жизненное состояние газонов
Источник: составлено В.А. Брундуковой.

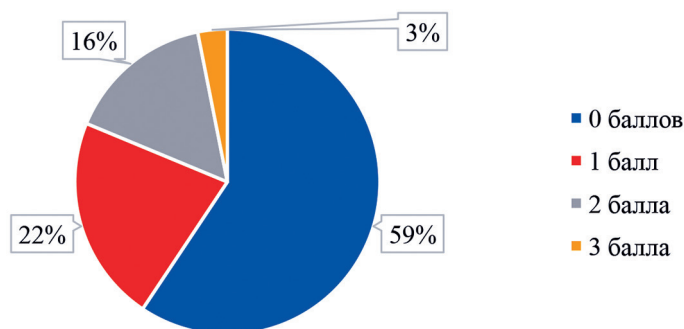


Рис. 5. Жизненное состояние цветников
Источник: составлено В.А. Брундуковой.

На основе проведенных исследований была проведена оценка жизненного состояния растений в разных функциональных зонах города Таруса.

Транспортная зона: участки вдоль дорог, магистралей, перекрестков. Высокая антропогенная нагрузка из-за загазованности, засоления почв, механических повреждений растений:

- жизненное состояние деревьев: в среднем 2–3 балла. В удовлетворительном состоянии — *Acer negundo* L., *Tilia cordata* Mill. Наблюдается замедленный рост, частичное усыхание крон. В хорошем состоянии — единичные экземпляры *Picea abies* L., устойчивые к загрязнениям;

- жизненное состояние кустарников: в среднем 1–2 балла. Преобладает неудовлетворительное состояние — спирея японская, пузыреплодник калинолистный с оголенными нижними ветвями. В удовлетворительном состоянии — сирень обыкновенная, но с редким цветением;

- жизненное состояние растений газонов: в среднем 1–2 балла. Изреженные, с доминированием сорных видов (пырей ползучий, подорожник большой);

– жизненное состояние растений цветников: в среднем 0–2 балла. На большинстве участков отсутствуют, редкие клумбы с бархатцами в удовлетворительном состоянии.

Высокая антропогенная нагрузка приводит к угнетению растений, особенно вдоль оживленных дорог.

Селитебная зона: жилые кварталы (частный сектор, многоэтажная застройка). Умеренная рекреационная нагрузка, локальное загрязнение:

– жизненное состояние деревьев: в среднем 1–2 балла. В удовлетворительном состоянии — липа, ясень в частных дворах. В неудовлетворительном — старые тополя с дуплами, суховершинностью;

– жизненное состояние кустарников: в среднем 2–3 балла. Удовлетворительное состояние — шиповник морщинистый, жимолость лесная. В хорошем состоянии — декоративные посадки (спирея белая, дерен белый);

– жизненное состояние растений газонов: частично вытоптаны, но в частном секторе встречаются ухоженные участки;

– жизненное состояние растений цветников: по большей части в удовлетворительном состоянии (пионы, ирисы).

Состояние растений варьируется в зависимости от ухода. В частном секторе — лучше, в многоэтажном — выявляется деградация газонов.

Общественная зона: парки, скверы, площади. Активное рекреационное использование:

– жизненное состояние деревьев: хорошее — липы, клены в парковых зонах;

– жизненное состояние кустарников: декоративные посадки (спирея белая, пузыреплодник калинолистный) в хорошем состоянии;

– жизненное состояние растений газонов: ухоженные, но местами вытоптаны;

– жизненное состояние растений цветников: клумбы с многолетними растениями в хорошем состоянии.

Лучшее состояние растений поддерживается благодаря уходу, но рекреационная нагрузка приводит к локальной деградации.

Промышленная зона: территории предприятий. Загрязнение почв, воздушной среды:

– жизненное состояние деревьев — неудовлетворительное, наблюдаются некрозы коры;

– жизненное состояние кустарников — практически отсутствуют или сильно угнетены;

– жизненное состояние растений газонов: изреженные, с сорняками;

– жизненное состояние растений цветников: отсутствуют.

Наиболее уязвимыми зонами оказались транспортная и промышленная — происходит угнетение растений из-за загрязнения. В селитебной зоне состоя-

ние зависит от уровня благоустройства. Наилучшее состояние растительности в общественных зонах. По итогам исследования составлена карта, отражающая состояние ландшафтов в городе (рис. 6).

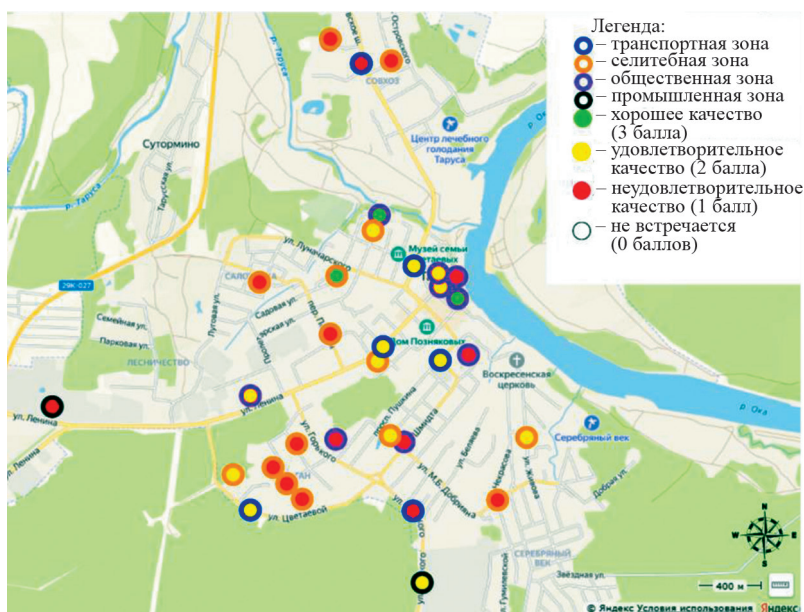


Рис. 6. Карта состояния ландшафтов в городе Таруса

Источник: составлено В.А. Брундуковой по: Карта точек по оценке состояния зеленых насаждений.

URL: <https://yandex.ru/maps/20208/tarusa/?ll=37.166359>

%2C54.729619&mode=usermaps&source=constructorLink&um=constructor

%3Aac874c981addcc86ecf594f1e9a04be60a42d95cc967e405aed55b9c3a0fc64f&z=13

(дата обращения: 03.08.2025).

Для количественной оценки динамики состояния растительного покрова г. Таруса был использован нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI). Его расчет проводился на основе данных дистанционного зондирования Земли, охватывающих многолетний период с 2001 по 2023 г.

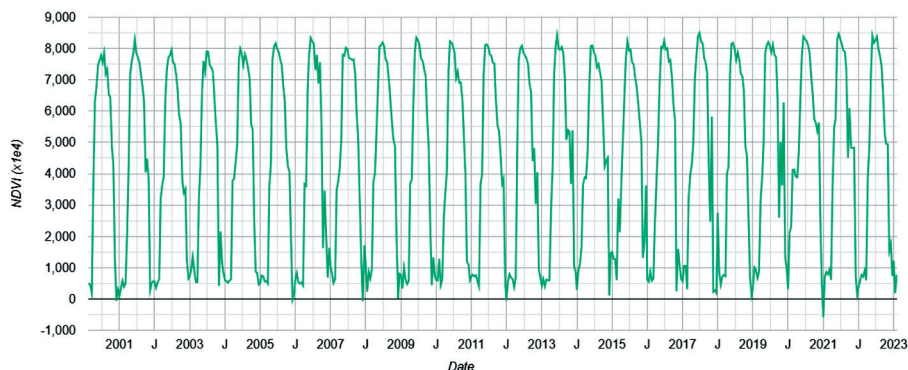


Рис. 7. Показатель NDVI с 2001 по 2023 г.

Источник: составлено В.А. Брундуковой с помощью Interactive NDVI Map.

URL: <https://digital-dryads.eu/interactive-ndvi/> (дата обращения: 03.08.2025).

Анализ временной динамики (рис. 7) позволяет выделить несколько устойчивых тенденций:

- 1) четко выраженный годовой цикл с пиковыми значениями (0,6–0,8) в июле-августе и минимумами (0,1–0,2) в январе-феврале, что объясняется сменой времен года и снижением количества зеленой растительности в зимний период;
- 2) амплитуда сезонных колебаний составляет 0,5–0,6, что типично для смешанных лесов умеренной зоны;
- 3) статистически значимое ($p < 0,05$) снижение среднегодовых значений NDVI с $0,52 \pm 0,03$ (2001–2005 гг.) до $0,45 \pm 0,04$ (2019–2023 гг.);
- 4) наибольшие отрицательные аномалии (–15–20 % от нормы) зафиксированы в 2010, 2015 и 2021 гг.

Полученные результаты свидетельствуют о прогрессирующей деградации растительных сообществ на 18–22 % территории города.

С помощью программы QGIS проанализирован космический снимок за 28.06.2024 и рассчитан NDVI (рис. 8).

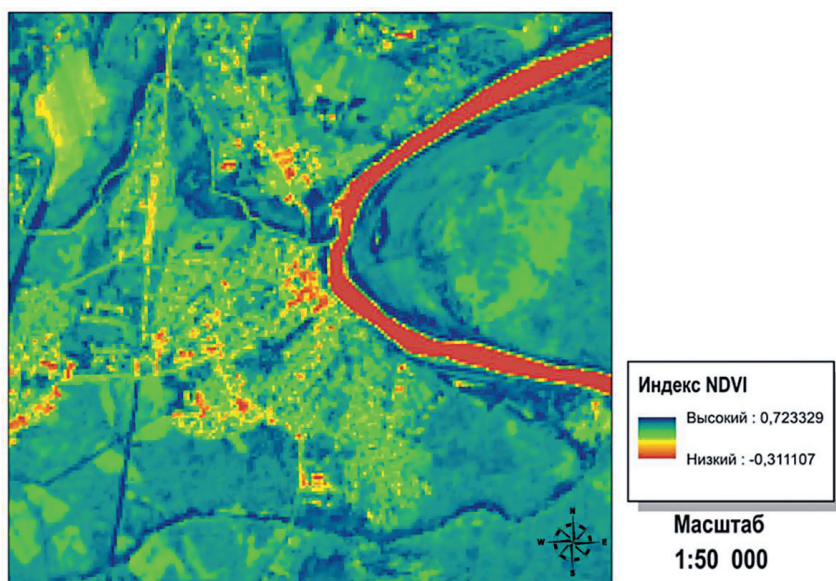


Рис. 8. Индекс NDVI на карте г. Таруса

Источник: составлено В.А. Брундуковой при помощи программы QGIS.

Анализ значений NDVI выявил значительный разброс показателей: максимальное значение индекса (0,723) соответствует зонам с высокой фотосинтетической активностью, таким как пойменные дубравы и хвойные массивы, в то время как минимум (–0,311) характерен для территорий с плотной застройкой и мостовыми сооружениями. Пространственное распределение различных классов вегетационной активности по районам города систематизировано в табл. 2.

Таблица 2. Распределение на классы NDVI

Класс	Процент территории, %	Пример в городе
Густая растительность	15	Северные и восточные окраины
Разреженная растительность	30	Парки, скверы
Открытая почва	25	Агроландшафты, пустыри
Водные объекты	10	Река Ока, Таруса, пруды
Искусственные поверхности	20	Центр города, дороги

Источник: составлено В.А. Брундуковой.

Вдоль реки Ока сохранились полосы густой растительности, что свидетельствует о наличии устойчивых пойменных экосистем. В то же время участки вблизи реки Тарусы характеризуются низкими значениями NDVI ($< 0,025$), указывающими на возможные процессы заиления или сильное антропогенное воздействие.

Вокруг центра города наблюдается кольцевая зона разреженной растительности, вероятно, сформированная в результате программ озеленения.

Наиболее проблемными являются территории на юге города со значениями NDVI в диапазоне 0,025–0,5, где необходимы меры по рекультивации, такие как посев устойчивых травянистых видов.

Заключение

Апробирована методика качественной оценки насаждений по балльной системе, где 3 — хорошее состояние, 2 — удовлетворительное, 1 — неудовлетворительное. Получены следующие результаты:

- деревья: 36 % — неудовлетворительное состояние, 6 % — удовлетворительное состояние, 10 % — хорошее состояние;
- кустарники: 25 % — неудовлетворительное состояние, 28 % — удовлетворительное состояние, 9 % — хорошее состояние;
- газоны: 55 % — неудовлетворительное состояние, 36 % — удовлетворительное состояние, 3 % — хорошее состояние;
- цветники: 22 % — неудовлетворительное состояние, 16 % — удовлетворительное состояние, 3 % — хорошее состояние.

Зафиксирован 71 вид растений, из которых 59 % встречаются единожды, что свидетельствует о фрагментированности экосистем. Наиболее распространенные виды: ель европейская (*Picea abies*), лопух паутинистый (*Arctium tomentosum*).

Выявлены следующие ключевые проблемы ландшафтов города Таруса.

Деградация зеленых насаждений:

- 36 % обследованных деревьев находятся в неудовлетворительном состоянии (суховершинность, механические повреждения), а также выявлено преобладание малоустойчивых видов (клен ясенелистный) при недостатке коренных пород (дуб черешчатый, липа мелколистная);

– 55 % газонов имеют изреженный травостой с доминированием сорных видов (пырей ползучий, подорожник большой), а также присутствуют недостатки ухода за цветниками (22 % участков в неудовлетворительном состоянии);

Флористическое обеднение. Исчезновение типичных для пойменных лугов видов (злаки, разнотравье) на 40 % обследованных территорий. Заметно распространение инвазионных растений (например, золотарник канадский).

Несовершенство управленческих решений. Нехватка мониторинговых данных о состоянии почв, растительности и водных объектов.

Для решения выделенных проблем можно предложить следующие рекомендации:

– провести санитарную обрезку 100 % деревьев в неудовлетворительном состоянии;

– увеличить высадку наиболее широко распространенных видов деревьев, таких как липа мелколистная, дуб черешчатый;

– внедрить смеси трав для городских газонов (овсяница луговая, мятлик однолетний) на деградированных участках;

– ежегодно удалять инвазионные виды, такие как золотарник канадский и борщевик Сосновского механическим способом, а также постепенно вводить актуальные и наилучшие технологии по удалению этих видов;

– проводить мониторинговые работы по оценке состояния зеленых насаждений не менее одного раза в три года для возможности оперативного регулирования видового разнообразия города.

Список литературы

- [1] *Большова О.Г., Бухарина И.Л.* Состояние озеленения малых городов Липецкой области // В мире научных открытий. 2011. № 5-1 (17). С. 515–528. EDN: OPVZFJ
- [2] *Андропова М.М.* Таксономический состав и систематическая структура дендрофлоры г. Белозерска // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2016. № 4 (352). С. 54–60. <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.4.54> EDN: WJXSEX
- [3] *Папенов К.В., Никоноров С.М.* Малые города России в системе «историческое наследие — социо-эколого-экономическое состояние — концепции устойчивого развития» // Oeconomia et Jus. 2018. № 3. С. 12–29. EDN: YBCBHF
- [4] *Parakhina E.A., Silaeva Z.G., Kiseleva L.L., Chaadaeva N.N.* Assessment of the plantings in small towns of the Oryol region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Symposium “Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects”. 2020. Article no. 012114. EDN: OWKKLT
- [5] *Шабайкина В.А., Ларина А.В., Саулин В.А.* Оценка состояния системы озеленения г. Рузаевка с использованием многозональных космических снимков // Вектор Гео-Наук. 2020. Т. 3. № 3. С. 96–105. <https://doi.org/10.24411/2619-0761-2020-10036> EDN: OBPWJK
- [6] *Макаренко В.П., Жучков Д.В.* Современные проблемы озеленения малых и средних городов России // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2022. № 1 (46). С. 62–78. <https://doi.org/10.24412/2227-1384-2022-146-62-78> EDN: SLALKX

- [7] Парахина Е.А., Грядская А.А., Могилёва Е.Е., Нгуен Т.Ф. Устойчивое развитие малых городов на примере Орловской области // Куражковские чтения : материалы II Международной научно-практической конференции / сост. А.Н. Бармин. Астрахань, 2023. С. 595–599.
- [8] Жучков Д.В., Макаренко В.П., Фетисов Д.М. Зелёные насаждения как показатель качества городской среды (на примере малых и средних городов Приамурья) // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2025. № 2 (57). С. 49–66. <https://doi.org/10.24412/2227-1384-2025-257-49-66> EDN: DWFPMV
- [9] Чомаева М. Н. Роль зеленых насаждений для городской среды // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2020. №. 4-3. С. 12–14. <https://doi.org/10.24411/2500-1000-2020-10387> EDN: LIPGRO
- [10] Соловьева О. С., Соколова Н.А., Бажин О.Н., Гусейнова А.Р. Зеленые насаждения как средство улучшения экологии города // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2010. № 1. С. 75–83. EDN: MBWAZJ
- [11] Карташова Н. П., Елисеева Е. Н. Зеленые насаждения в городской среде // Агро-промышленные технологии Центральной России. 2019. № 4 (14). С. 102–108. <https://doi.org/10.24888/2541-7835-2019-14-102-108> EDN: IYDXKV
- [12] Машикова В.А. Оценка устойчивости экосистемы по видовому разнообразию растений на примере города Таруса // Научные чтения памяти профессора Б.М. Козо-Полянского — 2025 (LXVII) : материалы ежегодной Всероссийской научной конференции с международным участием / отв. ред. В.А. Агафонов. Воронеж : Цифровая полиграфия, 2025. С. 118–122. EDN: VNRLUJ
- [13] Павлов В.С., Тицкий П.В. Применение нормализованного вегетационного индекса (NDVI) для оценки качественных характеристик насаждений // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. Санкт-Петербург, 24–26 мая 2023 года. Санкт-Петербург, 2023. С. 88–91.
- [14] Борисова Е.А. Дендрофлора города Кинешмы Ивановской области // Вестник Ивановского государственного университета. Серия: Естественные, общественные науки. 2016. № 2. С. 5–10. EDN: WVOSIB
- [15] Дейнега Е.А., Алексеев Ю.Е., Жмылев П.Ю., Карпухина Е.А. Дендрофлора наукограда Дубна: разнообразие и однообразие // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2014. № 2. С. 14–24. EDN: SDFGED

Сведения об авторах:

Парахина Елена Александровна, кандидат биологических наук, доцент департамента рационального природопользования, институт экологии, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0002-2865-0780; eLIBRARY SPIN-код: 4045-3378. E-mail: parakhina-ea@rudn.ru

Брундукова Варвара Анатольевна, магистрант института экологии, специальность 01.04.02 «Прикладная математика и информатика», Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0009-0008-0051-6257; eLIBRARY SPIN-код: 7181-0323. E-mail: mashkova-vanat@rudn.ru



ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ ENVIRONMENTAL EDUCATION

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-3-448-466

EDN: EQIELI

УДК 338.48-6:502.13(470.311)

Научная статья / Research article

Экологические тропы Московской области в системе экологического образования: проблемы и перспективы развития

А.Д. Шалагинова^{id}, Т.М. Валькова*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская
Федерация*✉ alisashalaginova@mail.ru

Аннотация. На фоне усиливающегося антропогенного давления Московской области (далее — МО) на прилегающие территории развитие экологического туризма трансформируется в императив сохранения регионального биоразнообразия. Сложившаяся практика эксплуатации экологических троп как объектов досуга, а не просвещения вступает в конфликт с принципами устойчивого развития. В результате возникают риски деградации экосистем и упускаются возможности для формирования экологического сознания населения. Цель исследования — выявление системных барьеров, которые препятствуют эффективному функционированию экологических троп и разработке рекомендаций по интеграции этих объектов в региональную систему непрерывного образования. На основе анализа эмпирических данных о ключевых объектах региона автором проведена типологизация действующих маршрутов и вскрыты структурные проблемы отрасли — от выраженной сезонности до «методического вакуума». Новизна состоит в обосновании перехода от экстенсивного пути развития (увеличение километража троп) к интенсивному (насыщению маршрутов образовательными смыслами). Предложена оригинальная матрица решений, представленная внедрением подходов «гражданской науки» (Citizen Science) и цифровых технологий (EdTech), что поможет трансформировать туриста из пассивного созерцателя в активного исследователя. Сформулированные в исследовании предложения могут быть задействованы профильными министерствами, образовательными учреждениями в целях модернизации туристической инфраструктуры МО и создания инновационных обучающих продуктов.

Ключевые слова: рекреационный потенциал, устойчивый туризм, цифровизация образования, экологический туризм

© Шалагинова А.Д., Валькова Т.М., 2026

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Вклад авторов. Шалагинова А.Д. — концептуализация, разработка методологии исследования, работа с программным обеспечением, подготовка и написание черновика рукописи, визуализация, проведение исследования. Валькова Т.М. — научное руководство исследованием, редактирование рукописи, курирование данных. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление о доступности данных. Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При подготовке статьи использовались отдельные инструменты на основе технологий искусственного интеллекта для вспомогательных операций, связанных с поиском вариантов для формулировок заголовков разделов основной части. Все научные положения, анализ источников, интерпретация результатов и выводы сформулированы автором самостоятельно.

История статьи: поступила в редакцию 01.12.2025; доработана после рецензирования 21.01.2026; принята к публикации 12.02.2026.

Для цитирования: Шалагинова А.Д., Валькова Т.М. Экологические тропы Московской области в системе экологического образования: проблемы и перспективы развития // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 3. С. 448–466. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-448-466> EDN: EQIELI

Environmental trails of the Moscow region in the system of environmental education: problems and development prospects

Alisa D. Shalaginova , Tatiana M. Valkova

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

 alisashalaginova@mail.ru

Abstract. Against the backdrop of increasing anthropogenic pressure exerted by the Moscow Region (hereinafter-MR) on adjacent territories, the development of environmental tourism is becoming an imperative to preserve regional biodiversity. The established practice of using ecological trails as leisure rather than educational facilities conflicts with sustainable development. This creates risks of ecosystem degradation and misses opportunities for public environmental awareness. The aim of the study is to identify systemic barriers that hinder the effective functioning of environmental trails and to develop recommendations for integrating these facilities into the regional system of lifelong environmental education. Based on an analysis of empirical data on key regional sites, the author has carried out a typologization of existing routes and revealed structural problems — from pronounced seasonality to a “methodological vacuum.” The study’s novelty consists in providing a basis for the transition from an extensive development path (increasing the trail length) to an intensive one (enriching routes with educational content). An original solution matrix is

proposed, represented by the implementation of Citizen Science approaches and digital technologies (EdTech), enabling the transformation of visitors from passive observers into active investigators. The recommendations formulated in the article can be used by relevant ministries and educational institutions to modernize the MR's tourist infrastructure and to create innovative educational products.

Keywords: recreational potential, sustainable tourism, digitalization of education, environmental tourism

Authors' contribution. *A.D. Shalaginova* — conceptualization, methodology, software, writing — original draft, visualization, investigation. *T.M. Valkova* — Supervision, writing — review and editing, data curation. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. When preparing the article, certain tools based on artificial intelligence technologies were used for auxiliary operations related to finding options for formulating the section headings of the main part. All scientific propositions, analysis of sources, interpretation of results, and conclusions were formulated by the author independently.

Data availability. All data obtained during this study are included in the published article.

Article history: received 01.12.2025; revised 21.01.2026; accepted 12.02.2026.

For citation: Shalaginova AD, Valkova TM. Environmental trails of the Moscow region in the system of environmental education: problems and development prospects. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(3):448–466. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-448-466> EDN: EQIELI

Введение

В условиях постиндустриального развития общества и усиливающейся урбанизации взаимодействие человека с окружающей средой претерпевает фундаментальные изменения. Современный мегаполис, каким является Москва, оказывает колоссальное антропогенное давление на прилегающие территории, превращая Московскую область в зону интенсивной рекреационной нагрузки.

В рассматриваемом контексте формирование экологического сознания, развитие культуры природопользования становятся не рядовыми гуманитарными задачами, а факторами обеспечения экологической безопасности всего региона. Одним из наиболее действенных инструментов служит экологический туризм, который, в отличие от традиционных форм отдыха, опирается не только на потребление природных ресурсов, но и на их глубокое изучение, а также активное участие в их сохранении.

Ключевым элементом инфраструктуры экотуризма являются экологические тропы — специально оборудованные маршруты, которые прокладываются через природные объекты. Они обладают высокой эстетической, природо-

охранной и исторической ценностью. Для Московской области развитие сети таких маршрутов имеет стратегическое значение. По существу, они выполняют функцию «буфера», канализируя туристические потоки и снижая нагрузку на уязвимые экосистемы. Одновременно жителям мегаполиса предоставляется возможность качественной рекреации.

Система экологических троп области развивается фрагментарно. Наблюдается определенный дефицит комплексных научных исследований. Существующие маршруты часто создаются стихийно, без единой концептуальной базы, что существенно снижает их просветительский потенциал. Помимо этого, отсутствие четких стандартов обустройства и регулирования потоков посетителей вступает в противоречие с принципами устойчивого туризма, генерируя риски деградации природной среды. **Цель исследования** — выявление проблем и перспектив интеграции экотроп Московской области в систему непрерывного экологического образования.

Материалы и методы исследования

Теоретико-методологическую основу работы составил системный подход, что помогло рассмотреть совокупность экологических маршрутов региона не как разрозненный набор рекреационных зон, а в качестве формирующейся экосистемы с едиными функциональными связями. Исследование базируется на принципах концепции устойчивого туризма — подразумевает баланс между экономической эффективностью, экологической безопасностью и социальной ответственностью.

Эмпирический массив данных был сформирован посредством мониторинга и контент-анализа открытых информационных ресурсов (в том числе Реестр экологических троп и туристских маршрутов на ООПТ федерального значения), где агрегированы сведения о туристическом потенциале Московской области. В работе применен комплекс общенаучных и специальных методов: сравнительный, структурно-функциональный анализ, моделирование и сценарное прогнозирование, обобщение, синтез.

Результаты и обсуждение

Анализ и классификация экологических троп Московской области

Экологическая тропа (учебно-туристическая тропа) — обустроенные и особо охраняемые прогулочно-познавательные маршруты, создаваемые с целью экологического просвещения населения через установленные по маршруту информационные стенды [1]. Обычно тропы прокладывают по зонам организованного туризма, национальных парков, ландшафтными заказникам.

Впервые экологическая или «природная тропа» появилась в США в штате Вермонт в 1910 г. Она называлась «Длинный след». Ее протяженность составляла 435 км. Позже экотропы появились в национальных парках Канады, Франции, Великобритании, Швеции, Кении, Индии и Японии [2]. В России организованный экологический туризм начал формироваться в конце XIX в. [3].

Московская область обладает уникальным природно-ресурсным потенциалом для организации экотуризма. Оценка доступных источников дает возможность констатировать наличие в регионе обширного спектра соответствующих маршрутов, которые целесообразно классифицировать по целевому назначению, режиму доступа, тематической направленности.

Для наглядности сравнение ключевых рассматриваемых объектов представлено в табл. 1.

Таблица 1. Типология и характеристики экологических троп Московской области

Название маршрута	Локация (городской округ)	Характеристики	Ключевая образовательная / рекреационная ценность	Условия доступа
Приокско-Террасный заповедник	г. о. Серпухов	Высотная тропа (8 м над землей), маршрут в питомнике	Наблюдение за зубрами и бизонами, изучение биосферы	Платный, строго регламентированный
«Босоногая тропа»	г. о. Балашиха	3,6 км; 43 вида покрытия	Сенсорное развитие, тактильное взаимодействие с ландшафтом	Платный, сезонный
Заказник «Журавлиная родина»	Талдомский г. о.	Сеть маршрутов («Бобры», «Болотная тропа»)	Орнитология (наблюдение за журавлями), болотоведение	Только с экскурсией, сезонные ограничения (август-сентябрь)
«Лохин остров»	г. о. Красногорск	Малый и большой круги (вокруг озера Глухая Яма)	Изучение реликтовых сосновых лесов и озера возрастом >10 тыс. лет	Свободный
Пущинская экотропа	г. о. Пущино	Около 3–4 км	Геология, гидрология (водопады), история (усадьба XVIII в.)	
Тропа Бродского (Веретьево)	Талдомский г. о.	1 км	Синтез ландшафтного дизайна и арт-объектов, невмешательство в рельеф	Для гостей усадьбы

Источник: составлено А.Д. Шалагиной на основе: Реестр экологических троп и туристских маршрутов на ООПТ федерального значения // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации : офиц. сайт. URL: https://www.mnr.gov.ru/activity/oopt_fedtourism/touristic-marsh/?ysclid=mrhyjmf1b7672923353 (дата обращения: 28.11.2025); Попович А. Топ-10 экологических троп Подмосковья: «Заповедный лес», Лохин остров и парк Бродского // Риамо. 14.02.2025. URL: <https://riamo.ru/articles/istorii/top-10-ekologicheskikh-trop-podmoskovja-zapovednyj-les-lohin-ostrov-i-park-brodsкого/?ysclid=mrhynfz21i43563493> (дата обращения: 28.11.2025).

Table 1. Typology and Characteristics of Ecological Trails in the Moscow Region

Route Name	Location (Urban District)	Characteristics	Key Educational / Recreational Value	Access Conditions
Prioksko-Terrasny Nature Reserve	Serpukhov Urban District	High-altitude trail (8 m above ground), nursery route	Observation of European bison and American bison; study of the biosphere	Paid, strictly regulated
“Barefoot Trail”	Balashikha Urban District	3.6 km; 43 types of surface materials	Sensory development; tactile interaction with the landscape	Paid, seasonal
“Zhuravlinaya Rodina” Nature Sanctuary	Taldom Urban District	Network of routes («Dom Bobrov» и «Bolotnaya Tropa»)	Ornithology (crane observation); wetland studies	Guided tours only; seasonal restrictions (Aug–Sep)
“Lochin Ostrov”	Krasnogorsk Urban District	Small and large loops around Lake Glukhaya Yama	Relict pine forests; lake >10,000 years old	Free access
Pushchino Ecotrail	Pushchino Urban District	Approx. 3–4 km	Geology; hydrology (waterfalls); 18th-century estate history	Free access
Brodsky Trail (Veretyevo)	Taldom Urban District	1 km	Landscape design integrated with art objects; minimal impact on terrain	For estate guests

Source: compiled by A.D. Shalaginova based on: Register of ecological trails and tourist routes in protected areas of federal significance. *Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation: official site*. Available from: https://www.mnr.gov.ru/activity/oopt_fedtourism/touristic-marsh/?ysclid=mrhyjmflb7672923353 (accessed: 28.11.2025); Popovich A. Top-10 ecological trails of the Moscow region: “Zapovedny Forest”, Lokhin Ostrov, and Brodsky Park. *Riamr*. 14.02.2025. Available from: <https://riamo.ru/articles/istorii/top-10-ekologicheskikh-trop-podmoskovja-zapovednyj-les-lohin-ostrov-i-park-brodskego/?ysclid=mrhynfz21i43563493> (accessed: 28.11.2025).

В табл. 1 типология экологических троп представлена через совокупность критериев, которые отражают их функциональное назначение и особенности эксплуатации. Основным признаком выступает специализация троп, которая может быть образовательной, рекреационной или смешанной и связана с тематической направленностью маршрутов. Тематика включает биологический, ландшафтный, орнитологический и культурно-экологический профили. В анализ также включены характеристики пространственной организации, среди которых протяженность маршрутов, их линейное или кольцевое построение, а также наличие высотных и настильных конструкций. Дополнительно учитывается режим доступа, который может быть свободным, экскурсионным, платным или котируемым. Важным классификационным параметром является степень антропогенной регламентации и допустимая рекреационная нагрузка, от которых зависит образовательная и природоохранная значимость троп. Указанные критерии позволяют сопоставлять маршруты и определять уровень их участия в системе экологического образования региона.

Как видно из данных табл. 1, спектр предложений варьируется от узко-специализированных орнитологических туров в «Журавлиной родине» до арт-проектов в Веретьево. Вместе с тем подобное разнообразие, по-видимому, свидетельствует не столько о системном развитии, сколько о хаотичном характере формирования рынка.

Среди наиболее значимых объектов следует выделить территории с особым природоохранным статусом. Примером служит Приокско-Террасный заповедник (городской округ Серпухов) (рис. 1). Это эталон того, как строго охраняемая территория интегрируется в туристический оборот без ущерба для экосистемы.

Ключевым объектом экологического туризма выступает национальный парк «Лосиный остров», часть которого административно расположена в Московской области, на территории городов Балашиха и Мытищи. Особой популярностью пользуется «Босоногая тропа» (рис. 2) протяженностью 3,6 км, где посетителям предлагается уникальный сенсорный опыт прохождения по 43 видам покрытия, включая мягкий песок, еловые шишки и керамзит. Данный проект является примером экологического просвещения путем внедрения геймификации. Геймификация экотропы — это целенаправленное внедрение игровых элементов (в данном случае — различные настилы и лабиринт) в туристский маршрут с целью повышения вовлеченности и усвоения экологических знаний, направляя поведение посетителей к соблюдению правил безопасности и бережному отношению к природе.

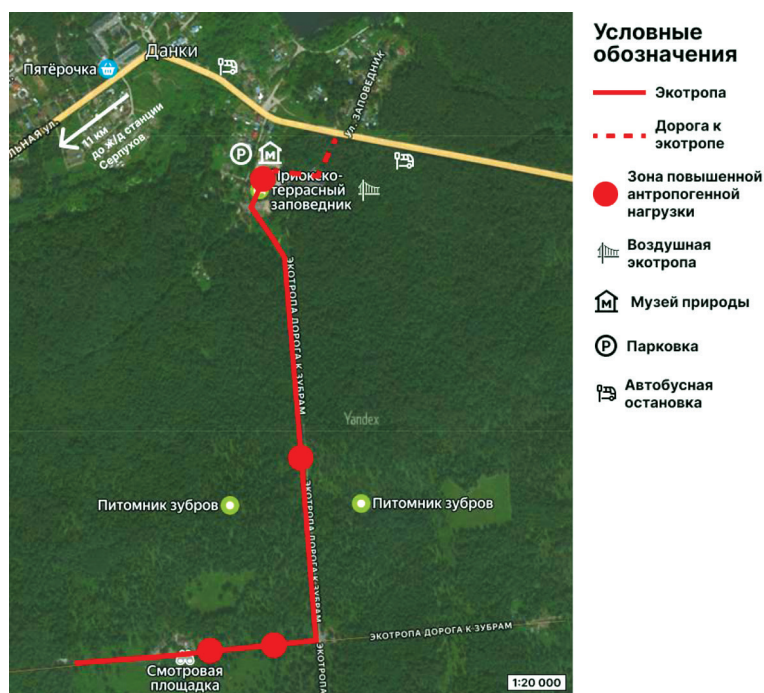


Рис. 1. Карта экотропы «Дорога к зубрам» Приокско-Террасного заповедника

Источник: составлено А.Д. Шалагиной.

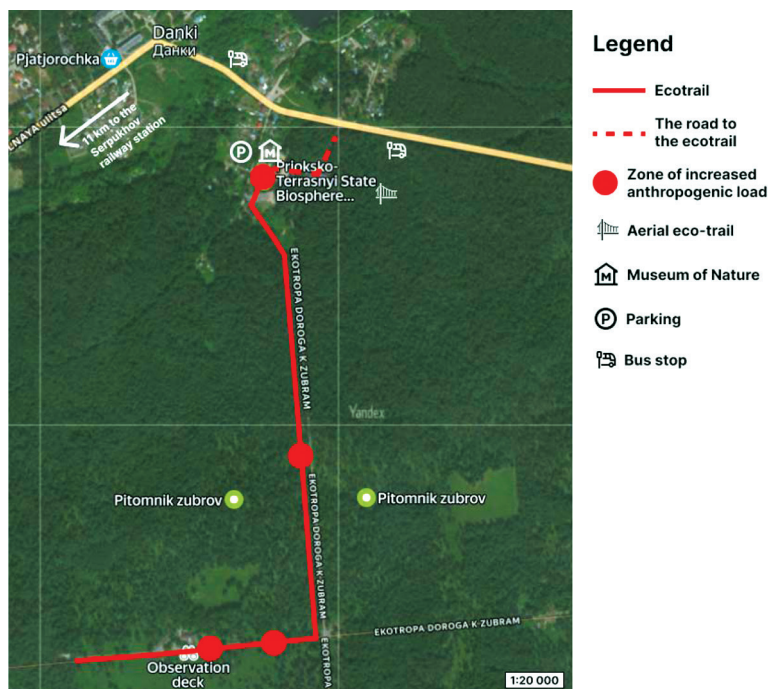


Figure 1. Map of the eco-trail *The Road to the Bison* in the Priksko-Terrasny Reserve
Source: compiled by A.D. Shalaginova.



Рис. 2. Карта экотропы «Босоногая тропа» национального парка «Лосиный остров»
Источник: составлено А.Д. Шалагиновой.

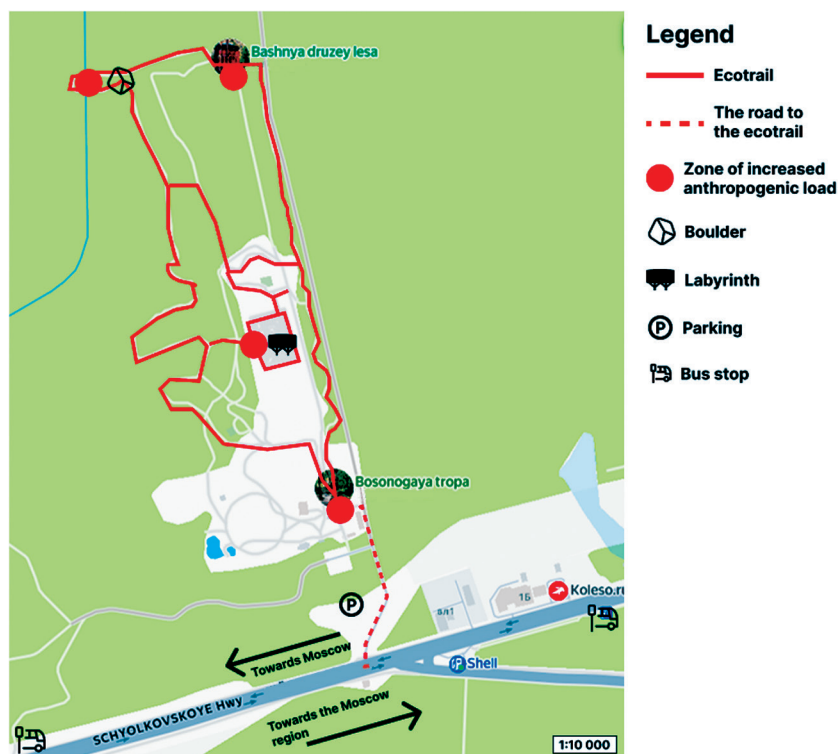


Figure 2. Map of the *Barefoot Trail* in *Losiny Ostrov* National Park

Source: compiled by A.D. Shalaginova.

Весомый интерес представляют ландшафтные памятники природы. Например, «Лохин остров» (рис. 3) в Красногорске привлекает туристов реликтовыми сосновыми лесами и озером Глухая Яма, возраст которого превышает 10 тысяч лет.

В Талдомском городском округе функционирует заказник «Журавлиная родина» (рис. 4). Речь идет о ключевой орнитологической территории, где проводятся экскурсии для наблюдения за миграцией серых журавлей¹.

Весьма значимой является характеристика почв. Физическая деградация — наиболее быстрый и чувствительный индикатор. В условиях суглинистых почв Подмоскovie, характерных для большинства лесопарков, наблюдаются следующие статистические изменения:

– статистически значимое увеличение твердости фиксируется уже на II стадии дигрессии. В «Лосином острове» твердость верхнего горизонта почвы возрастает с 2,9 МПа (фоновые значения) до 3,8 МПа на V стадии дигрессии;

¹ См.: Реестр экологических троп и туристских маршрутов на ООПТ федерального значения // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации : офиц. сайт. URL: https://www.mnr.gov.ru/activity/oopt_fedtourism/touristic-marsh/?ysclid=mrhyjmflb7672923353 (дата обращения: 28.11.2025); Попович А. Топ-10 экологических троп Подмоскovie: «Заповедный лес», Лохин остров и парк Бродского // Риамо. 14.02.2025. URL: <https://riamo.ru/articles/istorii/top-10-ekologicheskikh-trop-podmoskovja-zapovednyj-les-lohin-ostrov-i-park-brodsкого/?ysclid=mrhynfz21i43563493> (дата обращения: 28.11.2025).

– в зонах активного трафика Приокско-Террасного заповедника твердость на глубине 8 см достигает 7–10 кг/см² уже на границе I–II стадий;

– на самих экотропах твердость может превышать фоновые значения в березняках на 250 %, а в дубравах — на 223 % [4].

Анализ ключевых маршрутов помогает выявить значительный разрыв в показателях рекреационной нагрузки и устойчивости экосистем. Строго регламентированная «Дорога к зубрам» (Приокско-Террасный заповедник), которая принимает десятки тысяч туристов ежегодно, сохраняет твердость почвы в безопасном диапазоне 7–10 кг/см² (0,7–1,0 МПа), что соответствует начальным стадиям дигрессии. Напротив, сезонная «Босоногая тропа» (НП «Лосиный остров») испытывает пиковые перегрузки в мае-июне (суммарно 40 % годового потока), где при трафике фиксируется критическое уплотнение грунта до 3,8 МПа (V стадия дигрессии), значительно превышающее фоновые 2,9 МПа и пределы устойчивости лесных сообществ².



Рис. 3. Карта экотропы памятника природы «Лохин остров»

Источник: составлено А.Д. Шалагиновой.

² См: Реестр экологических троп и туристских маршрутов на ООПТ федерального значения // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации : офиц. сайт. URL: https://www.mnr.gov.ru/activity/oopt_fedtourism/touristic-marsh/?ysclid=mrhyjmf1b7672923353 (дата обращения: 28.11.2025); Приказ Минприроды России от 18.11.2021 № 867 О внесении изменений в Методику исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды, утвержденную приказом Минприроды России от 8 июля 2010 г. № 238 (Зарегистрировано в Минюсте России 28.01.2022 № 67040) // Судебные и нормативные акты РФ. URL: <https://sudact.ru/law/prikaz-minprirody-rossii-ot-18112021-n-867/?ysclid=mri3j9cztd303204968> (дата обращения: 28.11.2025); Паспорт ООПТ. URL: https://www.consultant.ru/law/podborki/pasport_oopt/ (дата обращения: 28.11.2025).



Figure 3. Map of the eco-trail at the *Lokhin Ostrov* Natural Monument

Source: compiled by A.D. Shalaginova.

Ниже представлена модельная сезонная структура с учетом умеренного климата Московской области:

- январь-февраль: 2 % (зимние прогулки, небольшие);
- март: 5 % (ранняя весна, таяние);
- апрель: 10 %;
- май: 20 % (пик приходится на майские праздники и позднюю весну);
- июнь: 20 %;
- июль: 15 % (жара, каникулы);
- август: 12 %;
- сентябрь: 8 % (осенние выезды, миграция птиц);
- октябрь-ноябрь: 6 %;
- декабрь: 2 %.

Для Приокско-Террасного заповедника и Лосинового острова имеются годовые числа, десятки тысяч посетителей в год и сотни тысяч в отдельные месяцы соответственно³. Это показывает резкие пики и необходимость введения суточных / часовых квот на популярные точки.

³ Реестр экологических троп и туристских маршрутов на ООПТ федерального значения // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации : офиц. сайт. URL: https://www.mnr.gov.ru/activity/oopt_fedtourism/touristic-marsh/?ysclid=mrhyjmflb7672923353 (дата обращения: 28.11.2025); Попович А. Топ-10 экологических троп Подмоскovie: «Заповедный лес», Лохин остров и парк Бродского // Риамо. 14.02.2025. URL: <https://riamo.ru/articles/istorii/top-10-ekologicheskikh-trop-podmoskovja-zapovednyj-les-lohin-ostrov-i-park-brodskogo/?ysclid=mrhynfz21i43563493> (дата обращения: 28.11.2025).

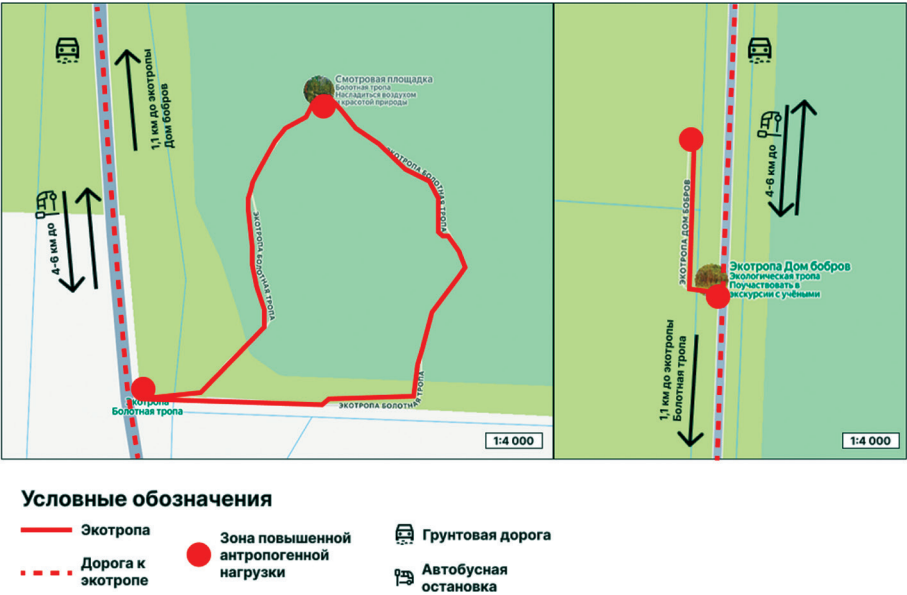


Рис. 4. Карты экотроп «Дом бобров» и «Болотная тропа» природного заказника «Журавлиная родина»

Источник: составлено А.Д. Шалагиновой.

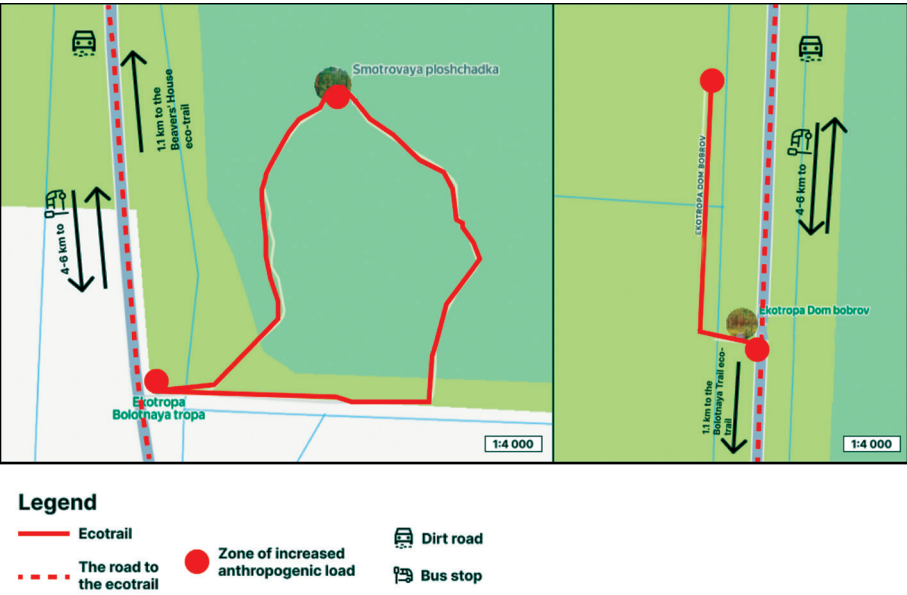


Figure 4. Maps of the Dom Bobrov and Bolotnaya Tropa Eco-Trails in the Zhuravlinaya Rodina Nature Sanctuary

Source: compiled by A.D. Shalaginova.

Проблематика и сдерживающие факторы развития экологических троп Московской области

Невзирая на наличие успешных кейсов, развитие экотроп в Московской области сопряжено с рядом фундаментальных проблем. Во-первых, это инфраструктурный разрыв. Во-вторых, следует упомянуть о сезонности.

Большинство маршрутов, к примеру «Босоногая тропа» или орнитологические маршруты Талдома, функционируют лишь в теплое время года, что снижает экономическую устойчивость операторов данных услуг. Особого внимания заслуживает проблема антропогенной нагрузки — количественная мера антропогенного воздействия на природные экосистемы в виде привнесения, изъятия или перемещения вещества и энергии [5–7].

В целях систематизации барьеров и путей их преодоления составлена табл. 2. Ее содержание основано на данных Н.Г. Розломя с колл. [8], Е.А. Ефимовой с соавт. [9], Е.О. Проскудиной, В.В. Коробко [10], Л.А. Кебаловой, Ф.М. Хацаевой [11].

Таблица 2. Проблемы функционирования экологических троп в Московской области и перспективы их разрешения в парадигме устойчивого развития

Группа проблем	Сущность	Перспективы устранения, инструменты развития
Организационно-правленческие	Отсутствие единого оператора и стандартов качества. Фрагментарность информации	Создание единого цифрового реестра экотроп региона. Внедрение регионального стандарта маркировки, обустройства маршрутов
Эколого-экономические	Высокая сезонность спроса. Риск деградации почв / растительности от перегрузки	Диверсификация услуг (зимние программы, лыжные маршруты). Введение квотирования посещений для уязвимых зон (по модели заповедников)
Образовательно-методические	Преобладание развлекательного контента над образовательным. Нехватка квалифицированных гидов-биологов	Интеграция экотроп в школьные программы (уроки биологии / географии на местности). Разработка аудиогидов, AR-приложений (дополненная реальность)
Инфраструктурные	Низкая транспортная доступность удаленных объектов (Талдом, Пущино) для туристов без авто	Развитие интермодальных перевозок («электричка + шаттл»). Обустройство входных групп и санитарных зон

Источник: составлено А.Д. Шалагиновой на основе [8–11].

Table 2. Challenges of Ecotrail Functioning in the Moscow Region and Prospects for Their Resolution within the Sustainable Development Paradigm

Problem Group	Essence	Prospects for Mitigation / Development Instruments
Organizational and Managerial	Lack of a unified operator and quality standards. Fragmented information	Creation of a unified digital registry of regional ecotrails. Introduction of a regional standard for trail marking and infrastructure
Ecological and Economic	High seasonality of demand. Risk of soil/vegetation degradation from overloading	Service diversification (winter programs, ski routes). Introduction of visitor quotas for vulnerable areas (following the nature reserve model)
Educational and Methodological	Entertainment-focused content prevails over educational content. Shortage of qualified nature guides and biologists	Integration of ecotrails into school programs (biology/geography field lessons). Development of audio guides and AR applications
Infrastructural	Low transport accessibility of remote sites (Taldom, Pushchino) for tourists without cars	Development of intermodal transport (“commuter train + shuttle”). Improved entrance zones and sanitary facilities

Source: compiled by A.D. Shalaginova based on [8–11].

Исходя из анализа проблем, можно резюмировать, что развитие сети экологических троп в Московской области сдерживается комплексом взаимосвязанных факторов. Без преодоления методического вакуума и создания единых стандартов обустройства экотропы рискуют остаться лишь локальными аттракциями, не выполняющими своей основной функции — формирования экологического сознания.

**Рекомендации по интеграции экологических троп
в образовательную среду**

Для преодоления обозначенных проблем и реализации потенциала экологических троп необходим переход к научно обоснованной стратегии развития. Ключевым звеном должно стать формирование троп на образовательных кластерах, под которыми понимается система взаимосвязанных учебных заведений, научных организаций и объектов инфраструктуры, объединяющих свои ресурсы для продвижения образовательных услуг. В рамках модели природа выступает в качестве полноценного объекта экологического просвещения. В табл. 3 представлены авторские предложения по модернизации региональной системы экопросвещения. При ее составлении использованы положения Т.А. Заглодиной и оценка состояния экологических маршрутов национальных парков, выполненная В.В. Куликовой и Е.В. Горошниковой [12; 13].

Таблица 3. Стратегические рекомендации по развитию экотроп Московской области в парадигме образования и устойчивого туризма

Направление	Содержание мероприятий	Обоснование новизны и практической значимости
Цифровизация, геймификация (EdTech)	Внедрение AR-технологий (дополненная реальность) — наведение смартфона на растение / след животного выдает справку. Создание единого мобильного приложения «Экотропы Подмосковья»	Переход от пассивного чтения стендов к интерактивному взаимодействию. Решение проблемы сезонности (виртуальные зимние туры). Привлечение «цифрового поколения» (Z и Alpha)
Внедрение концепции Citizen Science («Гражданская наука»)	Организация туров, где туристы проводят замеры (качество воды, учет птиц) и загружают данные в общую научную базу	Турист становится исследователем. В итоге повышается ценность поездки. Ученым дается массив данных, который невозможно собрать силами одних лишь штатных сотрудников
Кластерный подход и межведомственное взаимодействие	Создание тематических образовательных маршрутов — «Литературно-экологический» (Веретьево), «Биологический» (Приокско-Террасный). Коллаборация школ и дирекций ООПТ	Формирование комплексного продукта. Школы получают базу для практики, ООПТ — организованные группы, финансовую поддержку. Реализация принципов непрерывного образования
Инфраструктурная инклюзивность	Оборудование троп для маломобильных групп (пандусы, тактильные стенды для слабовидящих) по примеру КСК «Дивный»	Социализация инвалидов через природу. Расширение целевой аудитории экологического туризма, выполнение социальной миссии бизнеса

Источник: составлено А.Д. Шалагиновой на основе [12; 13].

Table 3. Strategic Recommendations for the Development of Ecotrails in the Moscow Region within the Paradigm of Education and Sustainable Tourism

Direction	Content of Activities	Justification of Novelty and Practical Value
Digitalization and Gamification (EdTech)	Implementation of AR technologies (augmented reality): pointing a smartphone at a plant or animal track provides instant reference information. Development of a unified mobile application “Ecotrails of the Moscow Region”	Shift from passive reading of informational stands to interactive engagement. Addresses seasonality issues (virtual winter tours). Attracts the “digital generation” (Gen Z and Alpha)
Citizen Science	Organization of tours where visitors collect environmental data (water quality, bird counts) and upload them to a shared scientific database	The tourist becomes an explorer. As a result, the value of the trip increases. Scientists are given an array of data that cannot be collected by staff alone
Cluster Approach and Interagency Cooperation	Creation of thematic educational routes: “Literary-Ecological Trail (Veretyevo)”, “Biological Trail (Priksko-Terrasny)”. Collaboration between schools and protected area administrations	Formation of an integrated product. Schools receive field practice opportunities; protected areas gain organized groups and financial support. Promotes continuous environmental education
Infrastructure Inclusivity	Equipping trails for people with limited mobility (ramps, tactile paths for visually impaired visitors) following the model of the ‘Divniy’ recreation center	Social inclusion through nature. Expands the target audience of educational tourism and supports the social mission of businesses

Source: compiled by A.D. Shalaginova based on [12; 13].

Предложенные меры позволят как повысить туристическую привлекательность региона, так и сформировать устойчивый спрос на образовательные услуги в сфере экологии. Рекомендации по развитию экологических троп необходимо соотносить с рисками безопасности посетителей и конфликтами природопользования. К ключевым угрозам относятся травмоопасные участки, среди которых склоны, настилы и корневая поверхность, недостаточная навигация и информирование, ограниченное количество санитарных узлов, а также конфликт совместного использования троп пешеходами, велосипедистами и экскурсионными группами [14–16].

Для снижения указанных рисков применяется матричный подход к их оценке (табл. 4). Он основан на соотношении вероятности события и тяжести возможных последствий.

Низкие риски контролируются регулярным осмотром маршрутов и информационными мерами. Средние риски устраняются с помощью инженерных решений, которые включают установку ограждений, прокладку настилов и организацию раздельной навигации потоков посетителей. Высокие риски требуют введения регламентов временного закрытия троп при неблагоприятных погодных условиях, например при выпавших осадках, обледенении или паводках, а также введения ограничений доступа. Применение матрицы рисков позволяет включить требования безопасности в систему устойчивого управления экологическими тропами. Такой подход снижает аварийность, повышает качество рекреационного опыта и способствует сохранению природных комплексов.

Таблица 4. Матрица рисков и меры минимизации ущерба для экотроп

Риск (вероятность × тяжесть)	Типичные примеры опасностей	Управленческие меры (рекомендации)
Критический (высокая × высокая)	Деградация почв до V стадии, уничтожение краснокнижных видов у тропы	Закрытие при осадках (для грунтовых троп), возведение приподнятых настилов, установка глухих ограждений
Значимый (средняя × высокая)	Формирование вторичной тропинойной сети, гибель подроста деревьев	Разделение потоков (одностороннее движение), создание смотровых платформ, ограничение квот в пик сезона
Умеренный (высокая × низкая)	Засорение территории, локальное вытаптывание травяного покрова	Установка антивандальных урн, информационные аншлаги, щебенение или мульчирование полотна тропы
Низкий (низкая × низкая)	Фактор беспокойства фауны (вне периода гнездования), шум	Режим «тишины», использование природных материалов в отделке, мониторинг состояния среды

Источник: составлено А.Д. Шалагиновой.

Table 4. Risk Matrix and Mitigation Measures for Eco-Trails

Risk Level (Probability × Severity)	Key Hazard Examples	Management Measures (Recommendations)
Critical (High × High)	Soil degradation to Stage V, destruction of red-listed species near the trail	Closure during precipitation (for unpaved trails), installation of elevated boardwalks, deployment of solid fencing/barriers
Significant (Medium × High)	Formation of secondary social trails, loss of tree saplings (undergrowth)	Traffic separation (one-way flow), construction of observation decks, seasonal visitor quotas/capacity limits
Moderate (High × Low)	Littering, localized trampling of herbaceous cover	Installation of vandal-proof bins, educational signage (wayfinding), graveling or mulching of the trail bed
Low (Low × Low)	Wildlife disturbance (outside nesting periods), noise pollution	«Quiet zones» enforcement, use of natural materials for infrastructure, ongoing environmental monitoring

Source: compiled by A.D. Shalaginova.

Заключение

Экологические тропы Московской области представляют собой значимый, но пока недостаточно эффективно используемый ресурс регионального развития. Проведенный анализ показал, что, невзирая на наличие ярких точек роста, таких как Приокско-Террасный заповедник, национальный парк «Лосиный остров» и парк «Веретьево», общая картина сохраняет мозаичный характер с высокой степенью фрагментации.

Будущее экологических троп Московской области лежит не в плоскости экстенсивного увеличения их количества, а в области качественной трансформации их функционала. Экотропа должна эволюционировать из места для досуга в высокотехнологичное образовательное пространство. В нем необходимо интегрировать реальный природный опыт с передовыми методиками обучения. Реализация сформулированных в статье рекомендаций поможет решить двойную задачу: обеспечить экономическую рентабельность природоохранных территорий и воспитать поколение, осознающее ценность природы.

Как представляется, успех данных преобразований будет зависеть от синергии усилий региональных властей, бизнеса, образовательных институтов. Именно жесткое соблюдение принципов устойчивого туризма и научное обоснование допустимой рекреационной нагрузки помогут сохранить «зеленый пояс» столицы для будущих поколений. Перспективы дальнейших изысканий в этой области видятся в разработке конкретных экономических моделей самоокупаемости экологических троп и создании метрик результативности учебных программ, реализуемых на их базе.

Список литературы

- [1] Будаева Д.Г., Сукнев А.Я., Максанова Л.Б.Ж., Шарипов М.Ю. Актуализация понятия «экологическая тропа» в контексте современного развития экологического туризма в России // *Успехи современного естествознания*. 2020. № 12. С. 62–67. <https://doi.org/10.17513/use.37538> EDN: YGGGYS
- [2] Шестопалова Е.Н. Организация дошкольного образовательного процесса по экологическому воспитанию детей на экологической тропе // *Учебный год*. 2022. № 3 (69). С. 40–42. EDN: SVNHUD
- [3] Щепина И.Н. Экологическая тропа в формировании экологического сознания дошкольников // *Дошкольная педагогика*. 2020. № 9 (164). С. 21–25. EDN: FCRRTB
- [4] Кузнецов В.А., Рыжова И.М., Стома Г.В. Изменение лесных экосистем мегаполиса под влиянием рекреационного воздействия // *Почвоведение*. 2019. № 5. С. 633–642. <https://doi.org/10.1134/S0032180X1905006X> EDN: ZBGRDF
- [5] Околелов А.Ю., Микляева М.А., Романов А.С. Экологическая тропа как средство формирования экологической культуры населения // *Наука и образование*. 2024. Т. 7. № 4. Номер статьи 96. EDN: FTPTUG
- [6] Прохоров И.С., Корнеевец К.В., Бычков С.А. Информационно-аналитический центр поддержки заповедного дела // *Вестник Российского университета дружбы народов*. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26. № 3. С. 309–314. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2018-26-3-309-314> EDN: OAXJEM
- [7] Шныг Т.Н. Экологическая тропа как средство экологического воспитания дошкольников // *Проблемы педагогики*. 2021. № 7 (58). С. 15–16. EDN: EJMPWN
- [8] Розломий Н.Г., Ретш Н.В., Белов А.Н., Шурухина Т.Н., Берсенева С.А. Экологическая тропа как форма экологического образования школьников // *Ученые записки университета имени П.Ф. Лесгафта*. 2021. № 2 (192). С. 267–273. <https://doi.org/10.34835/issn.2308-1961.2021.2.p267-273> EDN: PHDCYV
- [9] Ефимова Е.А., Маркова Е.А., Русина Е.А., Рылова А.С. Формирование экологической культуры детей старшего дошкольного возраста посредством создания экологической тропы // *Педагогическое образование*. 2024. Т. 5. № 5. С. 200–205. EDN: YKAEYM
- [10] Проскудина Е.О., Коробко В.В. Учебно-методические особенности организации экологической тропы для учащихся 5–6 классов // *Проектирование. Опыт. Результат*. 2023. № 2. С. 41–43. EDN: LDZBYK
- [11] Кебалова Л.А., Хацаева Ф.М. Научно-методологические подходы к организации экологических троп в особо охраняемых территориях // *Успехи современного естествознания*. 2022. № 8. С. 39–43. <https://doi.org/10.17513/use.37866>. EDN: ZWPWPS
- [12] Заглодина Т.А. Прогулочно-познавательные маршруты как средство экологического образования школьников // *Педагогический журнал Башкортостана*. 2022. № 1 (95). С. 28–40. <https://doi.org/10.21510/181732922022952840> EDN: WDAJMM

- [13] Куликова В.В., Горошникова Е.В. Оценка состояния экологических маршрутов национальных парков // Астраханский вестник экологического образования. 2024. № 4 (82). С. 96–103. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2024-4-96-103> EDN: KYTBNW
- [14] Королева О.В. Экологические тропы как фактор развития устойчивого туризма на природных территориях // Профессорский журнал. Серия: Рекреация и туризм. 2022. № 1 (13). С. 24–34. <https://doi.org/10.18572/2686-858X-2022-13-1-24-34> EDN: MXJFLA
- [15] Чавес Д.О., Николаева О.Н. Расчёт туристской нагрузки на экологические тропы в ООПТ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2022. Т. 4. С. 272–280. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2022-4-272-280> EDN: URYNJJ
- [16] Тихомирова А.В. Экологические туристские тропы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Право. 2025. Т. 25. № 3. С. 101–107. <https://doi.org/10.14529/law250314> EDN: BBWIKW

References

- [1] Budaeva DG, Suknev AY, Maksanova LBZh, Sharipov MYu. Updating the concept of eco-trail in the context of modern development ecological tourism in Russia. *Advances in Current Natural Sciences*. 2020;(12):62–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37538> EDN: YGGGYS
- [2] Shestopalova EN. Organization of preschool educational process for ecological upbringing of children on an ecological trail. *Uchebnyi God*. 2022;(3):40–42. (In Russ.). EDN: SVNHUD
- [3] Shchepina IN. Ecological trail in the formation of ecological consciousness of preschoolers. *Doshkol'naya pedagogika*. 2020;(9):21–25. (In Russ.). EDN: FCRRTB
- [4] Kuznetsov VA, Ryzhova IM, Stoma GV. Changes in forest ecosystems of a megapolis under the influence of recreational impact. *Pochvovedenie*. 2019;(5):633–642. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0032180X1905006X> EDN: ZBGRDF
- [5] Okolelov AY, Miklyaeva MA, Romanov AS. Ecological trail as a means of forming the ecological culture of the population. *Science and Education*. 2024;7(4). (In Russ.). EDN: FTPTUG.
- [6] Prokhorov IS, Korneevets KV, Bychkov SA. Information-analytical center for natural specially protected areas support. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2018;26(3):309–314. (In Russ.). <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2018-26-3-309-314> EDN: OAXJEM
- [7] Shpyg TN. Ecological trail as a means of ecological upbringing of preschoolers. *Problems of Pedagogy*. 2021;(7):15–16. (In Russ.). EDN: EJMPWN
- [8] Rozlomi NG, Repsh NV, Belov AN, Shurukhina TN, Berseneva SA. Ecological path as a form of ecological education for school students. *Scientific Notes of P.F. Lesgaft University*. 2021;(2):267–273. (In Russ.). <https://doi.org/10.34835/issn.2308-1961.2021.2.p267-273> EDN: PHDCYV
- [9] Efimova EA, Markova EA, Rusina EA, Rylova AS. Formation of ecological culture of senior preschool children through the creation of an ecological trail. *Pedagogical Education*. 2024;5(5):200–205. (In Russ.). EDN: YKAEYM
- [10] Proskudina EO, Korobko VV. Educational and methodological features of the organization of the ecological trail for students of grades 5–6. *Proektirovanie. Opyt. Rezul'tat*. 2023;(2):41–43. (In Russ.). EDN: LDZBYK

- [11] Kebalova LA, Khatsaeva FM. Scientific and methodological approaches to organizing ecological trails in specially protected areas. *Advances in Current Natural Sciences*. 2022;(8):39–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37866> EDN: ZPWPPS
- [12] Zaglodina TA. Walking and cognitive routes as a means of environmental education for schoolchildren. *Pedagogicheskiy Zhurnal Bashkortostana*. 2022(1):28–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.21510/181732922022952840> EDN: WDAJMM
- [13] Kulikova VV, Goroshnikova EV. Assessment of the condition of ecological routes in national parks. *Astrahanskij vestnik èkologičeskogo obrazovaniâ. Astrakhan Bulletin of Ecological Education*. 2024;(4):96–103. (In Russ.). <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2024-4-96-103> EDN: KYTBNW
- [14] Koroleva OV. Ecological trails as a factor in the development of sustainable tourism in natural areas. *The Professors' Magazine. Recreation and Tourism Series*. 2022;(1):24–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.18572/2686-858X-2022-13-1-24-34> EDN: MXJFLA
- [15] Chaves DO, Nikolaeva ON. Assessment of the tourism carrying capacity of ecopaths in protected areas. *Interexpo GEO-Siberia*. 2022;4:272–280. (In Russ.). <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2022-4-272-280> EDN: URYNJN
- [16] Tikhomirova AV. Ecological tourist trails. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Law*. 2025;25(3):101–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/law250314> EDN: BBWIKW

Сведения об авторах:

Шалагинова Алиса Денисовна, магистрант, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1. ORCID: 0009-0008-2852-9973; eLIBRARY SPIN-код: 4353-7234. E-mail: alisashalaginova@mail.ru

Валькова Татьяна Михайловна, кандидат географических наук, доцент, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1. E-mail: valkovatm@mail.ru.

Bio notes:

Alisa D. Shalaginova, Master's Student, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russian Federation. ORCID: 0009-0008-2852-9973; eLIBRARY SPIN-code: 4353-7234. E-mail: alisashalaginova@mail.ru

Tatiana M. Valkova, Candidate of Geographical Sciences (PhD in Geography), Associate Professor at Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russian Federation. E-mail: valkovatm@mail.ru.

ГЕОЭКОЛОГИЯ GEOECOLOGY

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-3-467-484

EDN: ESIUFM

УДК 504.054:504.064.45

Научная статья / Research article

Исследование влияния нефтезагрязнений на физико-химические и микробиологические свойства торфяных болотных верховых почв с применением минерала глауконит и штаммов микроорганизмов в лабораторных условиях

А.С. Боровская  , Е.В. Гаевая *Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация* nastja_2009@mail.ru

Аннотация. Нефтепродукты оказывают влияние на химические и микробиологические свойства торфяных болотных верховых почв: увеличивается концентрация сульфат-ионов на 80,99–91,01 %, концентрация солей натрия изменяется со 141 до 3151 мг/кг, снижается видовое разнообразие, появляются плесневые грибы. Объект исследования — торфяные болотные верховые почвы с разной концентрацией нефтяных загрязнений. Методы исследования свойств нефтезагрязненных торфяных болотных верховых почв, сорбционных материалов и биодеструкторов нефти для создания устойчивого фитоценоза включают гравиметрический метод, капиллярный электрофорез, спектрометрию с индуктивно-связанной плазмой, посев почвенной суспензии на селективные среды и др. При внесении минерального сорбента глауконита и штаммов микроорганизмов происходит изменение биологических и физико-химических свойств торфяных болотных верховых почв: концентрация нефтепродуктов снижается на 81–92 %, концентрация солей натрия снижается на 95,9–97,9 %, изменяется pH почвы. После применения комбинированного способа с внесением минерального сорбента глауконита и штаммов микроорганизмов торфяные болотные верховые почвы по физико-химическим показателям становятся ближе к исходному состоянию незагрязненной торфяной болотной верховой почвы и подходят для создания устойчивого фитоценоза.

Ключевые слова: нефтепродукты, микроорганизмы, глауконит, торфяные болотные верховые почвы

© Боровская А.С., Гаевая Е.В., 2026

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Вклад авторов. *Боровская А.С.* — сбор информации, написание текста. *Гаевая Е.В.* — проверка материалов научным руководителем. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. Авторы заявляют об использовании технологий искусственного интеллекта.

Заявление о доступности данных. Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

История статьи: поступила в редакцию 17.10.2025; доработана после рецензирования 30.10.2025; принята к публикации 05.02.2026.

Для цитирования: *Боровская А.С., Гаевая Е.В.* Исследование влияния нефтезагрязнений на физико-химические и микробиологические свойства торфяных болотных верховых почв с применением минерала глауконит и штаммов микроорганизмов в лабораторных условиях // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 3. С. 467–484. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-467-484> EDN: ESIUFM

Study of the effect of oil pollution on the physical, chemical, and microbiological properties of peat-marsh top soils using the mineral glauconite and microbial strains in laboratory conditions

Anastasia S. Borovskaya^{ID}✉, **Elena V. Gaevaya**^{ID}

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation

✉nastja_2009@mail.ru

Abstract. Petroleum products affect the chemical and microbiological properties of peat-marsh top soils: sulfate ions concentration increases by 80.99–91.01%, sodium salt concentration changes from 141 to 3151 mg/kg, species diversity decreases, and moldy fungi appear. The object of research is peat-marsh top soils with different concentrations of oil pollution. Methods for studying the properties of oil-contaminated peat-marsh top soils, sorption materials, and oil biodegraders for creating a sustainable phytocenosis include gravimetric methods, capillary electrophoresis, inductively coupled plasma spectrometry, soil suspension seeding on selective media, etc. When adding mineral sorbent glauconite and microorganisms strains, the biological and physicochemical properties of peat-marsh top soils are altered: the concentration of petroleum products is reduced by 81–92%, the concentration of sodium salts is reduced by 95.9–97.9%, and the pH of the soil changes. After applying a combined method with the addition of mineral sorbent glauconite and microbial strains, peat-marsh top soils are approaching the original state of uncontaminated peat-marsh top soils in terms of their physical and chemical properties, making them suitable for creating a sustainable phytocenosis.

Keywords: oil products, microorganisms, glauconite, peat-marsh top soils

Authors' contribution. *A.S. Borovskaya* — collection of information, writing of the text. *E.V. Gaevaya* — verification of materials by the scientific supervisor. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. The authors declare the use of artificial intelligence technologies.

Data availability. All data obtained during this study are included in the published article.

Article history: received 17.10.2025; revised 30.10.2025; accepted 05.02.2026.

For citation: Borovskaya AS, Gaevaya EV. Study of the effect of oil pollution on the physical, chemical, and microbiological properties of peat-marsh top soils using the mineral glauconite and microbial strains in laboratory conditions. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(3):467–484. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-467-484> EDN: ESIUFM

Введение

Нефтяные загрязнения значительно снижают продуктивность и качество почв, приводя к изъятию земель из сельскохозяйственного или лесохозяйственного оборота. Сырая нефть малотоксична, а вот высокое содержание нефти в торфяных болотных верховых почвах резко ухудшает водно-физические свойства почв; близко расположенные грунтовые воды могут приводить к вторичному загрязнению. Кроме того, высокое содержание органического вещества в нефтезагрязненных торфяных болотных верховых почвах пожароопасно, что требует мер по скорейшей нейтрализации нефтепродуктов в сложной экосистеме [1; 2].

Применение природных материалов и разложение нефтепродуктов в естественной среде способны благоприятно изменить свойства почвы (химические, агрохимические, физические и микробиологические) без изъятия и изменения гидрологического режима и рельефа на нефтезагрязненном участке [2–15].

Цель исследования — изучение влияния нефтезагрязнения на физико-химические и микробиологические свойства торфяных болотных верховых почв при применении штаммов микроорганизмов и природного минерала *глауконит*.

Искусственно проводилось загрязнение до концентрации нефтепродуктов в исследуемых образцах (далее — ИО): 300 мг/кг (ИО-300), 1000 мг/кг (ИО-1000), 3000 мг/кг (ИО-3000), 5000 мг/кг (ИО-5000), 10 000 мг/кг (ИО-10000) и 15 000 мг/кг (ИО-15000). С применением глауконита концентрация нефтепродуктов снизилась до 79,9 %, с применением штаммов микро-

организмов содержание нефтепродуктов уменьшилось на 47,6–75,1 %. В исследуемых образцах торфяных болотных верховых почв отражены изменения физико-химических и микробиологических показателей [3; 4].

Материалы и методы

Экспериментальные исследования свойств нефтезагрязненных торфяных болотных верховых почв, сорбционных материалов и биодеструкторов нефти по созданию устойчивого фитоценоза проводятся с использованием стандартных методов. Методы исследований предполагали заложение и проведение опыта по выявлению влияния разных объемных долей внесения нефти на химические и биологические характеристики торфяных болотных верховых почв. Исследования проводятся в лабораториях кафедры техносферной безопасности на базе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и аттестованных лабораториях на базе ЦЛАТИ. Микробиологические исследования проводились в лаборатории Томского института химии нефти СО РАН.

Результаты

Для выявления закономерностей воздействия различных доз нефтяного загрязнения на физико-химические и микробиологические свойства торфяных болотных верховых почв закладывался лабораторный опыт. Искусственно загрязнялись образцы торфяных болотных верховых почв сырой нефтью. В опыте изучалось шесть уровней загрязнения (от очень низкого до очень высокого).

Физико-химические показатели нефтезагрязненных торфяных болотных верховых почв представлены в табл. 1.

При моделировании нефтяного загрязнения происходит увеличение концентрации хлорид-ионов на 11,89–69,84 %, а также увеличивается концентрация сульфат-ионов на 80,99–91,01 %, что обусловлено их содержанием в нефти. Увеличивается концентрация солей натрия с 141 до 3151 мг/кг. С увеличением степени нефтяного загрязнения снижается зольность на 19,9 %, массовая доля влаги увеличивается на 43,6 %. Загрязненная торфяная болотная верховая почва становится наиболее кислой ($pH = 4,7–4,2$).

Микробиологические показатели нефтезагрязненных торфяных болотных верховых почв представлены на рис. 1.

Загрязненная торфяная болотная верховая почва характеризовалась повышенным содержанием педотрофной микрофлоры — 1,5 млн КОЕ/г за счет высокого содержания гуминовых веществ. Содержание других групп варьировалось в пределах от 0,2 до 0,9 млн КОЕ/г. Амилолитическая и аммонифицирующая микрофлора была представлена бактериями и микромицетами в равных долях. Торфяные болотные верховые почвы с концентрацией нефтепродуктов от 300 до 15 000 мг/кг вызвали рост численности микрофлоры всех исследуемых групп в 1,56–24,82 раза в зависимости от дозы внесения сырой нефти.

Таблица 1. Физико-химические показатели нефтезагрязненных торфяных болотных верховых почв

Показатель	ед. изм.	Нефтезагрязненная торфяная болотная верховая почва					
		Наименование проб					
		ИО-300	ИО-1000	ИО-3000	ИО-5000	ИО-10000	ИО-15000
Нефтепродукты	мг/кг	303,451 ± 121,4	987,569 ± 395,04	3024,022 ± 1209,6	4978,123 ± 1991,2	10026,054 ± 4010,4	15055,092 ± 6022
Натрий	мг/кг	3107,891 ± 7,8	3131,02 ± 7,8	3136,49 ± 7,8	3142,088 ± 7,8	3146,49 ± 7,9	3151 ± 7,9
Магний	мг/кг	1793,5 ± 4,5	1788 ± 4,5	1792,5 ± 4,5	1797 ± 4,5	1794,5 ± 4,5	1792 ± 4,5
Железо	мг/кг	7,205 ± 20,3	7,645 ± 21,2	7,605 ± 21,2	7,565 ± 21,1	7,527 ± 21,1	7,489 ± 20,9
Сульфат-ион	мг/кг	164,2 ± 0,07	298 ± 0,07	300,5 ± 0,08	303 ± 0,08	302 ± 0,08	301 ± 0,08
Хлорид-ион	мг/кг	78,5 ± 1,5	149 ± 2,1	198 ± 2,5	201 ± 2,5	230 ± 2,9	264 ± 3,1
Азот нитратный	мг/кг	2,7 ± 0,01	2,2 ± 0,01	2,45 ± 0,01	2,7 ± 0,01	2,75 ± 0,01	2,8 ± 0,01
Алюминий	мг/кг	13210,5 ± 33	13211 ± 33	13205 ± 33	13199 ± 33	13204 ± 33	13209 ± 33
Фосфор (общий)	мг/кг	32 ± 0,04	26 ± 0,04	22 ± 0,04	18 ± 0,04	17 ± 0,04	15 ± 0,04
Калий	мг/кг	4092 ± 0,04	4087 ± 0,04	4083 ± 0,04	4079 ± 0,04	4091,5 ± 0,04	4104 ± 0,04
Диоксид кремния	%	27,545 ± 0,01	27,35 ± 0,01	27,045 ± 0,01	26,74 ± 0,01	27,24 ± 0,01	27,74 ± 0,01
Азот (общий)	%	1,0 ± 0,01	0,9 ± 0,01	0,9 ± 0,01	0,6 ± 0,01	0,5 ± 0,01	0,4 ± 0,01
Массовая доля влаги	%	59,46 ± 0,1	70,32 ± 0,1	70,33 ± 0,1	70,33 ± 0,1	70,17 ± 0,1	70,00 ± 0,1
Массовая доля золы (зольность)	%	2,99 ± 0,1	2,71 ± 0,1	2,63 ± 0,1	2,21 ± 0,1	2,18 ± 0,1	2,11 ± 0,1
pH водной вытяжки	ед. pH	4,7 ± 0,01	4,5 ± 0,01	4,5 ± 0,01	4,4 ± 0,01	4,3 ± 0,01	4,2 ± 0,01
pH солевой вытяжки	ед. pH	4,4 ± 0,01	3,6 ± 0,01	3,5 ± 0,01	3,4 ± 0,01	3,5 ± 0,01	3,6 ± 0,01

Источник: составлено А.С. Боровской.

Table 1. Physical and chemical properties of oil-contaminated peat-marsh top soils

Indicator	Units	Oil-contaminated peat bog topsoil					
		Name of samples					
		IO-300	IO-1000	IO-3000	IO-5000	IO-10000	IO-15000
Petroleum products	mg/kg	303.451 ± 121.4	987.569 ± 395.04	3024.022 ± 1209.6	303.451 ± 121.4	10026.054 ± 4010.4	15055.092 ± 6022
Sodium	mg/kg	3107.891 ± 7.8	3131.02 ± 7.8	3136.49 ± 7.8	3107.891 ± 7.8	3146.49 ± 7.9	3151 ± 7.9
Magnesium	mg/kg	1793.5 ± 4.5	1788 ± 4.5	1792.5 ± 4.5	1793.5 ± 4.5	1794.5 ± 4.5	1792 ± 4.5
Iron	mg/kg	7.205 ± 20.3	7.645 ± 21.2	7.605 ± 21.2	7.205 ± 20.3	7.527 ± 21.1	301 ± 0.08
Sulfate ion	mg/kg	164.2 ± 0.07	298 ± 0.07	300.5 ± 0.08	164.2 ± 0.07	302 ± 0.08	301 ± 0.08
Chloride ion	mg/kg	78.5 ± 1.5	149 ± 2.1	198 ± 2.5	78.5 ± 1.5	230 ± 2.9	264 ± 3.1
Nitrogen nitrate	mg/kg	2.7 ± 0.01	2.2 ± 0.01	2.45 ± 0.01	2.7 ± 0.01	2.75 ± 0.01	2.8 ± 0.01
Aluminum	mg/kg	13210.5 ± 33	13211 ± 33	13205 ± 33	13210.5 ± 33	13204 ± 33	13209 ± 33
Phosphorus (total)	mg/kg	32 ± 0.04	26 ± 0.04	22 ± 0.04	32 ± 0.04	17 ± 0.04	15 ± 0.04
Potassium	mg/kg	4092 ± 0.04	4087 ± 0.04	4083 ± 0.04	4092 ± 0.04	4091.5 ± 0.04	4104 ± 0.04
Silicon dioxide	%	27.545 ± 0.01	27.35 ± 0.01	27.045 ± 0.01	27.545 ± 0.01	27.24 ± 0.01	27.74 ± 0.01
Nitrogen (total)	%	1.0 ± 0.01	0.9 ± 0.01	0.9 ± 0.01	1.0 ± 0.01	0.5 ± 0.01	0.4 ± 0.01
Mass fraction of moisture	%	59.46 ± 0.1	70.32 ± 0.1	70.33 ± 0.1	59.46 ± 0.1	70.17 ± 0.1	70.00 ± 0.1
Mass fraction of ash (ash content)	%	2.99 ± 0.1	2.71 ± 0.1	2.63 ± 0.1	2.99 ± 0.1	2.18 ± 0.1	2.11 ± 0.1
pH of the water extract	Units, pH	4.7 ± 0.01	4.5 ± 0.01	4.5 ± 0.01	4.7 ± 0.01	4.3 ± 0.01	4.2 ± 0.01
pH of the salt extract	Units, pH	4.4 ± 0.01	3.6 ± 0.01	3.5 ± 0.01	4.4 ± 0.01	3.5 ± 0.01	3.6 ± 0.01

Source: compiled by A.S. Borovskaya.

Кроме того, внесение сырой нефти в торфяные болотные верховые почвы повлияло на видовой состав их микрофлоры: снизилось видовое разнообразие, исчезли вегетативные формы бактерий, возросла доля почвенных грибов, в основном плесневых — *Penicillium*, *Aspergillus* и др., что свидетельствует о неблагоприятных условиях. Глауконит вносился в количестве 10 и 20 % от объема загрязненных торфяных болотных верховых почв. Изменение концентрации нефтепродуктов в торфяной болотной верховой почве при внесении минерала глауконита представлено в табл. 2.

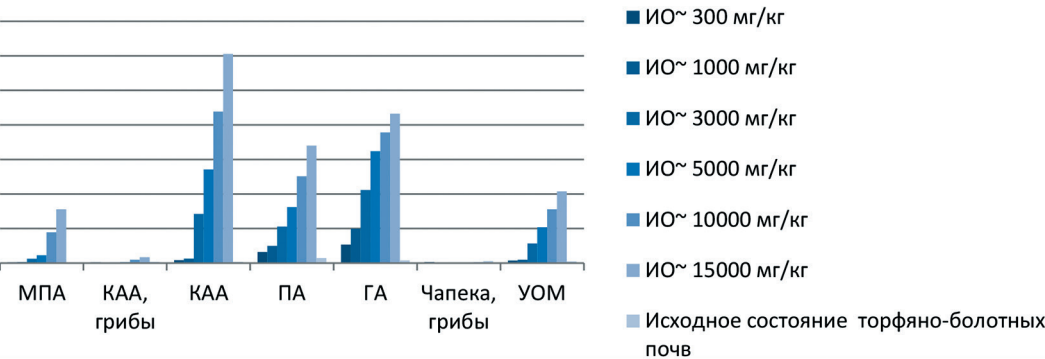


Рис. 1. Микробиологические показатели нефтезагрязненных торфяных болотных верховых почв
Источник: составлено А.С. Боровской.

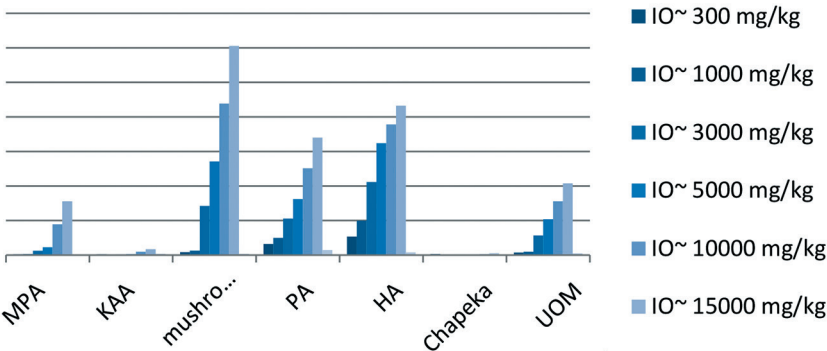


Figure 1. Microbiological indicators of oil-contaminated peat marsh top soils
Source: compiled by A.S. Borovskaya.

Таблица 2. Изменение концентрации нефтепродуктов в торфяной болотной верховой почве при внесении минерала глауконит

Концентрация нефтепродуктов, мг/кг						
До очистки	303±0,8	987 ± 2,5	3001 ±7,5	4978 ± 12,4	10025 ± 25,1	15055 ± 37,6
После очистки глауконитом в объемной доле 10 % от загрязненного грунта	120 ± 0,3	215 ± 0,5	973 ± 2,4	3597 ± 9,0	5683 ± 14,2	6722 ± 16,8
После очистки глауконитом в объемной доле 20 % от загрязнённого грунта	73 ± 0,2	149 ± 0,4	322 ± 0,8	792,5 ± 2,0	2102 ± 5,3	2796 ± 7,0

Источник: составлено А.С. Боровской.

Table 2. Change in the concentration of petroleum products in peat boggy high-moor soil after application of the mineral glauconite

Concentration of petroleum products, mg/kg						
Before cleaning	303±0.8	987 ± 2.5	3001 ±7.5	4978 ± 12.4	10025 ± 25.1	15055 ± 37.6
After cleaning with glauconite at a volume fraction of 10% of the contaminated soil	120 ± 0.3	215 ± 0.5	973 ± 2.4	3597 ± 9.0	5683 ± 14.2	6722 ± 16.8
After cleaning with glauconite in a volume fraction of 20% of the contaminated soil	73 ± 0.2	149 ± 0.4	322 ± 0.8	792,5 ± 2.0	2102 ± 5.3	2796 ± 7.0

Source: compiled by A.S. Borovskaya.

Установлена положительная корреляция $r = 0,87–0,99$ при внесении глауконита 10 и 20 % от объема торфяных болотных верховых почв, загрязненных нефтью, что указывает на сорбционные свойства природного минерала глауконит по отношению к нефтепродуктам в торфяных болотных верховых почвах.

Максимальная эффективность снижения нефтепродуктов до 79,89 % была при внесении глауконита в объеме 20 %.

Физико-химические показатели нефтезагрязненных торфяных болотных верховых почв при внесении глауконита в объемной доле 20 % представлены в табл. 3.

При изменении концентрации нефтепродуктов уменьшается концентрация хлорид ионов на 69 %. Уменьшается концентрация солей натрия на 89,7–96 %, минерал глауконит содержит кальций и калий, вступает в ионно-обменную реакцию, изменяется концентрация солей. Увеличивается количество фосфора и азота соответственно на 47 и 68 %. Уменьшается на 62–67 % массовая доля влаги, восстанавливается водно-воздушный баланс. $pH = 5,9–6,4$ становится ближе к нейтральной.

Микробиологические показатели торфяных болотных верховых почв после применения минерала глауконит представлены на рис. 2.

Численность аммонификаторов микрофлоры увеличивается на 40 %. Амилолитическая микрофлора уменьшается при внесении глауконита при концентрации нефтепродуктов от 2102 мг/кг.

Видовой состав микрофлоры не изменялся, а видовое разнообразие снизилось на ацидофильные бактерии, так как они способны жить в кислой среде, разлагая растительные полисахариды.

Содержание нефтепродуктов в образцах после применения минерала глауконит и штаммов микроорганизмов представлено в табл. 4.

Положительная корреляция составляет $r = 0,98$, что указывает на сорбционные свойства минерала глауконит и действие микроорганизмов по отношению к нефтепродуктам в торфяных болотных верховых почвах. Изменяется концентрация нефтепродуктов на 81–92 %. При концентрации 15 000 мг/кг остаточное содержание нефтепродуктов после применения минерала глауконит и штаммов микроорганизмов составляет 2453 мг/ кг.

Таблица 3. Физико-химические показатели нефтезагрязненных торфяных болотных верховых почв при внесении минерала глауконит в объемной доле 20 %

Показатель	Ед. изм.	Нефтезагрязненная торфяная болотная верховая почва при внесении минерала глауконит					
		Наименование проб					
		ИО-300	ИО-1000	ИО-3000	ИО-5000	ИО-10000	ИО-15000
Натрий	мг/кг	108 ± 7,8	126 ± 7,8	129 ± 7,8	130 ± 7,8	135 ± 7,7	149 ± 7,7
Магний	мг/кг	1799 ± 4,5	1789 ± 4,5	1794 ± 4,5	1799 ± 4,5	1797 ± 4,5	1795 ± 4,5
Железо	мг/кг	7,665 ± 20,3	7,644 ± 21,2	7,605 ± 21,2	7,566 ± 21,1	7,532 ± 21,1	7,498 ± 20,9
Сульфат-ион	мг/кг	304 ± 0,07	288 ± 0,07	293,5 ± 0,08	299 ± 0,08	301 ± 0,08	303 ± 0,08
Хлорид-ион	мг/кг	79 ± 1,5	71 ± 2,1	73,5 ± 2,5	76 ± 2,5	79 ± 2,9	82 ± 3,1
Азот нитратный	мг/кг	3,2 ± 0,01	8,4 ± 0,01	6,05 ± 0,01	3,7 ± 0,01	4,8 ± 0,01	5,9 ± 0,01
Алюминий	мг/кг	13210 ± 33	13245 ± 33	13250,5 ± 33	13256 ± 33	13332 ± 33	13408 ± 33
Фосфор (общий)	мг/кг	32 ± 0,04	30 ± 0,04	31 ± 0,04	29 ± 0,04	28 ± 0,04	28 ± 0,04
Калий	мг/кг	4097 ± 0,04	4098 ± 0,04	4101 ± 0,04	4104 ± 0,04	4130 ± 0,04	4156 ± 0,04
Азот (общий)	%	1,5 ± 0,01	1,3 ± 0,01	1,2 ± 0,01	1,1 ± 0,01	0,9 ± 0,01	0,9 ± 0,01
Диоксид кремния	%	27,74 ± 0,01	28,15 ± 0,01	28,31 ± 0,01	28,47 ± 0,01	29,67 ± 0,01	30,87 ± 0,01
Кальций	%	3086 ± 7,7	3415 ± 7,7	3371,5 ± 7,8	3328 ± 7,8	3238 ± 7,8	3148 ± 7,8
Массовая доля влаги	%	21,18 ± 0,1	21,05 ± 0,1	19,58 ± 0,1	19,45 ± 0,1	22,24 ± 0,1	22,89 ± 0,1
Массовая доля золы (зольность)	%	3,26 ± 0,1	3,25 ± 0,1	3,10 ± 0,1	2,98 ± 0,1	2,99 ± 0,1	2,89 ± 0,1
pH водной вытяжки	ед. pH	4,9 ± 0,01	6,1 ± 0,01	6,15 ± 0,01	6,2 ± 0,01	6,3 ± 0,01	6,4 ± 0,01
pH солевой вытяжки	ед. pH	5,2 ± 0,01	4,2 ± 0,01	4,3 ± 0,01	4,4 ± 0,01	4,1 ± 0,01	3,8 ± 0,01

Источник: составлено А.С. Боровской.

Table 3. Physical and chemical properties of oil-contaminated peat-marsh top soils when the mineral glauconite is added in a volume fraction of 20%

Indicator	Units	Oil-contaminated peat bog topsoil when mineral glauconite is added					
		Name of samples					
		IO-300	IO-1000	IO-3000	IO-5000	IO-10000	IO-15000
Petroleum products	mg/kg	108 ± 7.8	126 ± 7.8	129 ± 7.8	130 ± 7.8	135 ± 7.7	149 ± 7.7
Sodium	mg/kg	1799 ± 4.5	1789 ± 4.5	1794 ± 4.5	1799 ± 4.5	1797 ± 4.5	1795 ± 4.5
Magnesium	mg/kg	7.665 ± 20.3	7.644 ± 21.2	7.605 ± 21.2	7.566 ± 21.1	7.532 ± 21.1	7.498 ± 20.9
Iron	mg/kg	304 ± 0.07	288 ± 0.07	293.5 ± 0.08	299 ± 0.08	301 ± 0.08	303 ± 0.08
Sulfate ion	mg/kg	79 ± 1.5	71 ± 2.1	73.5 ± 2.5	76 ± 2.5	79 ± 2.9	82 ± 3.1
Chloride ion	mg/kg	3.2 ± 0.01	8.4 ± 0.01	6.05 ± 0.01	3.7 ± 0.01	4.8 ± 0.01	5.9 ± 0.01
Nitrogen nitrate	mg/kg	13210 ± 33	13245 ± 33	13250.5 ± 33	13256 ± 33	13332 ± 33	13408 ± 33
Aluminum	mg/kg	32 ± 0.04	30 ± 0.04	31 ± 0.04	29 ± 0.04	28 ± 0.04	28 ± 0.04
Phosphorus (total)	mg/kg	4097 ± 0.04	4098 ± 0.04	4101 ± 0.04	4104 ± 0.04	4130 ± 0.04	4156 ± 0.04
Potassium	mg/kg	1.5 ± 0.01	1.3 ± 0.01	1.2 ± 0.01	1.1 ± 0.01	0.9 ± 0.01	0.9 ± 0.01
Silicon dioxide	%	27.74 ± 0.01	28.15 ± 0.01	28.31 ± 0.01	28.47 ± 0.01	29.67 ± 0.01	30.87 ± 0.01
Nitrogen (total)	%	3086 ± 7.7	3415 ± 7.7	3371.5 ± 7.8	3328 ± 7.8	3238 ± 7.8	3148 ± 7.8
Mass fraction of moisture	%	21.18 ± 0.1	21.05 ± 0.1	19.58 ± 0.1	19.45 ± 0.1	22.24 ± 0.1	22.89 ± 0.1
Mass fraction of ash (ash content)	%	3.26 ± 0.1	3.25 ± 0.1	3.10 ± 0.1	2.98 ± 0.1	2.99 ± 0.1	2.89 ± 0.1
pH of the water extract	Ed. pH	4.9 ± 0.01	6.1 ± 0.01	6.15 ± 0.01	6.2 ± 0.01	6.3 ± 0.01	6.4 ± 0.01
pH of the salt extract	Ed. pH	5.2 ± 0.01	4.2 ± 0.01	4.3 ± 0.01	4.4 ± 0.01	4.1 ± 0.01	3.8 ± 0.01

Source: compiled by A.S. Borovskaya.

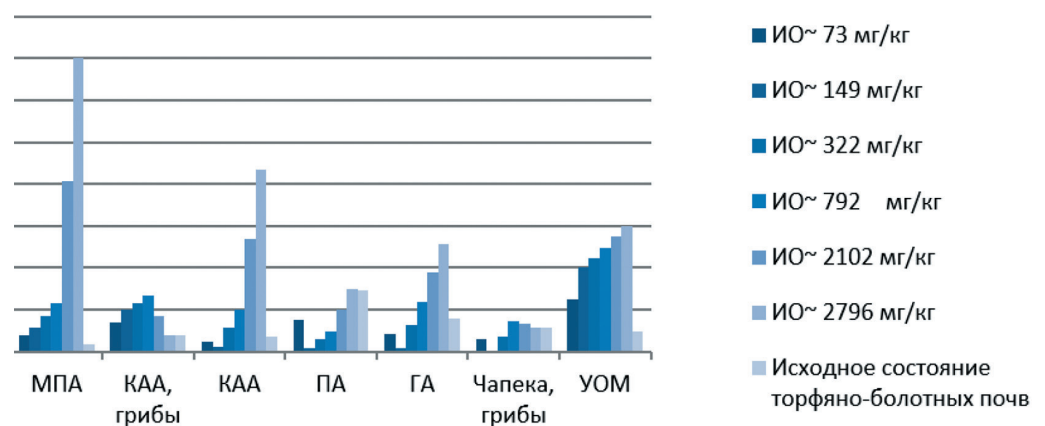


Рис. 2. Микробиологические показатели торфяных болотных верховых почв после применения глауконита
Источник: составлено А.С. Боровской.

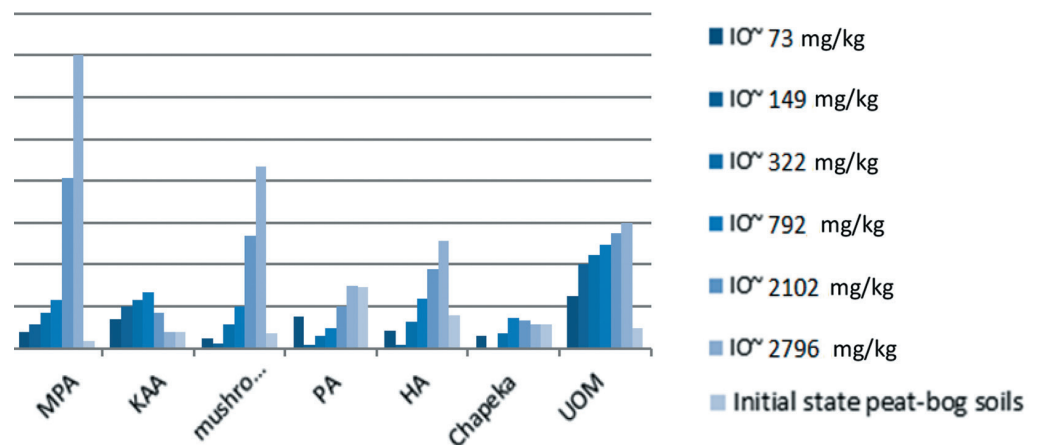


Figure 2. Microbiological indicators of peat bog high-moor soils after the application of the mineral glauconite
Source: compiled by A.S. Borovskaya.

Таблица 4. Содержание нефтепродуктов в образцах после применения глауконита и штаммов микроорганизмов

Концентрация нефтепродуктов, мг/кг						
До очистки	303±0,8	987 ± 2,5	3001 ±7,5	4978 ± 12,4	10025 ± 25,1	15055 ± 37,6
После очистки	31 ± 0,1	124 ± 0,3	324 ± 0,8	1102 ± 2,8	1504 ± 3,8	2753 ± 6,9

Источник: составлено А.С. Боровской.

Table 4. Content of petroleum products in samples after application of the glauconite and microbial strains

Concentration of petroleum products, mg/kg						
Before cleaning	303 ± 0.8	987 ± 2.5	3001 ± 7.5	4978 ± 12.4	10025 ± 25.1	15055 ± 37.6
After cleaning	31 ± 0.1	124 ± 0.3	324 ± 0.8	1102 ± 2.8	1504 ± 3.8	2753 ± 6.9

Source: compiled by A.S. Borovskaya.

Физико-химические показатели нефтезагрязненных торфяных болотных верховых почв после применения минерала глауконит и штаммов микроорганизмов представлены в табл. 5.

Таблица 5. Физико-химические показатели нефтезагрязненных торфяных болотных верховых почв после применения минерала глауконит и шаммов микроорганизмов

Показатель	Ед. изм.	Нефтезагрязненная торфяная болотная верховая почва после применения глауконита объемом 20 % от объема загрязненного грунта и шаммов микроорганизмов					
		Наименование проб					
		ИО-300	ИО-1000	ИО-3000	ИО-5000	ИО-10000	ИО-15000
Натрий	мг/кг	104 ± 7,8	108 ± 7,8	109 ± 7,8	111 ± 7,8	126 ± 7,7	132 ± 7,7
Магний	мг/кг	1799 ± 4,5	1793 ± 4,5	1791 ± 4,5	1789 ± 4,5	1755,5 ± 4,5	1722 ± 4,5
Железо	мг/кг	7,665 ± 20,3	7,641 ± 21,2	7,6 ± 21,2	7,559 ± 21,1	7,4975 ± 21,1	7,436 ± 20,9
Сульфат-ион	мг/кг	301 ± 0,07	291 ± 0,07	285 ± 0,08	279 ± 0,08	289 ± 0,08	299 ± 0,08
Хлорид-ион	мг/кг	70,1 ± 1,5	70,3 ± 2,1	70,5 ± 2,5	71 ± 2,5	76 ± 2,9	81 ± 3,1
Азот нитратный	мг/кг	3,1 ± 0,01	8,8 ± 0,01	8,35 ± 0,01	7,9 ± 0,01	7,6 ± 0,01	7,3 ± 0,01
Алюминий	мг/кг	13218 ± 33	13238 ± 33	13247 ± 33	13256 ± 33	13332 ± 33	13408 ± 33
Фосфор (общий)	мг/кг	33 ± 0,04	31 ± 0,04	30 ± 0,04	29 ± 0,04	29 ± 0,04	28 ± 0,04
Калий	мг/кг	4097 ± 0,04	3999 ± 0,04	4002 ± 0,04	4005 ± 0,04	4003 ± 0,04	4001 ± 0,04
Кальций	%	3086 ± 7,7	3289 ± 7,7	3200 ± 7,8	3111 ± 7,8	3108 ± 7,8	3105 ± 7,8
Диоксид кремния	%	27,74 ± 0,01	28,26 ± 0,01	28,57 ± 0,01	28,88 ± 0,01	30,35 ± 0,01	31,82 ± 0,01
Азот (общий)	%	1,7 ± 0,01	1,6 ± 0,01	1,5 ± 0,01	1,5 ± 0,01	0,5 ± 0,01	0,4 ± 0,01
Массовая доля влаги	%	20,1 ± 0,1	22,2 ± 0,1	23,4 ± 0,1	26,8 ± 0,1	29,2 ± 0,1	31,4 ± 0,1
Массовая доля золы (зольность)	%	3,61 ± 0,1	3,21 ± 0,1	2,96 ± 0,1	2,64 ± 0,1	2,99 ± 0,1	2,89 ± 0,1
pH водной вытяжки	ед. pH	6,8 ± 0,01	6,6 ± 0,01	6,5 ± 0,01	6,5 ± 0,01	6,4 ± 0,01	6,4 ± 0,01
pH солевой вытяжки	ед. pH	5,2 ± 0,01	5,0 ± 0,01	4,9 ± 0,01	4,8 ± 0,01	4,8 ± 0,01	4,2 ± 0,01

Источник: составлено А.С. Боровской.

Table 5. Physical and chemical properties of oil-contaminated peat-marsh top soils after application of the mineral glauconite and microbial strains

Indicator	Units	Oil-contaminated peat-marsh top soils after application of 20% glauconite from the volume of contaminated soil and microbial strains					
		Name of samples					
		IO-300	IO-1000	IO-3000	IO-5000	IO-10000	IO-15000
Petroleum products	mg/kg	104 ± 7.8	108 ± 7.8	109 ± 7.8	111 ± 7.8	126 ± 7.7	132 ± 7.7
Sodium	mg/kg	1799 ± 4.5	1793 ± 4.5	1791 ± 4.5	1789 ± 4.5	1755.5 ± 4.5	1722 ± 4.5
Magnesium	mg/kg	7.665 ± 20.3	7.641 ± 21.2	7.6 ± 21.2	7.559 ± 21.1	7.4975 ± 21.1	7.436 ± 20.9
Iron	mg/kg	301 ± 0.07	291 ± 0.07	285 ± 0.08	279 ± 0.08	289 ± 0.08	299 ± 0.08
Sulfate ion	mg/kg	70.1 ± 1.5	70.3 ± 2.1	70.5 ± 2.5	71 ± 2.5	76 ± 2.9	81 ± 3.1
Chloride ion	mg/kg	3.1 ± 0.01	8.8 ± 0.01	8.35 ± 0.01	7.9 ± 0.01	7.6 ± 0.01	7.3 ± 0.01
Nitrogen nitrate	mg/kg	13218 ± 33	13238 ± 33	13247 ± 33	13256 ± 33	13332 ± 33	13408 ± 33
Aluminum	mg/kg	33 ± 0.04	31 ± 0.04	30 ± 0.04	29 ± 0.04	29 ± 0.04	28 ± 0.04
Phosphorus (total)	mg/kg	4097 ± 0.04	3999 ± 0.04	4002 ± 0.04	4005 ± 0.04	4003 ± 0.04	4001 ± 0.04
Potassium	mg/kg	3086 ± 7.7	3289 ± 7.7	3200 ± 7.8	3111 ± 7.8	3108 ± 7.8	3105 ± 7.8
Silicon dioxide	%	27.74 ± 0.01	28.26 ± 0.01	28.57 ± 0.01	28.88 ± 0.01	30.35 ± 0.01	31.82 ± 0.01
Nitrogen (total)	%	1.7 ± 0.01	1.6 ± 0.01	1.5 ± 0.01	1.5 ± 0.01	0.5 ± 0.01	0.4 ± 0.01
Mass fraction of moisture	%	20.1 ± 0.1	22.2 ± 0.1	23.4 ± 0.1	26.8 ± 0.1	29.2 ± 0.1	31.4 ± 0.1
Mass fraction of ash (ash content)	%	3.61 ± 0.1	3.21 ± 0.1	2.96 ± 0.1	2.64 ± 0.1	2.99 ± 0.1	2.89 ± 0.1
pH of the water extract	Units pH	6.8 ± 0.01	6.6 ± 0.01	6.5 ± 0.01	6.5 ± 0.01	6.4 ± 0.01	6.4 ± 0.01
pH of the salt extract	Units pH	5.2 ± 0.01	5.0 ± 0.01	4.9 ± 0.01	4.8 ± 0.01	4.8 ± 0.01	4.2 ± 0.01

Source: compiled by A.S. Borovskaya.

Уменьшается концентрация хлорид-ионов на 70 %. Снижается концентрация солей натрия на 95,9–97,9 %. Минерал глауконит содержит кальций и калий, вступает в ионно-обменную реакцию, в результате чего изменяется концентрация солей. Концентрация магния, железа, калия, кальция и алюминия остается неизменной. Содержание диоксида кремния увеличивается на 5 % (за счет химического состава глауконита). Количество фосфора и азота увеличивается в 3 раза. Массовая доля влаги уменьшается на 64–66 %. Также восстанавливаются водно-воздушный и щелочной балансы ($\text{pH} = 4,6\text{--}4,8$).

Микробиологические показатели торфяно-болотных верховых почв после применения глауконита и штаммов микроорганизмов представлены на рис. 3.

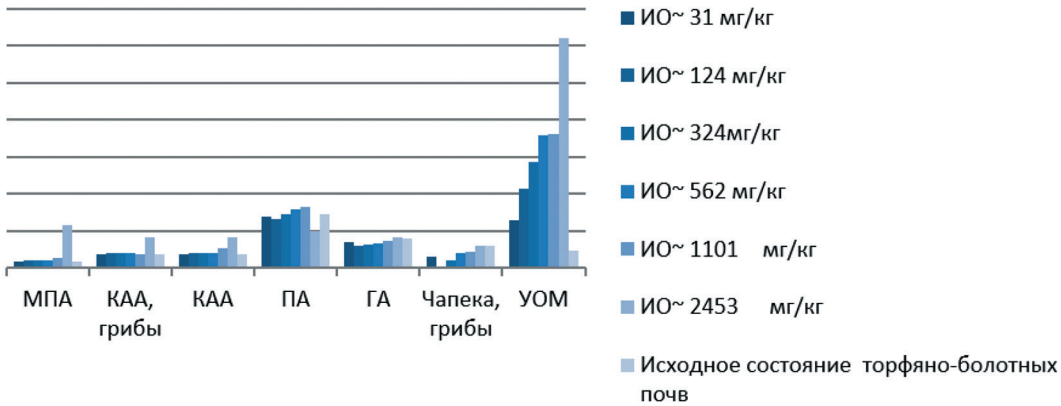


Рис. 3. Микробиологические показатели торфяных болотных верховых почв после применения минерала глауконит и штаммов микроорганизмов

Источник: составлено А.С. Боровской.

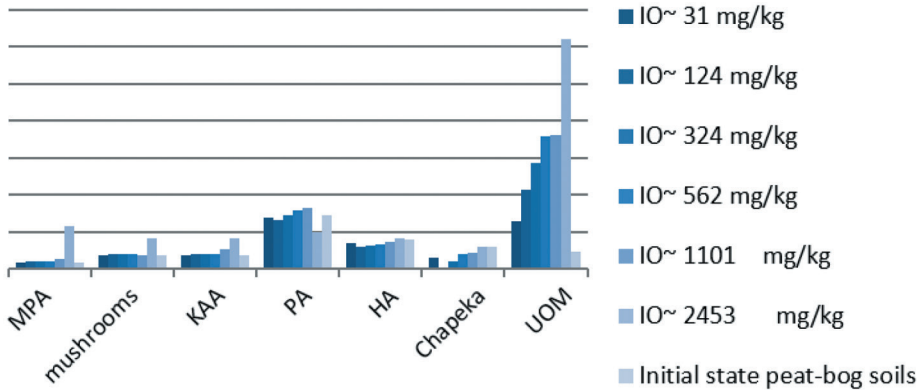


Figure 3. Microbiological indicators of peat-marsh top soils after application of the mineral glauconite and microbial strains

Source: compiled by A.S. Borovskaya.

После применения штаммов микроорганизмов и минерала глауконит остаточное содержание нефтепродуктов в торфяных болотных верховых почвах уменьшилось на 81–92 %, численность амилотической, аммонифицирующей, олиготрофной микрофлоры остается неизменной.

Численность педотрофной микрофлоры, участвующей в разложении органического вещества при концентрации нефтепродуктов до 1101 мг/кг, увеличилась на 17 %, после 2453 мг/кг произошло снижение микрофлоры на 32 %.

Численность углеводородокисляющей микрофлоры увеличилась в 3,5 раза, так как в составе содержатся аборигенные штаммы для разложения нефти. Видовой состав и разнообразие микрофлоры не изменились. Содержание микрофлоры по физиологическим группам близко к исходным показателям незагрязненной торфяной болотной верховой почвы.

Заключение

При моделировании загрязнения почвы нефтепродуктами с увеличением массовой доли нефти происходит увеличение концентрации хлорид-ионов на 12–70 %, сульфат-ионов на 81–91 %, что обусловлено их содержанием в нефти. Значительно увеличивается концентрация солей натрия с 141 мг/кг до 3151 мг/кг. С увеличением концентрации нефтепродуктов снижается зольность на 20 %, массовая доля влаги увеличивается на 44 %. Загрязненная торфяная болотная верховая почва становится наиболее кислой, $\text{pH} = 4,7\text{--}4,2$.

Кроме того, внесение сырой нефти в торфяной болотный верховой тип почвы повлияло на видовой состав его микрофлоры: снизилось видовое разнообразие, исчезли вегетативные формы бактерий, возросла доля почвенных грибов, в основном плесневых — *Penicillium*, *Aspergillus* и др., что свидетельствует о неблагоприятных условиях.

Максимальная эффективность снижения концентрации нефтепродуктов до 80 % была при внесении 20 % глауконита. При изменении концентрации нефтепродуктов уменьшается концентрация хлорид-ионов на 69 %. Уменьшается концентрация солей натрия на 89,7–96 %. Увеличивается количество фосфора и азота соответственно на 47 и 68 %. Уменьшается на 62–67 % массовая доля влаги, восстанавливается водно-воздушный баланс. $\text{pH} = 5,9\text{--}6,4$ становится ближе к нейтральной. Амилолитическая микрофлора уменьшается при внесении минерала глауконит.

При внесении глауконита и штаммов микроорганизмов уменьшается концентрация хлорид-ионов на 70 %. Концентрация солей натрия выравнивается по отношению к исходному незагрязненному торфяному болотному верховому типу почвы, составляет 104–132 мг/кг. Уменьшается концентрация солей натрия на 95,9–97,9 %, диоксид кремния увеличивается на 5 %. Количество фосфора и азота увеличивается в 3 раза. Массовая доля влаги уменьшается на 64–66 %. Также восстанавливается водно-воздушный баланс, щелочной баланс, $\text{pH} = 4,6\text{--}4,8$. Численность педотрофной микрофлоры, участвующей в разложении органического вещества при концентрации нефтепродуктов до 1101 мг/кг, увеличилась на 17 %.

Таким образом, можно сделать вывод, что при внесении глауконита и штаммов микроорганизмов нефтезагрязненная почва по физико-химическим показателям ближе к исходному состоянию незагрязненной торфяной болотной верховой почвы.

Список литературы

- [1] *Ликовский Ю.И., Геннадиев А.Н., Чернянский С.С., Сахаров Г.Н.* Проблема диагностики и нормирования загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами // Почвоведение. 2003. № 9. С. 1132–1140. EDN: OOIUFN
- [2] *Аветов Н.А., Шишконокова Е.А.* Загрязнение нефтью почв таежной зоны Западной Сибири // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2011. Вып. 68. С. 45–55. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2011-68-45-55>
- [3] *Ахмадиев М.В.* Применение аборигенных штаммов углеводородокисляющих микроорганизмов при биоремедиации нефтезагрязненных почв и грунтов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2014. № 2 (14). С. 119–130. EDN: SMEYQP
- [4] *Аббасян Ф., Локингтон Р., Мегарадж М., Найдю Р.* Изменения биоразнообразия в микробной популяции почв, загрязненных сырой нефтью // Современная микробиология. 2016. № 6. С. 23–28.
- [5] *Трофимов С.Я., Аммосова Я.М., Орлов Д.С., Суханова Н.И., Осипова Н.Н.* Влияние нефти на почвенный покров и проблема создания нормативной базы по влиянию нефтезагрязнения на почвы // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2000. № 2. С. 30–34.
- [6] *Вершинин Ю.А., Зубайдуллин А.А.* Оценка экологических рисков при загрязнении болот и их рекультивации // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2009. № 1. С. 53–57. EDN: OXWUFF
- [7] *Шамраев А.В., Шорина Т.С.* Влияние нефти и нефтепродуктов на различные компоненты окружающей среды // Вестник Оренбургского государственного университета. 2009. № 6 (100). С. 642–645. EDN: MNKVRV
- [8] *Бурмистрова Т.И., Алексеева Т.П., Перфильева В.Д., Терещенко Н.Н., Стахина Л.Д.* Биodeградация нефти и нефтепродуктов в почве с использованием мелиорантов на основе активированного торфа // Химия растительного сырья. 2003. № 3. С. 69–72. EDN: HDYTCK
- [9] *Захарова К.А., Моисеев В.В., Шулаев М.В., Емельянов В.М.* Исследование деструкции нефтезагрязнений в подзолистых и торфяных почвах Западно-Сибирского региона // Экология человека. 2007. № 11. С. 17–22. EDN: IBXQJH
- [10] *Горбаев А.В.* Применение бактерий *rhodococcus erythropolis* для получения из нефтешламов искусственного грунта технического в условиях Восточной Сибири // Вестник Евразийской науки. 2021. Т. 13. № 6. Номер статьи 34. EDN: EDUTAV
- [11] *Защита окружающей среды при интенсификации добычи нефти: обзорная информация / Г.С. Кесельман, В.Д. Барановский, А.А. Попов и др.* Москва : ВНИИОЭНГ, 1983. Вып. 10 (34). С. 58. (Серия «Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности»).
- [12] *Габбасова И.М., Сулейманов Р.Р.* Оценка состояния и рекультивация пирогенно-деградированных торфяных почв // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 1. С. 223–228. EDN: NXXCHT
- [13] *Шишконокова Е.А., Трофимов С.Я., Аветов Н.А., Арзамазова А.В., Кинжаев Р.Р., Брыковский Д.В.* Восстановление верховых болот Ханты-Мансийского Приобья

после рекультивации нефте- и солезагрязненных торфяных почв в 2003–2005 гг. // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2020. № 3. С. 28–38. EDN: HKQBOQ

- [14] Леднев А.В., Скворцова И.А. Влияние нефтяного загрязнения на микробное сообщество торфяных почв Среднего Предуралья // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2017. № 1 (56). С. 47–53. EDN: XVRTYP
- [15] Андерсон Р.К. Хазинов Р.Х. Охрана окружающей среды от загрязнения нефтью и промышленными сточными водами. Москва : ВНИИОЭНГ, 1978. 40 с. (Обзорная информация / ВНИИ орг., упр. и экономики нефтегазовой пром-сти. Серия «Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности» : обзор по основным направлениям развития отрасли).

References

- [1] Pikovskii YuI, Gennadiev AN, Chernyanskii SS, Sakharov GN. The problem of diagnostics and standardization of the levels of soil pollution by oil and oil products. *Pochvovedenie*. 2003;(9):1132–1140. (In Russ.) EDN: OOIUFN
- [2] Avetov N, Shishkonakova E. Oiled soils in the taiga zone of Western Siberia. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2011;(68):45–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2011-68-45-55>
- [3] Akhmadiev MV. Application of native strains of hydrocarbon-oxidizing microorganisms in bioremediation of oil-contaminated soils and grounds. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Applied Ecology. Urbanistics*. 2014;(2):119–130. (In Russ.) EDN: SMEYQP
- [4] Abbasyan F, Lockington R, Megaraj M, Naidu R. Changes in biodiversity in microbial populations of crude oil-contaminated soils. *Current Microbiology*. 2016;(6):23–28. (In Russ.)
- [5] Trofimov SY, Ammosova YaM, Orlov DS, Sukhanova NI, Osipova NN. The influence of oil on soil cover and the problem of creating a regulatory framework for the impact of oil pollution on soils. *Lomonosov Soil Science Journal*. 2000;(2):30–34. (In Russ.)
- [6] Vershinin YA, Zubaidullin AA. Assessment of environmental risks in the pollution of wetlands and their remediation. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. 2009;(1):53–57. (In Russ.) EDN: OXWUFF
- [7] Shamraev AV, Shorina TS. The influence of oil and oil products on various environmental components. *Vestnik Orenburgskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2009;(6):642–645. (In Russ.) EDN: MNKVRV
- [8] Burmistrova TI, Alekseeva TP, Perfilova VD, Tereshchenko NN, Stakhina LD. Biodegradation of oil and oil products in soil using ameliorants based on activated peat. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya*. 2003;(3):69–72. (In Russ.) EDN: HDYTCK
- [9] Zakharova KA, Moiseev VV, Shulaev MV, Emelyanov VM. Study of oil pollution destruction in podzol and peat soils in West Siberian region. *Human Ecology*. 2007;(11):17–22. (In Russ.) EDN: IBXQJH
- [10] Gorbaev AV. The use of *rhodococcus erythropolis* bacteria for the production of artificial technical soil from oil sludge in the conditions of Eastern Siberia. *The Eurasian Scientific Journal*. 2021;13(6):34. (In Russ.) EDN: EDUTAV
- [11] Keselman GS, Baranovsky VD, Popov AA, et al. *Environmental protection during oil production intensification: review information. Series: Corrosion and Protection in the Oil and Gas Industry*. Moscow: VNIIOENG; 1983. Iss. 1. p. 58. (In Russ.)

- [12] Gabbasova IM, Suleymanov RR. State estimation and recultivation of pirogenic degraded peat soils. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011;13(1):223–228. (In Russ.) EDN: NXKCHT
- [13] Shishkonakova EA, Trofimov SYa, Avetov NA, Arzamazova AV, Kinzhaev RR, Brikovskiy DV. Restoration of raised bogs in the Khanty-Mansiysk Ob region after reclamation of oil- and salt-polluted peat soils in 2003–2005. *Lomonosov Soil Science Journal*. 2020;(3):28–38. (In Russ.) EDN: HKQBOQ
- [14] Lednev AV, Skvortsova IA. Effects of oil pollution on microbial communities peat soil middle Preduralie. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2017;(1):47–53. (In Russ.) EDN: XVRTYP
- [15] Anderson RK, Khazinov RH. *Environmental protection from pollution by oil and industrial wastewater: review information. Series: Corrosion and Protection in the Oil and Gas Industry*. Moscow: VNIIOENG; 1978. 40 p. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Боровская Анастасия Сергеевна, аспирант, Тюменский индустриальный университет, Российская Федерация, 625000, Тюмень, Володарского, д. 38. ORCID: 0009-0008-5850-1373; eLIBRARY SPIN-код: 4688-7450. E-mail: nastja_2009@mail.ru

Гаевая Елена Викторовна, кандидат биологических наук, доцент, Тюменский индустриальный университет, Российская Федерация, 625000, Тюмень, Володарского, д. 38. ORCID: 0000-0002-0631-9149; eLIBRARY SPIN-код: 4688-7450. E-mail: gaevajaev@tyuiu.ru

Bio notes:

Anastasia S. Borovskaya, Postgraduate, Tyumen Industrial University, 38 Volodarsky St, Tyumen, 625000, Russian Federation. ORCID: 0009-0008-5850-1373; eLIBRARY SPIN-code: 4688-7450. E-mail: nastja_2009@mail.ru

Elena V. Gaevaya, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Tyumen Industrial University, 38 Volodarsky St, Tyumen, 625000, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-0631-9149; eLIBRARY SPIN-code: 4688-7450. E-mail: gaevajaev@tyuiu.ru

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ENVIRONMENTAL MONITORING

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-3-485-499

EDN: ESREXM

УДК 556.123:556.131.114

Научная статья / Research article

Скрининг химического состава атмосферных осадков и почвенных вод на водосборе оз. Гусиное Валдайской возвышенности

Д.Ю. Баранов , Т.И. Моисеенко *Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, Москва, Российская
Федерация*✉ mitya.baranov.90@bk.ru

Аннотация. Представлены результаты гидрохимических наблюдений за составом атмосферных осадков и почвенных вод Валдайской возвышенности. Исследовано влияние крон деревьев и водно-температурного режима на формирование состава атмосферных осадков и типа элементарных ландшафтов на состав почвенных вод. Установлено, что при взаимодействии с кронами еловых деревьев гидрокарбонатно-кальциевый состав свободных осадков изменяется на гидрокарбонатно-калиевый. Основное поступление Ca, Mg, Na, K в подкروновые воды происходит за счет смыва пыли с крон деревьев. Выявлено, что pH почвенных вод растет с увеличением глубины формирования почвенных вод и не зависит от типа элементарного ландшафта. В почвенных водах транслювиального типа элементарного ландшафта снижается концентрация макрокатионов. С ростом глубины почвенных вод активизируется выщелачивание K, Na, Zn, Si, SO₄, что связано с изменением гранулометрического состава почвенных горизонтов.

Ключевые слова: элементарные ландшафты, свободные осадки, подкروновые воды, водно-температурный режим

Вклад авторов. Баранов Д.Ю. — проведение исследования, разработка методологии исследования, подготовка и написание черновика рукописи, работа с программным обеспечением. Моисеенко Т.И. — концептуализация, курирование данных, научное руководство исследованием, рецензирование и редактирование рукописи. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Финансирование. Работа выполнена в рамках Госзадания Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН.

© Баранов Д.Ю., Моисеенко Т.И., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных. Данные, использованные в этом исследовании, могут быть предоставлены автором по обоснованному запросу в связи с необходимостью соблюдения конфиденциальности участников.

История статьи: поступила в редакцию 25.11.2025; доработана после рецензирования 15.01.2026; принята к публикации 02.02.2026.

Для цитирования: Баранов Д.Ю., Моисеенко Т.И. Скрининг химического состава атмосферных осадков и почвенных вод на водосборе оз. Гусиное Валдайской возвышенности // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 3. С. 485–499. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-485-499> EDN: ESREXM

Chemical composition screening of atmospheric precipitation and soil water in the Gusinoe Lake catchment area, the Valdai Upland

Dmitrii Yu. Baranov^{}, Tat'yana I. Moiseenko^{}

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Moscow, Russian Federation
✉ mitya.baranov.90@bk.ru

Abstract. This study presents the results of hydrochemical monitoring of the chemical composition of atmospheric precipitation and soil water in the Valdai Upland. The influence of tree crowns and water-temperature conditions on the composition of precipitation as well as the impact of elementary landscape types on the composition of soil has been investigated. It was found that interaction with spruce tree crowns changes the calcium-bicarbonate composition of free precipitation to potassium-bicarbonate. The main input of Ca, Mg, Na, and K into under-crown water occurs due to dust washout from tree crowns. It was revealed that the pH of soil water increases with increasing depth of soil water formation and is independent of the type of elementary landscape. The concentration of macrocations decreases in soil water of the transeuvial type of elementary landscape. With increasing depth of soil water, the leaching of K, Na, Zn, Si, and SO₄ is activated, which is associated with changes in the particle size distribution of soil horizons.

Keywords: elementary landscapes, bulk precipitation, throughfall, water temperature regime

Authors' contribution. *D.Yu. Baranov* — conducting the study, developing the research methodology, preparing and writing a draft of the manuscript, and using the software. *T.I. Moiseenko* — conceptualization, data curation, scientific supervision of the study, reviewing and editing the manuscript. All authors have read and approved the final version of the article.

Funding. The work was carried out within the framework of the State Assignment of the V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability. The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request, due to the need to protect participant confidentiality.

Article history: received 25.11.2025; revised 15.01.2026; accepted 02.02.2026.

For citation: Baranov DYu, Moiseenko TI. Chemical composition screening of atmospheric precipitation and soil water in the Gusinoe Lake catchment area, the Valdai Upland. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(3):485–499. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-485-499> EDN: ESREXM

Введение

Валдайская возвышенность является чувствительным индикатором глобальных изменений окружающей среды, среди которых выделяются изменение климата и загрязнение воздуха [1]. В рамках международной программы по комплексному мониторингу воздействия загрязнения воздуха на экосистемы (Integrated Monitoring/UNECE) проведены исследования атмосферных осадков и почвенных вод. Химический состав атмосферных осадков формируется под влиянием природных и техногенных факторов. К основным природным факторам формирования состава атмосферных осадков относятся растворение газов и компонентов пыли континентального происхождения, а также влияние полога деревьев. Среди техногенных факторов выделяются выбросы в атмосферу загрязняющих веществ из антропогенных источников. Почвенные воды формируются при взаимодействии атмосферных осадков с почвенным субстратом. На формирование химического состава почвенных вод существенное влияние оказывают типы элементарных ландшафтов. Элементарный ландшафт представляет собой определенный тип рельефа, сложенный одной горной породой и покрытый в каждый момент своего существования определенным растительным сообществом, что характеризует одинаковое взаимодействие между горными породами и организмами [2]. Характерным элементом ландшафта Валдайской возвышенности являются грядово-холмистые формы образования рельефа, на которых формируются основные типы элементарного ландшафта по условиям миграции элементов: элювиальный и трансэлювиальный [3]. **Цель исследования** — влияние водно-температурного режима на состав атмосферных осадков и типа элементарных ландшафтов на состав почвенных вод в пределах катены Валдайской возвышенности на водосборе оз. Гусиное.

Объекты и методы

Участок исследования расположен северо-западнее г. Валдай на водосборе оз. Гусиное и оснащен осадкосборниками и лизиметрами для сбора проб атмосферных осадков и почвенных вод. Осадкосборники установлены на открытой территории (свободные осадки) и под кронами еловых деревьев (подкроновые воды), распространенных на исследуемом участке. Лизиметры установлены в почвенный субстрат с ненарушенным строением на глубине 30 см, данная глубина обуславливает поступление почвенных вод в лизиметры только за счет инфильтрации атмосферных осадков. Установка проботоотборников и отбор проб проводились согласно руководству, принятому в программе мониторинга [4; 5].

Описание почвенного разреза:

0–10 см — органический горизонт, сформировавшийся в аэробных условиях с кратким периодом насыщения влагой. Слой представлен лесной подстилкой в виде грубого гумуса мощностью до 5 см (мор) и мягкого гумуса минеральной части почвы мощностью до 5 см (муль);

10–20 см — иллювиальный горизонт, буровато-черно-серой окраски, содержащий аморфное органическое вещество, сложенный опесчаненным суглинком;

20–30 см — переходный горизонт, сложенный светло-бурым и коричневым флювиогляциальным песком средней крупности.

Начало периода отбора проб атмосферных осадков и почвенных вод в каждый год исследования (с 2015 по 2021 г.) определялось полным отсутствием снежного покрова, а окончание периода — первым выпадением осадков в виде снега. Влияние водно-температурного режима определялось по гидротермическому коэффициенту увлажнения (ГТК) Селянинова, были выделены следующие периоды: засушливый ($\text{ГТК} < 1$), достаточного увлажнения ($1 < \text{ГТК} < 2$) и избыточного увлажнения ($\text{ГТК} > 2$).

Измерение основных параметров (рН, Eh, электропроводность) проб атмосферных осадков и почвенных вод проводилось в полевых условиях; элементный состав — методами ICP-MS, ICP-AES (ELAN-DRC-e) в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ РАН); анализ катионно-анионного состава методом ионообменной хроматографии (Dionex ICS-6000 EG, ГЕОХИ РАН) согласно соответствующим методикам¹.

¹ ГОСТ Р 56219-2014 (ИСО 17294-2:2003). Вода. Определение содержания 62 элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Москва : Стандартинформ, 2015. 32 с.; ПНД Ф 14.1:2.4.131-98. Методика выполнения измерения массовых концентраций ионов натрия, калия, магния, кальция, бария и аммония в пробах питьевой, природной и сточной воды методом ионной хроматографии. ФР.131.2001.00335. Москва, 2010. 17 с.; ПНД Ф 14.1:2.4.132-98. Методика выполнения измерений массовой концентрации анионов: нитрита, нитрата, хлорида, фторида, сульфата и фосфата в пробах природной, питьевой и сточной воды методом ионной хроматографии. Москва, 1998 (издание 2008 г.). 17 с.

Обработка данных выполнялась с использованием программы GWB (Geochemist Workbench) и макроса QI Microsoft Excel для статистической обработки.

Результаты исследований

Атмосферные осадки. В зависимости от водно-температурного режима концентрация основных ионов в атмосферных осадках варьирует в достаточно широких пределах. Свободные осадки являются околонеutralными водами гидрокарбонатно-кальциевого состава с высокой долей участия ионов аммония и минерализацией в интервале 2,3–39 мг/л, отмечается резкое снижение средней минерализации от 18,2 мг/л в засушливый период до 7,4 мг/л в период избыточного увлажнения. Подкроновые воды являются подкисленными водами гидрокарбонатно-калиевого состава с высокой долей участия ионов кальция и сульфатов. В большинстве точек наблюдения минерализация подкроновых вод выше, чем свободных осадков и находится в интервале 4,6–61,5 мг/л. Как и в свободных осадках, отмечается резкое снижение средней минерализации от 26,9 мг/л в засушливый период до 9,9 мг/л в период избыточного увлажнения (рис. 1).

Выявлены достоверные ($p < 0,1$) отличия полученных рядов данных свободных осадков и подкроновых вод согласно непараметрическому критерию Вилкоксона, t -критерий = 1,9 (рис. 2). Наряду с минерализацией выявлено, что концентрации Ca, Mg, Na, K в атмосферных осадках и подкроновых водах максимальны в засушливый период и постепенно снижаются в периодах достаточного и избыточного увлажнения. Между концентрациями Mg, K в свободных осадках и подкроновых водах выявлены достоверные ($p < 0,1$) отличия рядов данных, согласно непараметрическому критерию Вилкоксона, t -критерий = 3,0; 4,2 для Mg, K соответственно.

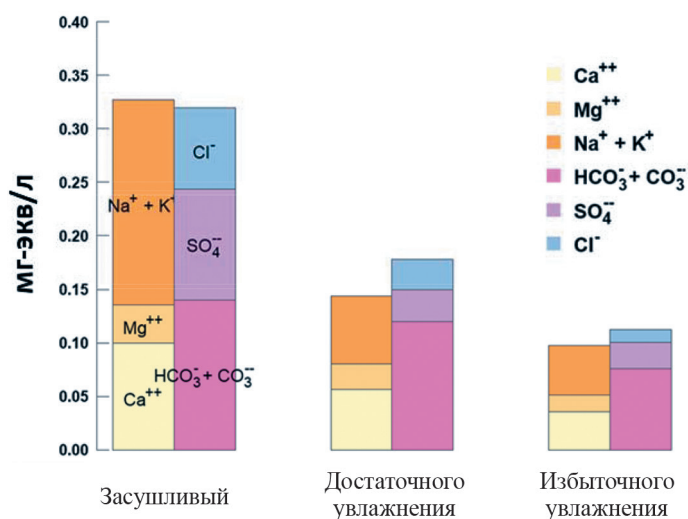


Рис. 1. Состав подкроновых вод при изменении водно-температурного режима

Источник: составлено Д.Ю. Барановым.

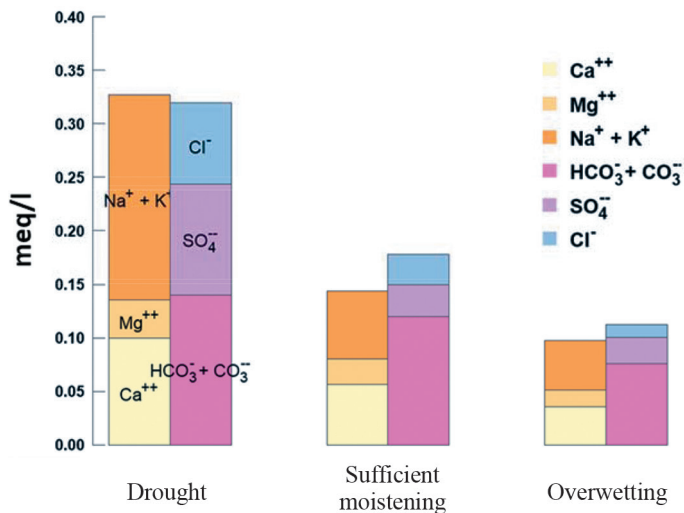


Figure 1. Composition of throughfall waters under changes of water-temperature regime
Source: compiled by D.Yu. Baranov.

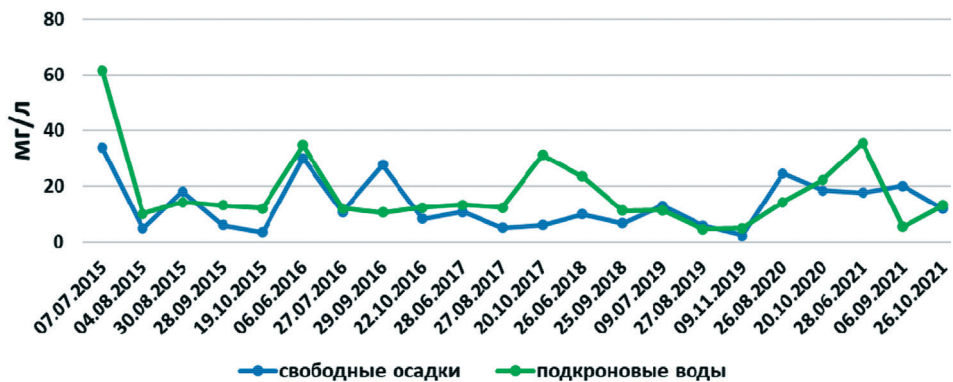


Рис. 2. Минерализация атмосферных осадков
Источник: составлено Д.Ю. Барановым.

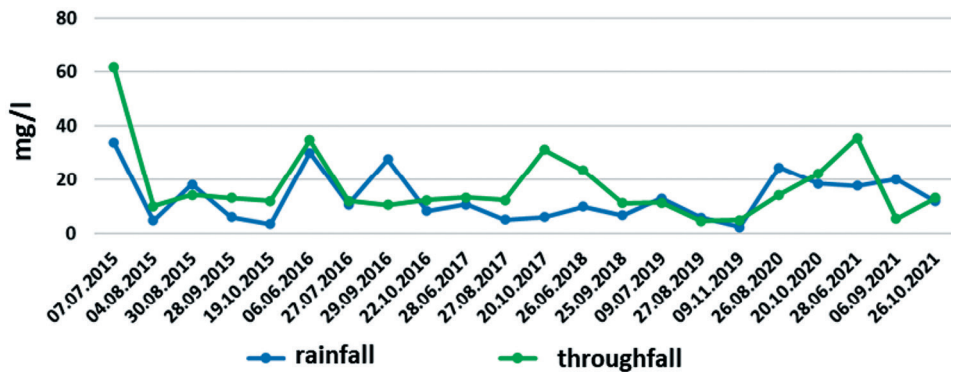


Figure 2. Mineralization of atmospheric precipitation
Source: compiled by D.Yu. Baranov.

При изменении водно-температурного режима большинство микро-элементов имеют максимальные концентрации в засушливый период. Подобная динамика не наблюдается для Zn, Mn в свободных осадках и для Cd в подкроновых водах. Для этих элементов характерна максимальная концентрация в период достаточного увлажнения (табл. 1).

Для Si, Al, Fe достоверно установлено ($p < 0,05$) увеличение их средних концентраций в подкроновых водах по сравнению со свободными осадками, t -критерий = $-4,0$; $-3,9$; $-3,8$ для Si, Al, Fe соответственно. Основным источником, обеспечивающим поступление Si, Al в атмосферные осадки, может быть выветривание почв [6; 7]. Содержание Al в атмосферных осадках Южно-Минусинской котловины, в районе которой действуют заводы по производству Al, варьирует от 0,4 до 1,6 мг/л, а на значительном удалении от предприятий отмечены концентрации до 0,1 мг/л [8]. Концентрации Al в свободных осадках менее 0,1 мг/л характерны для исследуемого участка Валдайского возвышенности. Среднее содержание Al в подкроновых водах в засушливый период превышает 0,1 мг/л, кроме того, периодическое превышение данного значения характерно для периодов достаточного и избыточного увлажнения, что связано с интенсивным вымыванием элемента из крон хвойных деревьев [9].

Таблица 1. Микроэлементный состав атмосферных осадков в зависимости от водно-температурного режима

Элемент	Свободные осадки			Подкроновые воды		
	Засушливый	Достаточного увлажнения	Избыточного увлажнения	Засушливый	Достаточного увлажнения	Избыточного увлажнения
Si ⁴⁺ , мкг/л	$\frac{67}{5,0-131}$	$\frac{41}{4,0-64}$	$\frac{24}{7,0-57}$	$\frac{222}{61-485}$	$\frac{110}{81-175}$	$\frac{91}{39-171}$
Al ³⁺ , мкг/л	$\frac{22}{4,7-51}$	$\frac{13}{3,7-38}$	$\frac{10}{0,8-37}$	$\frac{128}{11-544}$	$\frac{52}{28-106}$	$\frac{42}{21-171}$
Fe ²⁺ , мкг/л	$\frac{15}{0,5-32}$	$\frac{9,7}{3,0-21}$	$\frac{11}{2,5-31}$	$\frac{50}{27-99}$	$\frac{20}{3,3-38}$	$\frac{20}{2,1-36}$
Cu ²⁺ , мкг/л	$\frac{10}{3,0-46}$	$\frac{8,4}{3,3-18}$	$\frac{4,6}{1,0-9,7}$	$\frac{44}{27-99}$	$\frac{37}{22-70}$	$\frac{27}{15-37}$
Ni ²⁺ , мкг/л	$\frac{4,7}{0,4-29}$	$\frac{2,4}{0,1-11,2}$	$\frac{1,5}{0,1-12,5}$	$\frac{1,8}{0,7-5,3}$	$\frac{0,7}{0,4-1,6}$	$\frac{0,8}{0,4-1,1}$
Zn ²⁺ , мкг/л	$\frac{16}{4,6-27}$	$\frac{23}{9,6-40}$	$\frac{20}{0,6-54}$	$\frac{69}{27-129}$	$\frac{65}{43-103}$	$\frac{49}{36-84}$
Pb ²⁺ , мкг/л	$\frac{0,6}{0,1-2,2}$	$\frac{0,6}{0,1-2,5}$	$\frac{0,5}{0,1-1,2}$	$\frac{1,0}{0,4-2,9}$	$\frac{0,6}{0,4-1,1}$	$\frac{0,5}{0,4-0,7}$
Cd ²⁺ , мкг/л	$\frac{0,1}{0,06-0,2}$	$\frac{0,5}{0,01-3,1}$	$\frac{0,1}{0,03-0,5}$	$\frac{0,1}{0,07-0,2}$	$\frac{0,5}{0,04-2,8}$	$\frac{0,09}{0,06-0,2}$

Примечание. В знаменателе — среднее; в знаменателе — минимум — максимум.

Источник: составлено Д.Ю. Барановым.

Table 1. Microelement composition of atmospheric precipitation depending on water-temperature conditions

Element	Bulk precipitation (rainfall)			Throughfall water		
	Drought season	Sufficient moistening	Overwetting	Drought season	Sufficient moistening	Overwetting
Si ⁴⁺ , µg/l	$\frac{67}{5.0-131}$	$\frac{41}{4.0-64}$	$\frac{24}{7.0-57}$	$\frac{222}{61-485}$	$\frac{110}{81-175}$	$\frac{91}{39-171}$
Al ³⁺ , µg/l	$\frac{22}{4.7-51}$	$\frac{13}{3.7-38}$	$\frac{10}{0.8-37}$	$\frac{128}{11-544}$	$\frac{52}{28-106}$	$\frac{42}{21-171}$
Fe ²⁺ , µg/l	$\frac{15}{0.5-32}$	$\frac{9.7}{3.0-21}$	$\frac{11}{2.5-31}$	$\frac{50}{27-99}$	$\frac{20}{3.3-38}$	$\frac{20}{2.1-36}$
Cu ²⁺ , µg/l	$\frac{10}{3.0-46}$	$\frac{8.4}{3.3-18}$	$\frac{4.6}{1.0-9.7}$	$\frac{44}{27-99}$	$\frac{37}{22-70}$	$\frac{27}{15-37}$
Ni ²⁺ , µg/l	$\frac{4.7}{0.4-29}$	$\frac{2.4}{0.1-11.2}$	$\frac{1.5}{0.1-12.5}$	$\frac{1.8}{0.7-5.3}$	$\frac{0.7}{0.4-1.6}$	$\frac{0.8}{0.4-1.1}$
Zn ²⁺ , µg/l	$\frac{16}{4.6-27}$	$\frac{23}{9.6-40}$	$\frac{20}{0.6-54}$	$\frac{69}{27-129}$	$\frac{65}{43-103}$	$\frac{49}{36-84}$
Pb ²⁺ , мкг/л	$\frac{0.6}{0.1-2.2}$	$\frac{0.6}{0.1-2.5}$	$\frac{0.5}{0.1-1.2}$	$\frac{1.0}{0.4-2.9}$	$\frac{0.6}{0.4-1.1}$	$\frac{0.5}{0.4-0.7}$
Cd ²⁺ , µg/l	$\frac{0.1}{0.06-0.2}$	$\frac{0.5}{0.01-3.1}$	$\frac{0.1}{0.03-0.5}$	$\frac{0.1}{0.07-0.2}$	$\frac{0.5}{0.04-2.8}$	$\frac{0.09}{0.06-0.2}$

Note. In the numerator is the average; in the denominator is the minimum — maximum.

Source: compiled by D.Yu. Baranov.

В районе исследования наблюдается увеличение средних концентраций Zn — в 4 раза и незначительное увеличение для Cu. При отсутствии источников загрязнения концентрация Zn в атмосферных осадках варьирует от 10 до 40 мкг/л, содержание Cu — от 2,5 до 13,4 мкг/л [10; 11]. Полученные концентрации Cu, Zn в свободных осадках не выходят за рамки фоновых содержаний, представленных в литературе, за исключением единичных значений. Биогенное поступление элементов характеризуется повышенными концентрациями Cu, Zn в подкروновых водах. Данные о содержании Cu, Zn в свободных осадках и подкроновых водах имеют достоверные различия ($p < 0,05$; t-критерий (Cu) = -4,0; t-критерий (Zn) = -3,9).

По сравнению с результатами исследований, проведенных в период с 1983 по 1987 г., в атмосферных осадках Валдайской возвышенности наблюдается снижение средних концентраций Cd в 2 раза, Pb — в 10 раз. Содержание Ni в свободных осадках почти в 2 раза превышает концентрации, приведенные в литературе, что может указывать на влияние трансграничного переноса аэротехногенного загрязнения [12]. Согласно литературным данным, содержание Ni в атмосферных выпадениях фонового региона варьирует от 1 мкг/л до 3 мкг/л, а в промышленных районах от 10 до 50 мкг/л [13]. Несмотря на то, что средние концентрации Ni в атмосферных осадках Валдайской возвышен-

ности находятся в диапазоне, характерном для фонового района, в подкроновых осадках содержание Ni ниже, чем в свободных осадках. Можно предположить, что трансграничный перенос металла влияет на увеличение содержания Ni в свободных осадках. При этом данные о содержании Ni в свободных осадках и подкроновых водах имеют достоверные различия ($p < 0,05$; t -критерий = 2,0).

Почвенные воды. Содержание основных катионов (Ca, Mg, Na, K) в почвенных водах элювиального типа элементарного ландшафта в почвенном горизонте А увеличивается при изменении pH от слабокислого к нейтральному (табл. 2). Аналогичная тенденция наблюдается для основных анионов (Cl, NO₃, SO₄). Концентрация гидрокарбонатов, хлоридов, нитратов незначительно увеличивается при возрастании pH. Существенное увеличение при повышении значений pH с 3–4 до 5–7 наблюдается для K, Na — почти в 3 раза, для SO₄ в 7 раз. Таким образом, при варьировании pH от 5 до 7 в почвенные воды, выщелачиваются K, Na, SO₄. Сходная тенденция характерна для Zn, Cu, Ni, Cd, при этом увеличение Cu, Ni, Cd при повышении pH незначительно, а концентрация Zn возрастает в 3 раза, что может быть связано с комплексной и анионной формами миграции, характерной Zn. Концентрации Fe, Al, Co, Pb достаточно стабильны по глубине, что связано с разнообразием видов их химической миграции. Миграционная активность Fe слабо зависит от изменения pH среды и глубины формирования почвенных вод [14]. Согласно многочисленным исследованиям [15; 16], миграционная способность большинства микроэлементов увеличивается при снижении pH до кислых и слабокислых значений, в почвенных водах элювиального типа элементарного ландшафта подобная закономерность характерна для Mn. Содержание Si при увеличении pH значительно возрастает, что указывает на миграцию элемента в связанном с другими компонентами состояниями.

Таким образом, формирование химического состава почвенных вод элювиального ландшафта имеет разнонаправленные тренды и связано с изменением кислотно-основных свойств. В почвенных водах горизонта А содержание Mg практически постоянно, а с увеличением глубины его концентрация растет при увеличении pH. Для анионов наблюдается однонаправленный тренд изменения относительно изменения значений pH. При этом концентрация сульфатов возрастает от 2 до 7 раз, что может быть связано с геохимической миграцией анионов и невысоким биогеохимическим потреблением. Почвенные воды трансэлювиального типа элементарного ландшафта формируются при взаимодействии атмосферных осадков с почвенным субстратом при его наклонном залегании (3–6°). Для основных катионов и анионов отмечено повышение их содержаний (от 1,5 до 2 раз) с увеличением величины pH, хотя их средние содержания ниже, чем для элювиального типа элементарного ландшафта (для катионного состава), что может быть связано с повышенной миграцией элементов за счет горизонтального стока. Содержание таких ми-

кроэлементов, как Si, Al, Fe, Cu, Zn, Ni, Co, Pb, Cd, растет при увеличении pH среды. Для Mn выявлено снижение его концентрации при увеличении pH, что связано с окислительно-восстановительными процессами при участии гумусовых веществ. Независимо от изменения глубины почвенных вод в условиях трансэлювиального ландшафта содержание Ca, Mg, Na, гидрокарбонатов и хлоридов снижается.

Таблица 2. Химический состав почвенных вод элювиального и трансэлювиального типов элементарных ландшафтов

Тип элементарного ландшафта	Элювиальный			Трансэлювиальный	
Диапазон pH	3–4	4–5	5–7	< 5,5	> 5,5
Ca ²⁺ , мг/л	$\frac{1,1}{0,5-1,9}$	$\frac{1,5}{1,1-1,9}$	$\frac{2,2}{1,4-3,7}$	$\frac{0,8}{0,3-1,4}$	$\frac{1,7}{0,7-3,7}$
Mg ²⁺ , мг/л	$\frac{0,3}{0,2-0,6}$	$\frac{0,4}{0,3-0,4}$	$\frac{0,4}{0,2-0,6}$	$\frac{0,3}{0,2-0,5}$	$\frac{0,4}{0,2-1,0}$
Na ⁺ , мг/л	$\frac{0,3}{0,2-0,6}$	$\frac{0,5}{0,3-1,0}$	$\frac{1,5}{0,4-3,7}$	$\frac{0,3}{0,1-0,6}$	$\frac{1,2}{0,3-3,9}$
K ⁺ , мг/л	$\frac{1,2}{0,1-2,8}$	$\frac{1,5}{0,3-2,6}$	$\frac{2,2}{0,2-9,3}$	$\frac{0,8}{0,2-1,5}$	$\frac{1,6}{0,2-2,4}$
HCO ₃ ⁻ +, CO ₃ ²⁻ мг/л	<ПО	$\frac{2,7}{0,01-7,1}$	$\frac{5,5}{3,0-9,0}$	$\frac{3,0}{0,1-5,5}$	$\frac{7,3}{4,1-12}$
Cl ⁻ , мг/л	$\frac{1,3}{0,3-2,9}$	$\frac{1,6}{0,4-3,0}$	$\frac{2,5}{0,5-7,9}$	$\frac{0,6}{0,2-1,2}$	$\frac{1,4}{0,2-5,0}$
NO ₃ ⁻ , мг/л	$\frac{0,7}{0,3-2,4}$	$\frac{0,9}{0,4-1,8}$	$\frac{0,9}{0,1-3,5}$	$\frac{0,8}{0,1-2,5}$	$\frac{0,7}{0,1-2,6}$
SO ₄ ²⁻ , мг/л	$\frac{2,4}{1,0-3,2}$	$\frac{2,6}{1,7-4,2}$	$\frac{4,7}{1,2-11,4}$	$\frac{1,3}{0,6-2,4}$	$\frac{2,0}{1,0-3,7}$
Si ⁴⁺ , мкг/л	$\frac{59}{30-92}$	$\frac{119}{57-165}$	$\frac{110}{70-170}$	$\frac{66}{16-132}$	$\frac{90}{50-210}$
Al ³⁺ , мкг/л	$\frac{115}{21-196}$	$\frac{128}{86-168}$	$\frac{120}{86-157}$	$\frac{39}{26-57}$	$\frac{65}{22-142}$
Fe ²⁺ , мкг/л	$\frac{310}{190-414}$	$\frac{374}{310-450}$	$\frac{366}{226-480}$	$\frac{104}{18-182}$	$\frac{150}{60-243}$
Mn ²⁺ , мкг/л	$\frac{197}{100-300}$	$\frac{190}{120-310}$	$\frac{140}{45-265}$	$\frac{76}{26-175}$	$\frac{58}{21-156}$
Cu ²⁺ , мкг/л	$\frac{28}{10-47}$	$\frac{42}{30-66}$	$\frac{62}{21-103}$	$\frac{32}{14-43}$	$\frac{43}{18-106}$
Ni ²⁺ , мкг/л	$\frac{3,2}{2,0-6,4}$	$\frac{3,0}{2,4-3,7}$	$\frac{4,3}{0,9-8,2}$	$\frac{2,3}{1,6-4,2}$	$\frac{4,2}{1,9-9,7}$
Zn ²⁺ , мкг/л	$\frac{43}{10-87}$	$\frac{92}{47-147}$	$\frac{100}{59-195}$	$\frac{88}{19-172}$	$\frac{157}{73-269}$
Pb ²⁺ , мкг/л	$\frac{1,8}{0,1-3,8}$	$\frac{1,7}{1,3-2,3}$	$\frac{2,0}{0,1-4,3}$	$\frac{0,4}{0,1-0,7}$	$\frac{1,2}{0,5-3,9}$

Примечание. В знаменателе — среднее; в знаменателе — минимум — максимум.

Источник: составлено Д.Ю. Барановым.

Table 2. Chemical composition of soil waters of eluvial and transeluvial types of elementary landscapes

Type of elementary landscape	Eluvial			Transeluvial	
Range of pH	3–4	4–5	5–7	< 5.5	> 5.5
Ca ²⁺ , mg/l	$\frac{1.1}{0.5-1.9}$	$\frac{1.5}{1.1-1.9}$	$\frac{2.2}{1.4-3.7}$	$\frac{0.8}{0.3-1.4}$	$\frac{1.7}{0.7-3.7}$
Mg ²⁺ , mg/l	$\frac{0.3}{0.2-0.6}$	$\frac{0.4}{0.3-0.4}$	$\frac{0.4}{0.2-0.6}$	$\frac{0.3}{0.2-0.5}$	$\frac{0.4}{0.2-1.0}$
Na ⁺ , mg/l	$\frac{0.3}{0.2-0.6}$	$\frac{0.5}{0.3-1.0}$	$\frac{1.5}{0.4-3.7}$	$\frac{0.3}{0.1-0.6}$	$\frac{1.2}{0.3-3.9}$
K ⁺ , mg/l	$\frac{1.2}{0.1-2.8}$	$\frac{1.5}{0.3-2.6}$	$\frac{2.2}{0.2-9.3}$	$\frac{0.8}{0.2-1.5}$	$\frac{1.6}{0.2-2.4}$
HCO ₃ ⁻ +, CO ₃ ²⁻ mg/l	<ПО	$\frac{2.7}{0.01-7.1}$	$\frac{5.5}{3.0-9.0}$	$\frac{3.0}{0.1-5.5}$	$\frac{7.3}{4.1-12}$
Cl ⁻ , mg/l	$\frac{1.3}{0.3-2.9}$	$\frac{1.6}{0.4-3.0}$	$\frac{2.5}{0.5-7.9}$	$\frac{0.6}{0.2-1.2}$	$\frac{1.4}{0.2-5.0}$
NO ₃ ⁻ , mg/l	$\frac{0.7}{0.3-2.4}$	$\frac{0.9}{0.4-1.8}$	$\frac{0.9}{0.1-3.5}$	$\frac{0.8}{0.1-2.5}$	$\frac{0.7}{0.1-2.6}$
SO ₄ ²⁻ , mg/l	$\frac{2.4}{1.0-3.2}$	$\frac{2.6}{1.7-4.2}$	$\frac{4.7}{1.2-11.4}$	$\frac{1.3}{0.6-2.4}$	$\frac{2.0}{1.0-3.7}$
Si ⁴⁺ , µg/l	$\frac{59}{30-92}$	$\frac{119}{57-165}$	$\frac{110}{70-170}$	$\frac{66}{16-132}$	$\frac{90}{50-210}$
Al ³⁺ , µg/l	$\frac{115}{21-196}$	$\frac{128}{86-168}$	$\frac{120}{86-157}$	$\frac{39}{26-57}$	$\frac{65}{22-142}$
Fe ²⁺ , µg/l	$\frac{310}{190-414}$	$\frac{374}{310-450}$	$\frac{366}{226-480}$	$\frac{104}{18-182}$	$\frac{150}{60-243}$
Mn ²⁺ , µg/l	$\frac{197}{100-300}$	$\frac{190}{120-310}$	$\frac{140}{45-265}$	$\frac{76}{26-175}$	$\frac{58}{21-156}$
Cu ²⁺ , µg/l	$\frac{28}{10-47}$	$\frac{42}{30-66}$	$\frac{62}{21-103}$	$\frac{32}{14-43}$	$\frac{43}{18-106}$
Ni ²⁺ , µg/l	$\frac{3.2}{2.0-6.4}$	$\frac{3.0}{2.4-3.7}$	$\frac{4.3}{0.9-8.2}$	$\frac{2.3}{1.6-4.2}$	$\frac{4.2}{1.9-9.7}$
Zn ²⁺ , µg/l	$\frac{43}{10-87}$	$\frac{92}{47-147}$	$\frac{100}{59-195}$	$\frac{88}{19-172}$	$\frac{157}{73-269}$
Pb ²⁺ , µg/l	$\frac{1.8}{0.1-3.8}$	$\frac{1.7}{1.3-2.3}$	$\frac{2.0}{0.1-4.3}$	$\frac{0.4}{0.1-0.7}$	$\frac{1.2}{0.5-3.9}$

Note. In the numerator is the average; in the denominator is the minimum-maximum

Source: compiled by D.Yu. Baranov.

При увеличении глубины для почвенных вод элювиального типа элементарного ландшафта вод характерно стабильное повышение pH в диапазоне от 0,6 до 2,9, аналогичная тенденция зафиксирована в работе [17]. Смена почвенных горизонтов приводит к подщелачиванию почвенных вод, а значение pH в среднем увеличивается на 1,7. Варьирование значения электропроводности в среднем понижается при увеличении глубины на 25 мкСм/см; окисли-

тельно-восстановительный потенциал имеет тенденцию к снижению, однако амплитуда изменений варьирует от -200 до 500 мВ; цветность и значение перманганатной окисляемости снижается с глубиной, что соответствует уменьшению содержания гумуса почвы.

Среди основных ионов почвенных вод элювиального типа элементарного ландшафта вод в течение всего периода исследований увеличение глубины способствует значительному обогащению почвенных вод Na (около 2 мг/л), гидрокарбонат-ионами и сульфатами ($3,9$ и $2,4$ мг/л соответственно).

Тенденция к стабильному повышению концентраций микроэлементов в почвенных водах элювиального типа элементарного ландшафта вод с ростом глубины отмечается для Si, Ni, Zn. Рост концентрации Si связан с возрастанием содержания кварца в почвенных слоях по мере увеличения глубины. Рост концентрации Zn, вероятно, определяется его связями с различными органическими кислотами. Распространение за пределы почвенного горизонта А может быть обусловлено преобладающими связями с гуминовыми кислотами [18–20]. Для Ni характерно увеличение его содержания с глубиной, что обусловлено его высокой растворимостью и низким биопотреблением. Для Al, Fe, Mn отмечается устойчивое снижение их содержаний при возрастании глубины, что связано с изменением окислительно-восстановительной обстановки, в которой создаются условия для образования железо-марганцевых конкреций. Основная тенденция изменения содержания Pb, Cu имеет склонность к понижению с ростом глубины, что связано с тем, что Pb миграционно активен в комплексах с ацетатами, при увеличении глубины количество солей органических кислот резко снижается и может влиять на его содержание. Cu является биофильным элементом, и биопотребление в горизонте А более интенсивно, за счет чего концентрация Cu снижается.

При возрастании глубины в почвенных водах трансэлювиального типа элементарного ландшафта наблюдается устойчивый рост pH, незначительное снижение электропроводности и окислительно-восстановительного потенциала.

Поведение макрокатионов в почвенных водах трансэлювиального типа элементарного ландшафта отличается противоположным трендом относительно элювиального типа элементарного ландшафта: Ca, Mg, Na имеют преобладающую тенденцию к снижению концентрации при возрастании глубины, а содержание K увеличивается. Для сульфатов и нитратов характерно снижение их содержания с глубиной. Увеличение гидрокарбонат-ионов связано с увеличением содержания углекислого газа в более пористых почвах легкого гранулометрического состава.

Заключение

При проведении исследований было установлено, что свободные осадки являются околонеутральными водами гидрокарбонатно-кальциевого состава с высокой долей участия ионов аммония. Подкроновые воды — слабокислые

воды гидрокарбонатно-калиевого состава с высокой долей участия ионов кальция и сульфатов. При оценке влияния водно-температурного режима на состав атмосферных осадков выявлено, что основное поступление Ca, Mg, Na, K в подкروновые воды происходит за счет смыва с крон деревьев.

Влияние элементарных ландшафтов на формирование состава почвенных вод главным образом выражено за счет различия в наклоне рельефа и составе почвенных горизонтов. Ввиду того что тип почв и растительности элементарных ландшафтов идентичен, наклонность рельефа является ключевым фактором, влияющим на миграцию макрокатионов. Установлено, что с ростом глубины pH почвенных вод растет, а концентрация органических веществ снижается в пределах элювиального и трансэлювиального типов ландшафта. Изменение окислительно-восстановительных условий подзолистых почв способствует образованию железомарганцевых конкреций. Изменение pH почвенных вод от 3 до 7, происходящее за счет смены более тяжелого минералогического состава почв верхних горизонтов на более легкое нижних горизонтов, активизирует выщелачивание K, Na, Zn, Si, SO₄.

Список литературы / References

- [1] Limić I, Butorac L, Jakovljević T, Lovreškov L, Bratinčević MV, Bakšić D, Jelić G. Atmospheric deposition patterns in bulk open field precipitation and throughfall in Aleppo pine forest and black pine forest on the eastern Adriatic coast. *Environmental Research*. 2024;262:119723. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119723> EDN: AXMTBU
- [2] Perelman AI, Kasimov NS. *Geochemistry of landscape*. Moscow: Moscow State University Publishing House; 1999. 610 p. (In Russ.).
Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. Москва : Изд-во Московского государственного университета, 1999. 610 с.
- [3] Glazovskaya MA. *Geochemical foundations of the typology and methodology of natural landscape studies*. Smolensk: Oikumena Publ.; 2002. 288 p. (In Russ.).
Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. Смоленск : Ойкумена, 2002. 288 с.
- [4] Clarke N, Žlindra D, Ulrich E, Mosello R, Derome J, Derome K, König N, Lövblad G, Draaijers GPJ, Hansen K, Thimonier A, Waldner P. *Part XIV: Sampling and Analysis of Deposition. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*. Eberswalde, Germany: Thünen Institute of Forest Ecosystems; 2016. 32 p.
- [5] Nieminen TM., De Vos B, Cools N, König N, Fischer R, Iost S, Meesenburg H, Nicolas M, O’Dea P, Cecchini G, Ferretti M, De La Cruz A, Derome K, Lindroos AJ, Graf Pannatier E. *Part XI: Soil Solution Collection and Analysis. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*. Eberswalde, Germany: Thünen Institute of Forest Ecosystems, 2016.
- [6] Liu L, Song CY, Li FS. Release of Si, Al and Fe in red soil under simulated acid rain. *Huan Jing Ke Xue*. 2007;28(10):76–82.

- [7] Dauval'ter VA, Sandimirov SS, Denisov DB, Dauvalter MV, Slukovskii ZI. Ecological and geochemical assessment of snow cover in the area affected by the apatite–nepheline production of the Kola Peninsula. *Geohimiya*. 2023;68(12):1312–1328. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0016752523120026> EDN: LYMRSB
Даувальтер В.А., Сандимиров С.С., Денисов Д.Б., Даувальтер М.В., Слуковский З.И. Эколого-геохимическая оценка снежного покрова в районе воздействия апатит-нефелинового производства Кольского полуострова // *Геохимия*. 2023. Т. 68. № 12. С. 1312–1328. <https://doi.org/10.31857/S0016752523120026> EDN: LYMRSB
- [8] Davydova ND. Formation of the chemical composition of water bodies in the South Minusinsk basin under atmospheric pollution. *Advances in Current Natural Sciences*. 2017;(12):134–139. (In Russ.). EDN: YMIMDB
Давыдова Н.Д. Формирование химического состава водных объектов Южно-Минусинской котловины в условиях атмосферного загрязнения // *Успехи современного естествознания*. 2017. № 12. С. 134–139. EDN: YMIMDB
- [9] De Schrijver An, Geudens G, Augusto L, Staelens J, Mertens Ja, Wuyts K, Gielis L, Verheyen K. The effect of forest type on throughfall deposition and seepage flux: a review. *Oecologia*. 2007;153(3):63–74. <https://doi.org/10.1007/s00442-007-0776-1> EDN: EOSLTW
- [10] Garmo ØA, Skjelkvåle BL, de Wit HD, Colombo L, Curtis Ch., Fölster J., Hoffmann A, Hruška J, Høgåsen T, Jeffries DS, Keller WB, Krám P, Majer V, Monteith DT, Pater-son AM, Rogora M, Rzychon D, Steingruber S, Stoddard JL, Vuorenmaa Ju, Worsztyno-wicz A. Trends in surface water chemistry in acidified areas in Europe and North Ameri-ca from 1990 to 2008. *Water, Air, Soil Pollution*. 2014:1–14. EDN: TWQITY
- [11] Kvaeven B, Ulstein MJ, Skjelkvåle BL, Raddum GG, Hovind H. ICP Waters—an inter-national programme for surface water monitoring. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2001;(130):775–780. EDN: ASOOKX
- [12] Nedogarko IV, editor. *Valday lakes (review of observation results for 1946–2018). Monograph*. St. Petersburg: RIAL Publ.; 2021. (In Russ.). EDN: NBAKPY
Валдайские озёра (обзор результатов наблюдений за 1946–2018 гг.) : монография / ред. И.В. Недогарко. Санкт-Петербург : РИАЛ, 2021. 241 с. EDN: NBAKPY
- [13] Barańkiewicz D, Siepak J. Chromium, nickel and cobalt in environmental samples and existing legal norms. *Polish Journal of Environmental Studies*. 1999;8(4):201–208.
- [14] Mandal LN., Mitra RR. Transformation of iron and manganese in rice soils under differ-ent moisture regimes and organic matter applications. *Plant and Soil*. 1982;(69):45–56. <https://doi.org/10.1007/bf02185702> EDN: RKLEMX
- [15] Kabata-Pendias A, Pendias H. *Microelements in soils and plants*. Moscow: Mir Publ.; 1989. 439 p. (In Russ.).
Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. Москва : Мир, 1989. 439 с.
- [16] Hodgson JF, Geering HR, Norvell WA. Micronutrient cation complexes in soil solution. *Soil Science Society of America Proceedings*. 1965;29(1);73–116. <https://doi.org/10.2136/sssaj1965.03615995002900060022x>
- [17] Chytrý M, Danihelka J, Ermakov N, Hájek M, Hájková P, Kočí M. Plant species richness in continental Southern Siberia: effects of pH and climate in the context of the species pool hypothesis. *Global Ecology and Biogeography*. 2007;16(5):668–678. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00320.x> EDN: LKTMFR
- [18] Boguta P, Sokolowska Z. 2016. Interactions of Zn (II) Ions with Humic Acids Isolated from Various Type of Soils. *Effect of pH, Zn Concentrations and Humic Acids Chemical Properties*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153626>

- [19] Warwick P, Hall A, Pashley V, Van der Lee J, Maes A. Zinc and cadmium mobility in podzol soils. *Chemosphere*. 1999;38(10):2357–2368. EDN: ACKAKR
- [20] Waller PA, Pickering WF. The lability of zinc humate species. *Chemical Speciation & Bioavailability*. 1991;3(1):9–21. <https://doi.org/10.1080/09542299.1991.11083136>

Сведения об авторах:

Дмитрий Юрьевич Баранов, младший научный сотрудник лаборатории эволюционной биогеохимии и геоэкологии, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, Российская Федерация, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, д. 19. ORCID: 0000-0002-7180-4677; eLIBRARY SPIN-код: 8437-6926. E-mail: mitya.baranov.90@bk.ru

Татьяна Ивановна Моисеенко, член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, профессор, заведующая отделом биогеохимии и экологии, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, Российская Федерация, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, д. 19. ORCID: 0000-0003-2875-1693. E-mail: moiseenko.ti@gmail.com

Bio notes:

Dmitrii Yu. Baranov, junior researcher at the Laboratory of Evolutionary Biogeochemistry and Geocology, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, 19 Kosygina St, Moscow, 119991, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-7180-4677; eLIBRARY SPIN-code: 8437-6926. E-mail: mitya.baranov.90@bk.ru

Tat'yana I. Moiseenko, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Biogeochemistry and Ecology, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, 19 Kosygina St, Moscow, 119991, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-2875-1693. E-mail: moiseenko.ti@gmail.com

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-3-500-514

EDN: EVYAWA

УДК 504.004:004.9

Научная статья / Research article

Экспериментальная многокритериальная оценка архитектур сверточных нейронных сетей для задачи раннего обнаружения лесных пожаров по данным БПЛА

С.С. Загородний¹, И.К. Белова², С.Н. Никулина¹¹Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация²Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Российская Федерация✉ zagorodniy.serafim@mail.ru

Аннотация. Цель исследования — сравнительный анализ четырех современных архитектур сверточных нейронных сетей: ResNet50, MobileNetV2, MobileNetV3 Large и EfficientNet-B0 — для детекции лесных пожаров на мультимодальных RGBT-изображениях, снятых с бортовых камер БПЛА, с акцентом на практическую применимость в условиях ограниченных ресурсов. Объектом исследования выступают алгоритмы глубокого обучения, обученные на датасете FireMan UAV RGBT, включающем 12 000 аннотированных изображений в RGB и тепловом диапазонах. Методология основана на трансферном обучении с предобученными весами ImageNet, использовании фокальной функции потерь для компенсации дисбаланса классов и 5-фолд кросс-валидации. Для объективной оценки применены непараметрические статистические тесты (Краскела — Уоллиса, Манна — Уитни) и многокритериальная ранжировка по методу TOPSIS с бутстрэп-оценкой, учитывающей четыре ключевых параметра: точность (F1-score), чувствительность, скорость инференса (FPS) и вычислительную сложность (MACs). Эксперименты проведены на платформе NVIDIA Jetson Xavier NX. Результаты показали, что все архитектуры достигают высокой точности (F1-score > 0,92), однако MobileNetV2 демонстрирует оптимальный баланс: F1 = 0,934, скорость 18,2 FPS при минимальной вычислительной нагрузке (1.3 G MACs), что делает ее наиболее подходящей для автономных систем мониторинга. ResNet50 и EfficientNet-B0 обеспечивают сопоставимую точность, но требуют в 2–3 раза больше ресурсов. MobileNetV3 Large показала наилучшую чувствительность, но уступает по скорости. Научная новизна работы заключается в комплексной, статистически обоснованной оценке CNN-архитектур не только по точности, но и по реальным ограничениям вычислительной эффективности, что позволяет перейти от лабораторных экспериментов к практическому внедрению на БПЛА. Полученные данные формируют основу для выбора оптимальной архитектуры в системах экологического мониторинга с ограниченными ресурсами.

Ключевые слова: мультимодальная классификация, трансферное обучение, MobileNetV2, ResNet50, EfficientNet B0, MobileNetV3 Large, фокальная функция потерь

© Загородний С.С., Белова И.К., Никулина С.Н., 2026

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Вклад авторов. *Загородний С.С.* — разработка методологии исследования; реализация компьютерного кода и вспомогательных алгоритмов; проведение экспериментов; написание первоначального текста рукописи. *Белова И.К.* — концептуализация, создание рукописи и ее редактирование; визуализация; руководство исследованием. *Никулина С.Н.* — администрирование проекта. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи использовался ChatGPT. Период использования — июль-август 2025. Этап анализа предметной области, изучение аналогов разрабатываемой системы. Авторы заявляют, что полностью осознают и принимают на себя всю полноту ответственности за содержание данной рукописи. Использование инструментов искусственного интеллекта носило вспомогательный характер и не заменяло экспертного суждения, критического мышления и научной добросовестности авторов.

Заявление о доступности данных. Данные, использованные в этом исследовании, могут быть предоставлены авторами по запросу.

История статьи: поступила в редакцию 14.01.2026; доработана после рецензирования 17.03.2026; принята к публикации 30.03.2026.

Для цитирования: *Загородний С.С., Белова И.К., Никулина С.Н.* Экспериментальная многокритериальная оценка архитектур сверточных нейронных сетей для задачи раннего обнаружения лесных пожаров по данным БПЛА // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 3. С. 500–514. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-500-514> EDN: EVYAWA

Experimental multi-criteria evaluation of convolutional neural network architectures for early forest fire detection using UAV data

Serafim S. Zagorodnii¹, Irina K. Belova², Svetlana N. Nikulina¹

¹*RUDN University, Moscow, Russian Federation*

²*Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russian Federation*

✉ zagorodniy.serafim@mail.ru

Abstract. The objective of this study is to conduct a comparative analysis of four modern convolutional neural network architectures — ResNet50, MobileNetV2, MobileNetV3 Large, and EfficientNet-B0 — for wildfire detection on multimodal RGBT images captured by UAV-mounted cameras, with emphasis on practical applicability under resource-constrained conditions. The object of study consists of deep learning algorithms trained on the FireMan UAV RGBT dataset, comprising 12,000 annotated RGB and thermal images. The methodology is based on transfer learning with ImageNet-pretrained weights, the use of Focal Loss to address class imbalance, and 5-fold cross-validation. Objective evaluation employed non-parametric statistical tests (Kruskal — Wallis, Mann — Whitney) and a multi-criteria ranking using

TOPSIS with bootstrap estimation, considering four key metrics: accuracy (F1-score), sensitivity, inference speed (FPS), and computational complexity (MACs). Experiments were conducted on the NVIDIA Jetson Xavier NX platform. Results showed that all architectures achieve high accuracy (F1-score > 0.92), but MobileNetV2 delivers the optimal balance: F1 = 0.934, 18.2 FPS, and minimal computational load (1.3 G MACs), making it the most suitable for autonomous UAV-based monitoring systems. ResNet50 and EfficientNet-B0 offer comparable accuracy but require 2–3 times more computational resources. MobileNetV3 Large achieved the highest sensitivity but lagged in speed. The scientific novelty lies in a statistically rigorous evaluation of CNN architectures not only by accuracy but also by real-world computational constraints, enabling a transition from laboratory experiments to practical deployment on UAVs. The findings provide a robust basis for selecting optimal architectures in resource-limited environmental monitoring systems.

Keywords: multimodal classification, transfer learning, MobileNetV2, ResNet50, EfficientNet B0, MobileNetV3 Large, focal loss function

Authors' contribution. *S.S. Zagorodnii* — conceptualization, methodology development; implementation of computational code and auxiliary algorithms; conducting experiments; writing the original draft of the manuscript. *I.K. Belova* — conceptualization, co-authoring and editing the manuscript; visualization; supervision of the research. *S.N. Nikulina* — project administration. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. Generative artificial intelligence technologies (ChatGPT) were used in the creation of this article. The usage period is July — August 2025. The stage of domain analysis, the study of analogues of the system under development. The authors declare that they fully understand and accept full responsibility for the content of this manuscript. The use of artificial intelligence tools was of a supporting nature and did not replace the authors' expert judgment, critical thinking, or scientific integrity.

Data availability. The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon request.

Article history: received 14.01.2026; revised 17.03.2026; accepted 30.03.2026.

For citation: Zagorodnii SS, Belova IK, Nikulina SN. Experimental multi-criteria evaluation of convolutional neural network architectures for early forest fire detection using UAV data. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(3):500–514. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-500-514> EDN: EVYAWA

Введение

Лесные пожары относятся к числу наиболее разрушительных природных явлений, наносящих значительный ущерб экосистемам, инфраструктуре и экономике. В последние десятилетия, в условиях изменения климата, наблюдается рост частоты и площади возгораний во многих регионах мира — от Европы и Северной Америки до стран Азиатско-Тихоокеанского региона [1–4]. Эффективность мер по локализации и тушению пожаров напрямую зависит от своевременности обнаружения очагов — задержка даже на несколько минут может привести к необратимым последствиям.

Традиционные методы мониторинга — наземные датчики и спутниковые системы — обладают рядом ограничений: высокой стоимостью, низким пространственным разрешением, ограниченной зоной покрытия и задержкой передачи данных [5; 6]. В этих условиях всё большее значение приобретают беспилотные летательные аппараты (БПЛА), способные оперативно получать высококачественные RGBT-изображения в реальном времени. Однако эффективность таких систем определяется точностью классификации кадров: ложные срабатывания перегружают каналы связи, а пропущенные очаги снижают надежность всей системы [7–10].

Особое внимание уделяется внедрению компактных и энергоэффективных моделей сверточных нейронных сетей (CNN), способных работать на борту БПЛА. Это позволяет осуществлять предварительную фильтрацию изображений «на лету», передавая на наземный сервер наиболее информативные данные, что критично при работе в удаленных районах с ограниченной связью [11].

Цель исследования — сравнительный анализ четырех современных CNN-архитектур с точки зрения точности, стабильности, скорости инференса и вычислительной сложности. Оценка проводилась на датасете FireMan UAV RGBT — уникальном источнике мультимодальных данных, специально созданных для задач воздушного мониторинга [12]. Его использование обусловлено как практической релевантностью, так и научной новизной. Данный набор редко встречается в публикациях.

Научная новизна работы заключается в применении комплексной многокритериальной оценки на основе метода TOPSIS, бутстрэп-анализа и чувствительного анализа весов. В отличие от большинства исследований, где модели сравниваются по одной метрике (например, ассигасу), здесь учитывался баланс между качеством, устойчивостью и производительностью, что позволяет выявить архитектуру, оптимальную для внедрения в реальные бортовые системы.

Материалы и методы

Датасет, который использовался в исследовании, содержит синхронизированные пары изображений в видимом (RGB) и инфракрасном (IR) диапазонах, полученные с БПЛА во время контролируемых палов в 2022–2023 гг. Поток RGB и IR синхронизированы по времени и пиксель-к-пикселю по полю зрения, что обеспечивает точное совпадение сцен в обоих каналах. Все изображения представлены в формате JPG с разрешением 948×754 пикселей и глубиной цвета 24 бита. Перед обучением инфракрасные изображения подвергались нормализации интенсивности и масштабированию до входного размера сети с сохранением относительных температурных градиентов.

Изображения аннотированы вручную и полуавтоматически, каждая пара изображений (RGB+IR) снабжена бинарной меткой, указывающей наличие или отсутствие пожара в кадре. Данные охватывают различные сценарии лес-

ных и техногенных возгораний, а также фоны без признаков огня, что делает набор подходящим для задач классификации изображений.

Для обеспечения воспроизводимости и объективности экспериментов выборка была разделена на две непересекающиеся подвыборки:

- обучение + валидация — 81 % всех изображений;
- тестирование — 19 % всех изображений.

Внутри тестовой выборки пары изображений распределены по классам Fire и No_Fire в соотношении 80,7 к 19,3 % соответственно. В обучающей и валидационной подвыборках наблюдается схожее, но более выраженное смещение — 95 к 5 % в пользу класса Fire. Такая диспропорция обусловлена структурой исходного датасета, где кадры сгруппированы по 14 синхронизированным RGB–IR видеопоследовательностям. Различная продолжительность видеороликов и неравномерное развитие пожаров приводят к неодинаковому количеству кадров, относящихся к каждому классу [14].

Выявленный дисбаланс классов создает ряд ограничений при обучении моделей классификации. Преобладание изображений с пожарами может привести к смещению модели в сторону доминирующего класса, снижая точность предсказаний для изображений без огня. Кроме того, различие в соотношении классов между обучающей и тестовой выборками усложняет объективную оценку качества моделей и их обобщающей способности.

Для минимизации влияния дисбаланса классов обучающая выборка была сбалансирована путем увеличения числа изображений недопредставленного класса с использованием методов аугментации, при этом целью балансировки не являлось полное выравнивание классов. В результате обработки соотношение изображений в обучающей и валидационной выборках было приведено к пропорции, близкой к распределению в тестовой выборке и составило 77 % кадров класса Fire и 23 % кадров класса No_Fire.

Дополнительно в процессе обучения использовались весовые коэффициенты классов, обратно пропорциональные их представленности в обучающей выборке, которые были включены в функцию потерь. Такое сочетание балансировки данных и взвешенной функции потерь обеспечивало выравнивание вклада классов в оптимизацию модели и снижало смещение модели в сторону доминирующих классов.

Контроль переоптимизма осуществлялся за счет разбиения данных на непересекающиеся фолды с сохранением целостности видеопоследовательностей, при котором кадры одной и той же видеопоследовательности не пересекались между обучающей, валидационной и тестовой выборками. Дополнительно проводилось сопоставление метрик качества, рассчитанных на валидационной и тестовой выборках, что позволяло оценить устойчивость модели и корректность ее обобщающей способности.

Для экспериментов выбраны четыре предобученные архитектуры сверточных нейронных сетей, реализованные в библиотеке TensorFlow Keras Applications: ResNet50, MobileNetV2, MobileNetV3 Large и EfficientNet B0.

Архитектура ResNet50 выбрана в качестве классической глубокой модели с большим числом параметров, что позволяет использовать ее в качестве эталонной для контроля качества и устойчивости классификации. Остальные архитектуры относятся к классу облегченных моделей, оптимизированных для работы в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, что соответствует целевой задаче внедрения на борту беспилотных летательных аппаратов [13].

Во всех случаях применялся подход трансферного обучения, при котором использовались предварительно обученные на наборе ImageNet веса. Такой выбор обусловлен ограниченным объемом выборки и необходимостью ускорения сходимости обучения, что снижает риск переобучения и обеспечивает более стабильную генерализацию моделей при последующем дообучении на специализированных данных.

Разработанная архитектура — мультимодальная сверточная сеть с двумя параллельными потоками для RGB- и IR-изображений. Каждый поток использует собственный предобученный backbone (например, ResNet50) с глобальным усреднением признаков и нормализацией. На этапе позднего объединения признаки конкатенируются и передаются через двухслойный полносвязный классификатор: первый слой с 256 нейронами, ReLU, BatchNorm и Dropout 0,5; второй — 64 нейрона, ReLU и Dropout 0,3; выходной слой с сигмоидой для вероятности пожара. Такая конструкция обеспечивает баланс между числом параметров и информативностью признаков. Концептуальная схема показана на рис. 1.

В исследовании проведен анализ эффективности четырех архитектур сверточных нейронных сетей при решении задачи бинарной классификации изображений, полученных с беспилотных летательных аппаратов в RGB- и IR-диапазонах. Каждая архитектура адаптирована для мультимодальной постановки, в которой изображения из двух спектральных каналов обрабатываются независимо, а затем их признаки объединяются для повышения устойчивости к внешним условиям съемки. Подобная стратегия обеспечивает комплексное использование визуальной и тепловой информации, что особенно важно для задач раннего обнаружения возгораний в условиях низкой освещенности и задымления [15].

Для оценки качества моделей применяется трехкратная групповая кросс-валидация (3 fold GroupKFold), при которой все кадры, принадлежащие одной видеопоследовательности, рассматриваются как единая группа и не разделяются между обучающей и валидационной выборками. Такой подход предотвращает утечку данных между фолдами и обеспечивает объективную оценку способности моделей к обобщению.

Каждая архитектура обучается в 15 независимых запусках, выполняемых с различными начальными условиями и случайными разбиениями данных. Это позволяет снизить влияние случайных факторов, таких как распределение кадров по фолдам или начальные веса модели. В результате формируется 45 независимых обученных моделей для каждой архитектуры (3 фолда $\times$ 15 прогонов), что обеспечивает статистически устойчивую выборку результатов.

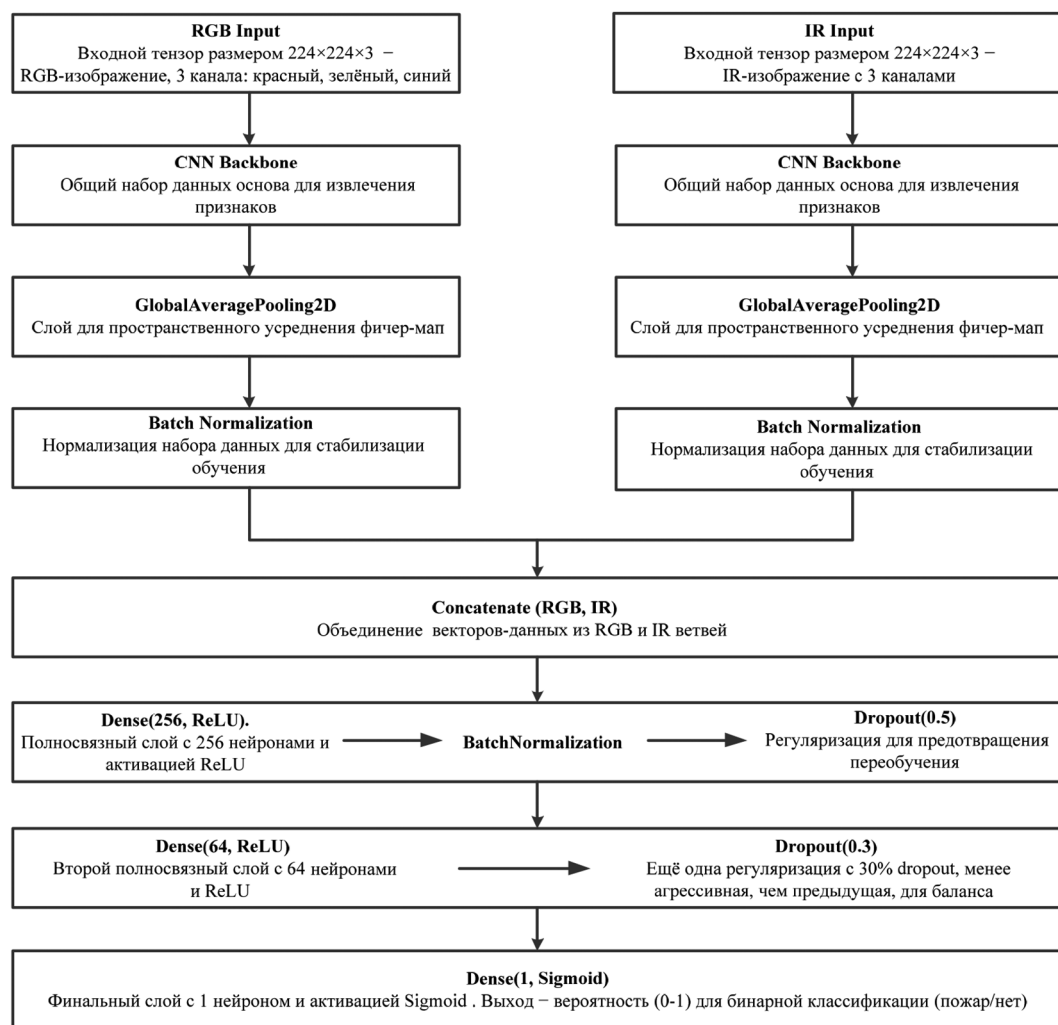


Рис. 1. Общая структура архитектуры мультимодальной классификации

Источник: составлено С.С. Загородним.

После обучения и валидации каждая модель тестировалась на независимой подвыборке; для каждой архитектуры было получено 45 репрезентативных результатов, что позволило оценить средние значения и дисперсии метрик качества и вычислительной эффективности, а также провести строгое статистическое сравнение между моделями.

Обучение выполнялось с оптимизатором Adam (начальная скорость обучения 1×10^{-4}) с адаптивным снижением learning rate (ReduceLROnPlateau — в 2 раза при отсутствии улучшения val_loss в течение трех эпох, минимум 1×10^{-6}). Для предотвращения переобучения применялась ранняя остановка (EarlyStopping — при отсутствии улучшений val_loss в течение шести эпох, с восстановлением лучших весов). Максимальное число эпох — 40, batch size — 32, размер входных изображений — 224×224 пикселей.

Учитывая дисбаланс классов (77 % пожаров, 23 % без), использовалась фокальная функция потерь ($\gamma = 2,0$, $\alpha = 0,25$), усиливающая вклад сложных примеров (слабые возгорания, дым, отражения), и дополнительно — веса классов для сбалансированного обучения.

Для повышения обобщающей способности модели обучающие данные перемешивались перед каждой эпохой, что предотвращает запоминание последовательностей примеров и способствует более устойчивому обновлению весов.

Процесс обучения и валидации сопровождался мониторингом следующих метрик:

- Accuracy — доля правильно классифицированных изображений;
- Precision — точность определения класса «пожар»;
- Recall — полнота обнаружения пожаров;
- AUC — площадь под ROC-кривой, отражающая общую способность модели различать два класса.

Данные метрики использовались для комплексной оценки эффективности обучения.

После завершения обучения каждая из 45 моделей каждой архитектуры была протестирована на отложенной тестовой выборке, не использовавшейся в процессе обучения и валидации. Для анализа сохранялись значения всех метрик качества и ресурсной эффективности.

Для каждой архитектуры формировалась выборка из 45 результатов по каждой метрике. На первом этапе проводилась проверка нормальности распределений метрик с помощью критерия Шапиро — Уилка. Так как распределение данных оказалось ненормальным, для выявления статистически значимых различий между архитектурами применялся непараметрический критерий Краскела — Уоллиса. Для детального анализа различий между парами моделей использовался тест Данна с поправкой Бонферрони, что позволяло контролировать накопленную вероятность ошибки первого рода при множественных сравнениях. Статистическая обработка выполнялась в среде Python с использованием библиотек SciPy и scikit-posthocs.

Для комплексного ранжирования моделей применялся метод многокритериального анализа TOPSIS с использованием библиотеки scikit-criteria. Все метрики предварительно нормализовывались методом Min-Max, показатели, где минимальные значения предпочтительны (например, время инференса), инвертировались. Из анализа исключались избыточно коррелирующие или мало вариабельные показатели. Веса критериев определялись на основе комбинации статистической значимости и экспертной оценки их влияния на практическое применение моделей. Для проверки устойчивости ранжирования проводился бутстрэп-анализ и чувствительный анализ весов критериев.

Такой многоэтапный подход обеспечивает объективную оценку архитектур как по качеству классификации, так и по вычислительным характеристикам, позволяя определить архитектуры, наиболее подходящие для практического использования в условиях ограниченных ресурсов БПЛА и мобильных систем.

Результаты

Проверка нормальности распределений метрик по критерию Шапиро — Уилка показала, что подавляющее большинство выборок, включая все метрики для ResNet50, MobileNetV2 и EfficientNet B0, существенно отклоняется от нормального распределения. Это обусловлено стохастичностью нейросетевого обучения, вариативностью инициализации весов и вычислительной среды. В связи с этим для анализа были выбраны непараметрические методы: критерий Краскела — Уоллиса для межгруппового сравнения и тест Данна с поправкой Бонферрони для парных различий, что обеспечило устойчивость результатов при наличии ненормальности и выбросов.

Анализ выявил статистически значимые различия ($p < 0,05$) между архитектурами по большинству показателей вычислительной эффективности, что указывает на их неодинаковую оптимизацию и пригодность для ресурсоограниченных систем. При этом по метрикам общего качества классификации — Accuracy, Precision, F1 score, MCC и Balanced Accuracy — различия оказались незначимыми ($p > 0,05$), что говорит о сопоставимой точности и сбалансированности всех моделей в задаче классификации.

Результаты критерия Краскела — Уоллиса демонстрируют значимые различия в метриках чувствительности (Recall), качества ранжирования (AUC, AP) и ресурсной эффективности при сходном уровне общей точности классификации между моделями (рис. 2).

Это подчеркивает необходимость комплексной оценки моделей с учетом не только показателей качества классификации, но и параметров вычислительной производительности, особенно при применении в системах реального времени.

На заключительном этапе статистического анализа с применением теста Данна с поправкой Бонферрони было установлено, что пары архитектур — ResNet50, MobileNetV2, MobileNetV3 Large и EfficientNet B0 — демонстрируют статистически значимые различия по метрикам качества классификации и вычислительной эффективности ($p < 0,05$), что подтверждает их неоднородность. В частности, между MobileNetV2 и MobileNetV3 Large, а также MobileNetV3 Large и EfficientNet B0 различия оказались незначимыми, что логично для моделей, оптимизированных под ограниченные ресурсы. В отличие от них ResNet50 как эталонная модель с большим числом параметров существенно отличается от всех остальных. Для комплексного ранжирования

архитектур был применен метод TOPSIS, устойчивый к выбросам и не требующий предположений о распределении данных. Перед анализом все метрики были нормализованы методом Min-Max в диапазон $[0,1]$, а для показателей, где меньшие значения предпочтительны (например, Training Time), выполнена инверсия. Корреляционный анализ выявил почти полную зависимость между FLOPs, Params и Model Size ($r = 0,999$), поэтому последние две метрики исключены. Финальный набор для TOPSIS включил: Recall, Precision, Average Precision, FLOPs, Average FPS и Training Time, в данном случае обеспечивался баланс между качеством и эффективностью.

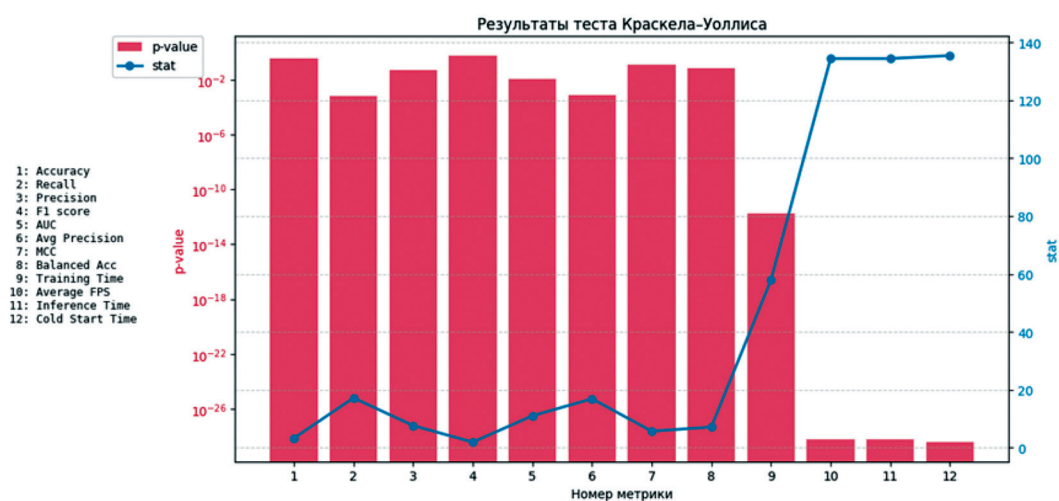


Рис. 2. Диаграмма результатов теста Краскела — Уоллиса

Источник: составлено И.К. Беловой.

Для выполнения метода TOPSIS было необходимо определить веса критериев, отражающие их относительную значимость (рис. 3).

Распределение весовых коэффициентов показателей обосновано результатами статистического анализа, выполненного с использованием критерия Краскела — Уоллиса и последующих парных сравнений. При формировании структуры весов соблюдался принцип равного баланса между метриками качества и метриками ресурсной эффективности (0,5:0,5), что обеспечило эквивалентное влияние обеих групп критериев на итоговую интегральную оценку в рамках метода TOPSIS.

Среди метрик качества наибольший вес (0,30) присвоен показателю Recall, который продемонстрировал статистически значимые различия между архитектурами и имеет ключевое значение для решаемой задачи обнаружения возгораний, где приоритетом является минимизация пропусков событий.

Среди метрик ресурсной эффективности наибольший вес (0,30) был присвоен Average FPS, поскольку данный показатель продемонстрировал статистически значимые различия между архитектурами и имеет критическое

значение для систем, функционирующих на борту беспилотных летательных аппаратов, где важна высокая скорость обработки видеопотока.

Таким образом, предложенная система весов обеспечивает рациональное соотношение между качественными и ресурсными характеристиками моделей, отражая как статистическую значимость различий между архитектурами, так и их практическую релевантность применительно к задаче обнаружения возгораний в реальном времени.

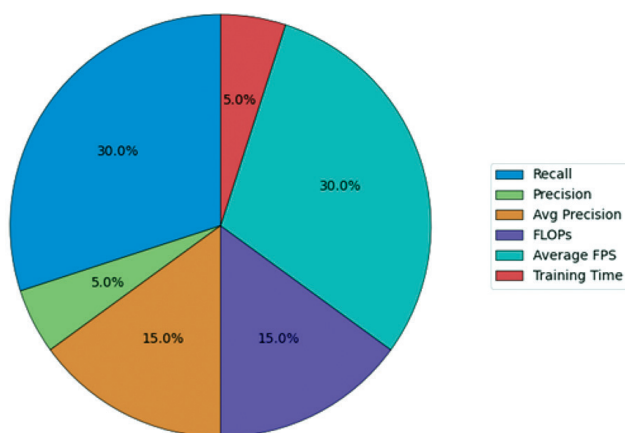


Рис. 3. Диаграмма распределения весов метрик для многокритериального ранжирования архитектур моделей методом TOPSIS

Источник: составлено И.К. Беловой.

После формирования весов и агрегации метрик по каждой архитектуре моделей был проведен многокритериальный анализ методом TOPSIS, позволяющим определить степень приближенности каждой модели к идеальному решению. Наивысшее значение интегрального показателя TOPSIS получено для MobileNetV2 (0,87). Это свидетельствует о наиболее сбалансированном сочетании качества детекции и эффективности использования вычислительных ресурсов. MobileNetV3 Large (0,72), продемонстрировала меньшую степень оптимальности, но также высокое качество предсказаний. Модели EfficientNet B0 (0,43) и ResNet50 (0,35) имеют меньшую сбалансированность и ограниченную применимость в условиях, требующих высокой скорости обработки и ограниченных вычислительных мощностей.

Для оценки надежности и устойчивости полученных результатов был проведен бутстрэп-анализ (bootstrap resampling), основанный на 1 000 повторных выборках исходных данных. Метод позволяет построить доверительные интервалы для итоговых значений TOPSIS оценок и определить степень вариабельности оценок (рис. 4).

Модель MobileNetV2 демонстрирует наибольшее среднее значение TOPSIS = 0,869 при узком 95%-м доверительном интервале [0,813; 0,923],

что указывает на стабильность ее доминирования. MobileNetV3 Large также характеризуется достаточно узким интервалом и воспроизводимостью результата. Модели EfficientNet B0 и ResNet50 демонстрируют более низкие средние значения и не пересекаются по интервалам с лидирующими архитектурами, что подтверждает статистическую устойчивость выявленной иерархии.

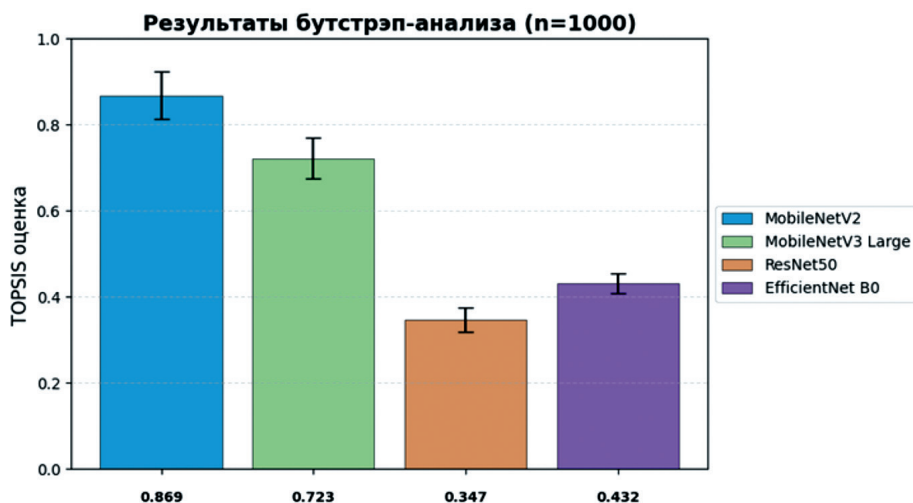


Рис. 4. Диаграмма средних значений TOPSIS архитектур моделей

Источник: составлено И.К. Беловой.

Для дополнительной проверки устойчивости полученных выводов проведен чувствительный анализ весов (sensitivity analysis). Его цель заключалась в оценке влияния изменений весовых коэффициентов метрик на итоговое ранжирование архитектур. В рамках анализа выполнялось многократное (1 000 итераций) повторение TOPSIS-анализа с варьированием весов в пределах $\pm 20\%$ от исходных значений, при условии сохранения приоритета метрик качества над показателями ресурсной эффективности (качество $\geq$ ресурсная эффективность).

Результаты показали абсолютную устойчивость модели MobileNetV2 в 100 % итераций, тогда как MobileNetV3 Large стабильно находилась на 2-м месте. Таким образом, чувствительный анализ подтверждает, что результаты TOPSIS-анализа обладают высокой степенью устойчивости даже при существенных изменениях структуры приоритетов между критериями. Это означает, что доминирование MobileNetV2 не является следствием выбора конкретной конфигурации весов, а отражает ее объективное преимущество по совокупности показателей качества и ресурсной эффективности.

Совместное применение TOPSIS, бутстрэп- и чувствительного анализа позволило не только выявить оптимальную архитектуру, но и убедиться в на-

дежности, статистической значимости и воспроизводимости полученных результатов, что обеспечивает высокий уровень доверия к итоговым выводам исследования.

Заключение

В ходе исследования проведена комплексная оценка четырех архитектур сверточных нейронных сетей: MobileNetV2, MobileNetV3 Large, EfficientNet B0 и ResNet50 — применительно к задаче бинарной классификации изображений лесных пожаров, полученных с беспилотных летательных аппаратов. Для многокритериальной оценки эффективности моделей использовались показатели точности и ресурсной эффективности, методы TOPSIS, бутстрэп-анализа и чувствительного анализа весов критериев.

Метод TOPSIS позволил выявить наиболее сбалансированную архитектуру с учетом как качественных, так и ресурсных характеристик. Наибольший интегральный показатель был получен для MobileNetV2 (0,87). Эта архитектура продемонстрировала оптимальное сочетание высокой чувствительности к возгораниям (Recall) и скорости обработки видеопотока (Average FPS), что критически важно для систем мониторинга пожаров на борту БПЛА. MobileNetV3 Large заняла второе место (0,72), тогда как EfficientNet B0 и ResNet50 показали более низкую сбалансированность и ограниченную применимость для задач с высокими требованиями к скорости обработки.

Таким образом, совместное применение TOPSIS, бутстрэп и чувствительного анализа позволило:

- выявить MobileNetV2 как наиболее сбалансированную архитектуру для задачи раннего обнаружения пожаров с БПЛА;
- подтвердить ее статистическую устойчивость и воспроизводимость;
- обосновать выбор архитектуры не только по точности, но и по производительности, что критично для реальных систем.

Работа вносит вклад в развитие методологии оценки CNN-архитектур для мультимодальных задач, предлагая комплексный подход, сочетающий статистическую валидацию, многокритериальный анализ и устойчивость к изменениям условий. Результаты могут быть использованы при проектировании бортовых систем мониторинга пожаров, где требуется баланс между качеством, скоростью и энергоэффективностью.

Список литературы

- [1] *Akhloufi M.A., Castro N. A., Couturier A.* UAVs for wildland fires // *Autonomous Systems: Sensors, Vehicles, Security, and the Internet of Everything*. SPIE, 2018. Vol. 10643. P. 134–147. <https://doi.org/10.1117/12.2304834>
- [2] *Bouguettaya A., Zarzour H., Taberkit A. M., Kechida A.* A review on early wildfire detection from unmanned aerial vehicles using deep learning-based computer vision

- algorithms // Signal Processing. 2022. Vol. 190. Article no. 108309. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2021.108309> EDN: HTSLZA
- [3] *Burton Ch., Lampe S., Kelley D.I., Thiery W., Hantson S., Christidis N., Gudmundsson L., Forrest M., Burke E., Chang J., Huang H., Ito A., Kou-Giesbrecht S., Lasslop G., Li W., Nieradzik L., Li F., Chen Ya., Randerson Ja., Reyer Ch.P.O., Mengel M.* Global burned area increasingly explained by climate change // Nature Climate Change. 2024. Vol. 14. No. 11. P. 1186–1192. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02140-w> EDN: READTK
- [4] *Ghali R., Akhloufi M.A., Mseddi W.S.* Deep learning and transformer approaches for UAV-based wildfire detection and segmentation // Sensors. 2022. Vol. 22. No. 5. Article no. 1977. <https://doi.org/10.3390/s22051977> EDN: HYRIMZ
- [5] *Ghali R., Akhloufi M.A.* Deep learning approaches for wildland fires remote sensing: classification, detection, and segmentation // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. No. 7. Article no. 1821. <https://doi.org/10.3390/rs15071821> EDN: BRAETM
- [6] *Hossain F.M.A., Zhang Y.M., Tonima M.A.* Forest fire flame and smoke detection from UAV-captured images using fire-specific color features and multi-color space local binary pattern // Journal of Unmanned Vehicle Systems. 2020. Vol. 8. No. 4. P. 285–309. <https://doi.org/10.1139/juvs-2020-0009> EDN: JPMXBA
- [7] *Khan A., Hassan B., Khan S., Ahmed R., Abuassba A.* DeepFire: a novel dataset and deep transfer learning benchmark for forest fire detection // Mobile Information Systems. 2022. Vol. 2022. No. 1. Article no. 5358359. <https://doi.org/10.1155/2022/5358359> EDN: PJBAGK
- [8] *Kularatne W., Sedaghat Shayegan K., Álvarez Casado C., Rajala J., Hänninen, T., Bordinallo López M., Nguyen N. Le.* FireMan-UAV-RGBT (1.0.0-beta.2) // Zenodo. 2024. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13732947>
- [9] *Perevedentsev Yu., Sherstyukov B., Gusarov A., Aukhadeev T., Mirsaeva N.* Climate-induced fire hazard in forests in the Volga federal district of European Russia during 1992–2020 // Climate. 2022. Vol. 10. No. 7. Article no. 110. <https://doi.org/10.3390/cli10070110> EDN: WIFGSO
- [10] *Pryadilina N.K., Zinoveva I. S., Skvorcov E.A.* Economic assessment of the consequences of forest fires (on the example of the Ural federal district) // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2024. Т. 12. № 1. С. 79–94. <https://doi.org/10.34220/2308-8877-2024-12-1-79-94> EDN: AZXDJX
- [11] *Shamsoshoara A., Afghah F., Razi A., Zheng L., Fulé P., Blasch E.* Aerial imagery pile burn detection using deep learning: the FLAME dataset // Computer Networks. 2021. Vol. 193. Article no. 108001. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108001> EDN: OOWULQ
- [12] *Wonjae Lee, Seonghyun Kim, Yong-Tae Lee, Hyun-Woo Lee, Min Choi.* Deep neural networks for wild fire detection with unmanned aerial vehicle // 2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). Las Vegas, NV, 2017. P. 252–253, <https://doi.org/10.1109/ICCE.2017.7889305>.
- [13] *Никулина С.Н., Белова И.К., Васильев В.В.* Выбор оптимального метода обучения нейронных сетей для решения задач экологического мониторинга промышленных зон // Актуальные проблемы экологии и природопользования : сборник научных трудов XXVI Международной научно-практической конференции : в 2 томах. Москва, 25-27 апреля 2025 г. Москва : РУДН, 2025. Т. 2. С. 130–138.
- [14] *Васильев В.В., Белова И.К.* Подготовка данных для автоматического распознавания рельефа с беспилотных летательных аппаратов с использованием нейронных сетей // Исследования и инновации: синергия знаний и практики : сборник статей

II Международной научно-практической конференции. Москва, 2025. С. 55–61. EDN: KEJWBU

- [15] Белова И.К., Видяев К.А. Использование нейросетевых технологий для оценки состояния лесных ресурсов // Парадигма. 2025. № 4-2. С. 26–31. EDN: YEZERT

Сведения об авторах:

Загородний Серафим Сергеевич, аспирант, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0009-0009-7500-7307; eLIBRARY SPIN-код: 8839-5769. E-mail: zagorodniy.serafim@mail.ru

Белова Ирина Константиновна, кандидат физико-математических наук, Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 248002, Калужская область, г.о. Город Калуга, г. Калуга, ул. Университетский Городок, зд. 1. ORCID: 0009-0000-6337-5342; eLIBRARY SPIN-код: 3560-5659. E-mail: belova.ik@bmstu.ru

Никулина Светлана Николаевна, кандидат технических наук, доцент, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0009-0001-5958-5168. E-mail: nikulina-sn@rudn.ru



DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-3-515-526

EDN: DQTIKY

УДК 504.064

Научная статья / Research article

Вопросы комплексного внедрения распределенных сенсорных сетей и технологий интернета вещей для мониторинга окружающей среды в целях обеспечения экологической безопасности

А.В. Гусев^{1,2}  , М.А. Шахраманьян^{1,3}¹Российский государственный социальный университет, Москва, Российская Федерация²ООО «Сенсоматика», Москва, Российская Федерация³Финансовый университет при Правительстве РФ, Москва, Российская Федерация gusevandree2015@yandex.ru

Аннотация. Цель исследования — разработка критериального аппарата для оценки эффективности комплексных систем экологического мониторинга, объединяющих распределенные сенсорные сети (РСС) и технологии Интернета вещей (IoT) для контроля водной и воздушной сред. Объектом выступают архитектуры интегрированных систем, совмещающие стационарные и мобильные измерительные узлы. Методология опирается на системный и многокритериальный анализ: технологические (плотность сети, стабильность датчиков), информационные (пространственная репрезентативность, пригодность для цифровых двойников), экономические (совокупная стоимость владения, предотвращенный ущерб) и нормативные группы критериев. Проведен обзор международного опыта, выявивший разрыв между возможностями IoT-сенсоров и регуляторными требованиями. Предложена трехуровневая архитектура — от полевого сбора данных до облачной платформы цифровых двойников, формирующей тепловые карты относительно предельно допустимых концентраций (ПДК). Основной вывод: ключевые препятствия к внедрению носят не столько технологический, сколько нормативно-методический характер. Показано, что плотная сеть недорогих датчиков позволяет сократить «слепое время» обнаружения утечек почти вдвое, подтверждая ценность синергетического эффекта перед эпизодическими замерами. Предложенная система критериев образует методическую основу для обоснования и аудита проектов цифрового мониторинга, способствуя переходу к предиктивной модели управления экологическими рисками.

Ключевые слова: мониторинг окружающей среды, распределенные сенсорные сети, интернет вещей, комплексный экологический контроль, цифровые двойники, оценка эффективности

Вклад авторов. Гусев А.В. — концептуализация, разработка методологии исследования, проведение исследования, разработка программного обеспечения, визуализация

© Гусев А.В., Шахраманьян М.А., 2026

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

и анализ полученных данных, написание, рецензирование и редактирование рукописи. *Шахрамьян М.А.* — создание модели исследования, научное руководство исследованием. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных. Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

История статьи: поступила в редакцию 16.12.2025; доработана после рецензирования 14.01.2026; принята к публикации 12.02.2026.

Для цитирования: Гусев А.В., Шахрамьян М.А. Вопросы комплексного внедрения распределенных сенсорных сетей и технологий интернета вещей для мониторинга окружающей среды в целях обеспечения экологической безопасности // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 3. С. 515–526. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-515-526> EDN: DQTIKY

Issues of comprehensive implementation of distributed sensor networks and internet of things technologies for environmental monitoring to ensure ecological safety

Andrey V. Gusev^{1,2} , Mikhail A. Shakhramanyan^{1,3}

¹*Russian State Social University, Moscow, Russian Federation*

²*Sensomatics LLC, Moscow, Russian Federation*

³*Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation*

 gusevand2015@yandex.ru

Abstract. The study aims to develop a criteria framework for assessing the effectiveness of integrated environmental monitoring systems that combine distributed sensor networks (DSN) and Internet of Things (IoT) technologies for water and air quality control. The object of research is the architecture of integrated systems merging stationary and mobile measurement nodes. The methodology employs systemic and multi-criteria analysis across four groups: technological (network density, sensor stability), informational (spatial representativeness, suitability for digital twins), economic (total cost of ownership, prevented damage), and regulatory. A review of international experience revealed a gap between IoT sensor capabilities and regulatory requirements. A three-level architecture is proposed — from field data collection to a cloud platform of digital twins that generates heat maps normalized to permissible exposure limits. The main conclusion: key barriers are primarily normative and methodological rather than technological. A dense network of low-cost sensors has been shown to cut the “blind time” of leak detection nearly in half, confirming the value of synergistic effect over episodic measurements. The proposed criteria system provides a methodological basis for substantiating

and auditing digital monitoring projects, facilitating the transition to a predictive environmental risk management model.

Keywords: environmental monitoring, distributed sensor networks, Internet of Things (IoT), comprehensive environmental control, digital twins, efficiency assessment.

Authors' contribution. *A.V. Gusev* — conceptualization, development of research methodology, conduct of research, development of software, visualization and analysis of the obtained data, writing, reviewing, and editing of the manuscript. *M.A. Shakhramanyan* — creation of the research model, scientific management of the research. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability. All data obtained during this study are included in the published article.

Article history: received 16.12.2025; revised 14.01.2026; accepted 12.02.2026.

For citation: Gusev AV, Shakhramanyan MA. Issues of comprehensive implementation of distributed sensor networks and internet of things technologies for environmental monitoring to ensure ecological safety. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(3):515–526. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-515-526> EDN: DQTIKY

Введение

Актуальность разработки и внедрения комплексных систем экологического мониторинга, основанных на сквозных цифровых технологиях, обусловлена растущей антропогенной нагрузкой и необходимостью перехода к предиктивной модели управления экологическими рисками. Традиционные методы контроля, опирающиеся на эпизодические точечные измерения, не обеспечивают необходимой пространственно-временной детализации данных для оперативного реагирования и прогнозирования. В этом контексте объединение технологий распределенных сенсорных сетей (РСС) и интернета вещей (IoT) открывает принципиально новые возможности для создания непрерывных цифровых образов состояния окружающей среды (цифровых двойников). Однако массовое внедрение таких решений сдерживается не только технологическими сложностями, но и отсутствием унифицированных методик оценки их комплексной эффективности с точки зрения достижения целевых показателей экологической безопасности.

Настоящее исследование направлено на разработку и апробацию критериального аппарата для оценки эффективности внедрения архитектур, интегрирующих РСС для мониторинга водной и воздушной сред на единой IoT-платформе. Для достижения поставленной цели в работе решается ряд взаимосвязанных задач, включающих синтез архитектуры интегрированной системы, разработку системы многокритериальной оценки, анализ и система-

тизацию барьеров внедрения, а также иллюстрацию работы ключевых компонентов системы. Научная новизна исследования заключается в комплексном подходе, который объединяет технические, экономические и нормативные аспекты оценки, с особым фокусом на проблеме интеграции разнородных данных и их пригодности для построения динамических цифровых двойников окружающей среды. Работа логически развивает и конкретизирует положения диссертационного исследования, посвященного синтезу и анализу систем мониторинга с использованием цифровых двойников и искусственного интеллекта.

Материалы и методы

Теоретическая и нормативная база

Эволюция систем экологического мониторинга демонстрирует четкий тренд от централизованных систем сбора аналоговых данных к распределенным, интеллектуальным сетевым решениям. Современный этап характеризуется доминированием беспроводных сенсорных сетей (WSN), которые стали отправной точкой для интернета вещей, формируя распределенную сенсорную сеть. Ключевыми источниками развития выступают уменьшение габаритов и снижение стоимости аппаратных платформ, рост энергоэффективности сенсоров и появление специализированных протоколов связи (таких как LoRaWAN, NB-IoT и др.), разработанных специально для устройств с батарейным питанием и малым трафиком [1].

Анализ международного опыта и научных публикаций позволяет выделить несколько ключевых тенденций. Во-первых, наблюдается рост числа развернутых городских и промышленных сетей мониторинга, например, для контроля качества воздуха в Сингапуре или выбросов метана в нефтегазовой отрасли [2]. Во-вторых, исследования все чаще фокусируются на объединении данных различных пространственных масштабов — от городского уровня до уровня здания и персонального воздействия [3–6]. Однако эти исследования зачастую ведутся изолированно, что создает разрыв в данных и препятствует формированию целостной картины. В-третьих, критическим вызовом, отмеченным в международных обзорах, является отсутствие единых стандартов, регламентирующих, что измерять, где, с какой частотой и с каким допустимым качеством измерений, особенно для данных, претендующих на интеграцию в государственные системы поддержки принятия решений [7].

Стратегическое значение внедрения IoT-систем подчеркивается ужесточающейся глобальной регуляторной средой, такой как Регламент ЕС 2024/1787 по метановым выбросам или требования Агентства по охране окружающей среды США, которые делают акцент на современных методах обнаружения и измерений. В России развитие данного направления стимулируется нацио-

нальным проектом «Экология»¹ и «Стратегией цифровой трансформации отрасли экологии»². Отечественные разработки включают как пилотные проекты коммерческих компаний, так и научные исследования в области создания цифровых двойников для оценки состояния водных объектов³. Однако нормативная база, регламентирующая мониторинг, остается ориентированной преимущественно на данные, полученные с помощью официальных, поверенных методов измерений. Это создает фундаментальный правовой барьер для интеграции данных с массовых IoT-сенсоров в систему государственного экологического контроля, что актуализирует задачу разработки новых методик валидации [8].

Методология оценки эффективности

Для преодоления фрагментарности оценок в данном исследовании применяется системный подход, рассматривающий комплексную систему мониторинга как целостный объект с четко выделенными взаимодействующими уровнями. В качестве ядра методики используется критериальный анализ, структурированный по четырем группам критериев, которые представлены в таблице.

Технологические критерии включают оценку плотности сети, энергоэффективности узлов и надежности связи с использованием как проводных (например, промышленный стандарт Modbus RS-485 для стационарных постов), так и различных беспроводных протоколов, выбор которых определяется конкретными требованиями приложения (дальность, энергопотребление, пропускная способность) [9].

Информационные критерии фокусируются на качестве данных и их пригодности для построения цифровых двойников, что требует применения методов пространственной интерполяции (кригинг, IDW) и алгоритмов машинного обучения для верификации и слияния разнородных потоков данных [10; 11].

Экономические критерии направлены на анализ совокупной стоимости владения (ТСО) и потенциального возврата на инвестиции (ROI), учитывающего как прямую экономию на традиционном мониторинге, так и стоимостную оценку предотвращенного экологического ущерба.

¹ Национальный проект «Экология» // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. URL: https://www.mnr.gov.ru/activity/np_ecology/?ysclid=mrp5gi2j4675201776 (дата обращения: 11.11.2025).

² Распоряжение Правительства РФ от 15 декабря 2023 г. № 3664-р «О стратегическом направлении в области цифровой трансформации отрасли экологии и природопользования, относящейся к сфере деятельности Министерства природных ресурсов и экологии РФ». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202312250116?ysclid=mrp5k5x79j989815121> (дата обращения: 11.11.2025).

³ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025669365 Российская Федерация. Программа автоматизированного построения полей текущих концентраций загрязняющих веществ в водных объектах на основе данных со станций экологического мониторинга : заявл. 16.07.2025 : опублик. 25.07.2025 / А.В. Гусев.

Система критериев оценки эффективности комплексного внедрения

Группа критериев	Ключевые параметры и показатели	Методы и подходы к оценке
Технологические	Плотность покрытия сети. Точность и стабильность датчиков: отклонение от эталона, время дрейфа. Надежность связи: коэффициент готовности системы, уровень потерь данных. Поддержка различных протоколов Энергоавтономность: срок работы от автономного источника	Сравнительный анализ с эталонным оборудованием. Методы оптимизации размещения узлов сети. Полевые испытания и долгосрочные проекты
Информационные	Оперативность данных: задержка между измерением и доступностью (латентность) Пространственная репрезентативность. Пригодность для моделирования: качество данных как входных параметров для цифровых двойников и прогнозных моделей (рассеивания загрязнений)	Методы интерполяции Алгоритмы машинного обучения
Экономические	CAPEX (капитальные затраты): стоимость аппаратного обеспечения, развертывания сети. OPEX (эксплуатационные затраты): обслуживание, калибровка, энергопотребление, передача данных. Стоимость владения (TCO): совокупные затраты за жизненный цикл. Потенциальная экономия: оценка предотвращенного ущерба от оперативного реагирования	Анализ «затраты — эффективность» (Cost-Effectiveness Analysis, CEA). Моделирование возврата на инвестиции (ROI) с учетом факторов риска
Нормативные	Соответствие требованиям контролирующих органов: возможность верификации данных для официального учета. Интегрируемость: совместимость с государственными информационными системами	Экспертный анализ нормативных документов. Разработка и апробация методик валидации данных

Источник: составлено А.В. Гусевым.

Criteria system for evaluating the effectiveness of comprehensive implementation

Criteria group	Key parameters and indicators	Assessment methods and approaches
Technological	Network coverage density. Sensor accuracy and stability: deviation from reference, drift time. Communication reliability: system availability factor, data loss rate. Support for various protocols. Energy autonomy: battery life	Comparative analysis with reference equipment. Methods for optimizing network node placement. Field tests and long-term projects
Informational	Data timeliness: delay between measurement and availability (latency). Spatial representativeness. Suitability for modeling: data quality as input parameters for digital twins and predictive models (pollutant dispersion)	Interpolation methods. Machine learning algorithms
Economic	CAPEX (capital expenditures): cost of hardware, network deployment. OPEX (operating expenses): maintenance, calibration, energy consumption, data transmission. Total Cost of Ownership (TCO): total costs over the lifecycle. Potential savings: assessment of prevented damage due to rapid response	Cost-Effectiveness Analysis (CEA). ROI modeling with consideration of risk factors
Regulatory	Compliance with regulatory requirements: possibility of data verification for official accounting. Integrability: compatibility with government information systems	Expert analysis of regulatory documents. Development and testing of data validation methodologies

Source: compiled by A.V. Gusev.

Нормативные критерии оценивают соответствие выходных данных системы требованиям контролирующих органов и возможность их интеграции в государственные информационные системы, такие как ФГИС «Экомониторинг»⁴.

Результаты и обсуждение

Применение разработанной системы критериев позволяет перейти к структурированной оценке. Технологическая и информационная эффективность такой системы кардинально отличается от традиционного подхода. В отличие от разовых замеров, результаты которых становятся доступны через несколько суток, распределенная сеть даже относительно недорогих датчиков обеспечивает непрерывный мониторинг в режиме, близком к реальному времени. Это позволяет не только фиксировать факт загрязнения, но и отслеживать динамику и выявлять источник. Исследования в нефтегазовой отрасли показывают, что правильная конфигурация сенсорной сети позволяет сократить так называемое «слепое время» — период между утечкой и ее обнаружением — почти вдвое [2]. Таким образом, ценность заключается не в абсолютной точности отдельного бюджетного датчика, а в синергетическом эффекте от плотной сети, обеспечивающей репрезентативное покрытие района или акватории. Данный этап реализуется с учетом факторов равномерности покрытия, особенностей рельефа и наличия потенциальных источников загрязнения [12]. Получаемая картина распределения загрязнений, даже с определенной погрешностью, объективно более ценна, чем отсутствие данных в промежутках между редкими контрольными точками (рис. 1).

На основе системного анализа на рис. 2 предложена многоуровневая архитектура, интегрирующая сбор данных о водной и воздушной средах.

Верхний полевой уровень объединяет стационарные и мобильные посты с датчиками, использующими стандартизированные интерфейсы (включая Modbus RS-485) для надежной передачи данных. Сетевой уровень обеспечивает агрегацию информации с применением энергоэффективных протоколов, что критически важно для работы в удаленных или экстремальных условиях. Нижний платформенный уровень, основанный на облачных технологиях, выступает ядром системы, где с помощью методов пространственной интерполяции и машинного обучения создаются и актуализируются цифровые двойники, визуализируемые в виде нормализованных относительно ПДК тепловых карт [13].

⁴ Федеральная государственная информационная система состояния окружающей среды — ФГИС «Экомониторинг» // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. URL: <https://www.mnr.gov.ru/activity/is/fgis-ekomonitoring/?ysclid=mrp61quth906763996> (дата обращения: 15.12.2025).



Рис. 1. Сравнительный анализ подходов к мониторингу
Источник: составлено А.В. Гусевым.

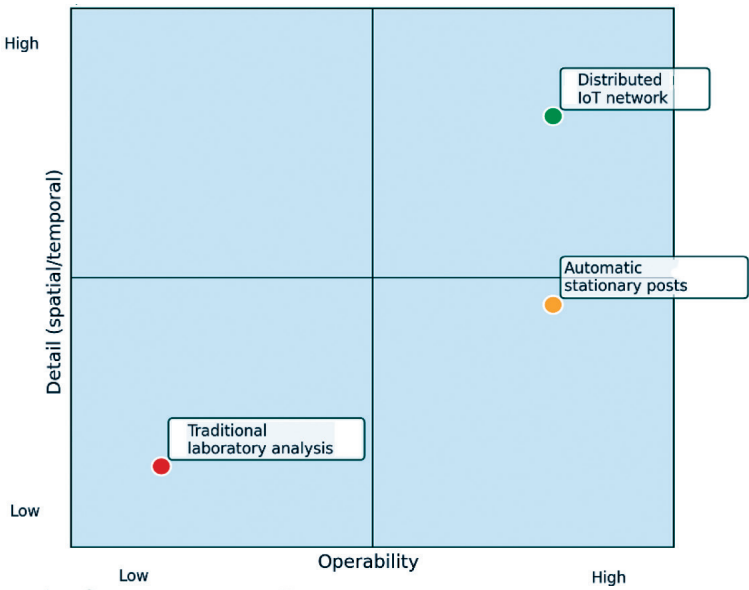


Figure 1. Comparative analysis of monitoring approaches
Source: compiled by A.V. Gusev.

Проведенный анализ позволяет классифицировать ключевые барьеры комплексного внедрения. К технико-метрологическим относятся нестабильность показаний низкобюджетных сенсоров и сложности обеспечения длительного энергоснабжения в удаленных локациях. Информационные барьеры связаны с проблемами обработки больших данных, их верификации

и объединения из разнородных источников. Наиболее значимым является нормативно-правовой барьер: данные с IoT-сенсоров, не входящих в государственный реестр средств измерений, не могут служить официальным основанием для санкций, а могут являться только «сигнальными» устройствами. Преодоление этого барьера видится в развитии гибридных моделей, где сеть IoT выполняет функции непрерывного скрининга и оперативного оповещения [14; 15]. Для подтверждения и принятия административных решений привлекаются либо поверенные приборы, либо приборы-аспираторы, которые на основе поступившей информации о превышении нормативов качества смогут в автоматическом режиме отбирать пробы воды и воздуха с последующим лабораторным анализом. Организационно-экономические барьеры включают высокие первоначальные затраты и межведомственную разобщенность.

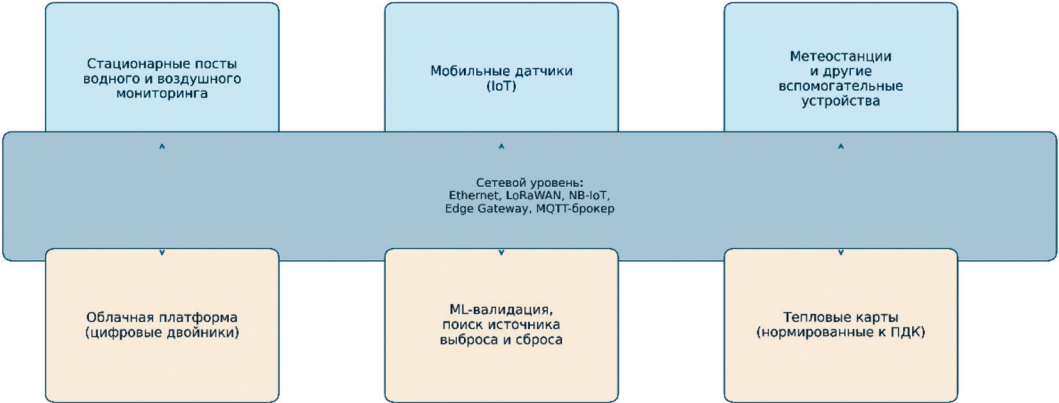


Рис. 2. Архитектура интегрированной системы комплексного экологического мониторинга
Источник: составлено А.В. Гусевым.

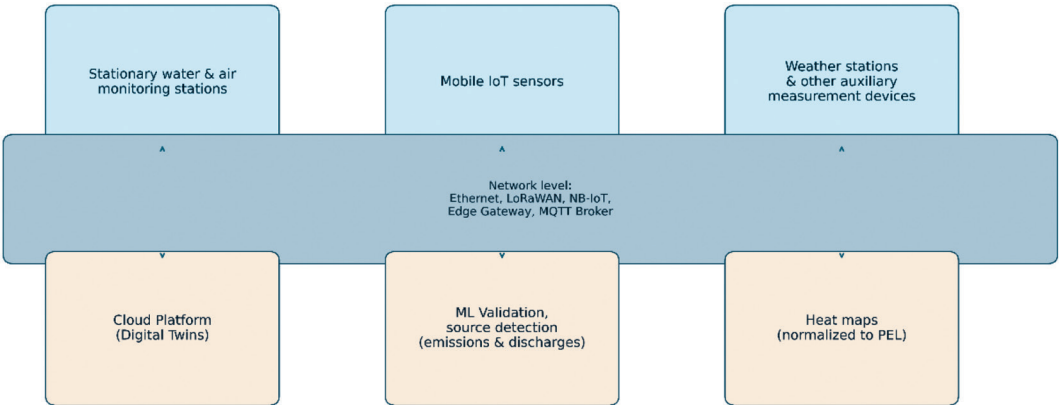


Figure 2. Comparative analysis of monitoring approaches
Source: compiled by A.V. Gusev.

Заключение

Проведенное исследование подтверждает, что комплексное внедрение распределенных сенсорных сетей и технологий интернета вещей обладает значительным трансформационным потенциалом для экологического мониторинга. Предложенная система критериев оценки формирует методическую основу для обоснования и аудита подобных проектов, объединяя ранее разрозненные технологические, экономические и нормативные аспекты.

Ключевым выводом является констатация того, что главные препятствия носят не столько технологический, сколько нормативно-методический характер. Технологии развиваются опережающими темпами по сравнению с адаптацией к ним регуляторной среды и методов оценки. В этом контексте важность подобных научных исследований сложно переоценить. Именно они обеспечивают необходимый научно-методический фундамент для преодоления существующего разрыва. Работы, направленные на разработку архитектур гибридных систем, алгоритмов валидации данных сенсорных сетей и экономических моделей оценки их эффективности, имеют критическое прикладное значение. Они создают инструментарий, необходимый регуляторам для обновления нормативной базы, а бизнесу — для обоснования инвестиций в новые технологии в условиях растущего давления глобальных экологических требований и климатических целей.

К перспективным направлениям дальнейших исследований относятся разработка стандартизированных протоколов объединения и передачи данных, создание правовых механизмов для учета данных IoT-мониторинга, а также углубленное экономическое моделирование жизненного цикла комплексных систем для различных отраслей. Продолжение этих исследований является необходимым условием для формирования нового поколения инструментов экологической безопасности, обеспечивающих обоснованность, оперативность и предиктивность управленческих решений.

Список литературы / References

- [1] Abdulhussain SH., Mahmmmod BM, Alwhelat A, Shehada D, Shihab ZI, Mohammed HJ, Abdulameer TH, Alsabah M, Fadel MH, Ali SK, Abbood GH, Asker ZA, Hussian A. A comprehensive review of sensor technologies in IoT: technical aspects, challenges, and future directions. *Computers*. 2025;14(8):342–356. <https://doi.org/10.3390/computers14080342> EDN: FZTYVS
- [2] Van Kessel TG, Ramachandran M, Klein LJ, Nair D, Hinds N, Hamann HF, Sosa NE. Methane leak detection and localization using wireless sensor networks for remote oil and gas operations. *2018 IEEE SENSORS, New Delhi, India*. 2018:1–4. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2018.8589585>
- [3] Pantelic J, Nazarian N, Miller C, Meggers F, Lee JaKW, Licina D. Transformational IoT sensing for air pollution and thermal exposures. *Frontiers in Built Environment*. 2022;8:971523. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.971523> EDN: DJXNXM

- [4] Maksoud N, Mohamed MM. Digital twins applications in the water sector. *AIP Conference Proceedings*. 2023;2928:160014. <https://doi.org/10.1063/5.0170525>
- [5] Tao F., Zhang H., Liu A., Nee AYC. Digital twin in industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019;15(4):2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
- [6] Yusuf A, O'Flynn D, White B, Holland L, Parle-McDermott A, Lawler J, McCloughlin T, Harold D, Huerta B, Regan F. Monitoring of emerging contaminants of concern in the aquatic environment: a review of studies showing the application of effect-based measures. *Analytical Methods*. 2021;13(43):5120–5143. <https://doi.org/10.1039/d1ay01184g> EDN: SHKDBT
- [7] Alaerjan A. Towards sustainable distributed sensor networks: an approach for addressing power limitation issues in WSNs. *Sensors*. 2023;23(2):975. <https://doi.org/10.3390/s23020975> EDN: JPTHYY
- [8] Kozłowski T, Noran O., Trevathan J. Designing an evaluation framework for IoT environmental monitoring systems. *Procedia Computer Science*. 2023;219:220–227. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.284> EDN: CXXKAO
- [9] Katie B. Internet of things (IoT) for environmental monitoring. *International Journal of Computing and Engineering*. 2024;6(3):29–42. <https://doi.org/10.47941/ijce.2139> EDN: BIZPFA
- [10] Zaresefat M, Derakhshani R, Griffioen JA. Empirical bayesian kriging, a robust method for spatial data interpolation of a large groundwater quality dataset from the Western Netherlands. *Water*. 2024;16(18):2581. <https://doi.org/10.3390/w16182581> EDN: YRPPUM
- [11] Chen J, Chen S, Fu R, Li D, Jiang H, Wang C, Peng Y, Jia K, Hicks BJ. Remote sensing big data for water environment monitoring: current status, challenges, and future prospects. *Earth's Future*. 2022;10(2):e2021EF002289. <https://doi.org/10.1029/2021EF002289>
- [12] Gusev AV, Shakhramanyan MA. Development of a software package for determining key parameters of water bodies required for building an environmental monitoring network. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(1):129–137. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-1-129-137> EDN: YELZJY
- [13] Isa ARM, Yusoff IM, Rahman RA. Lake Water quality assessment through GIS based interpolation method: a case study of Beris Dam, Kedah, Malaysia. *Trends in Sciences*. 2024;21(4):7333. <https://doi.org/10.48048/tis.2024.7333>
- [14] Mei H, Han P, Wang Y, Zeng N, Liu D, Cai Q, Deng Z, Wang Y, Pan Y, Tang X. Field Evaluation of Low-Cost Particulate Matter Sensors in Beijing. *Sensors*. 2020;20(16):4381. <https://doi.org/10.3390/s20164381> EDN: EPRDDO
- [15] Heintzelman A, Filippelli GM, Moreno-Madriñan MJ, Wilson JS, Wang L, Druschel GK, Lulla VO. Efficacy of Low-Cost Sensor Networks at Detecting Fine-Scale Variations in Particulate Matter in Urban Environments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023;20(3):1934. <https://doi.org/10.3390/ijerph20031934> EDN: CCMGFE

Сведения об авторах:

Гусев Андрей Вячеславович, аспирант, кафедра экологии и природоохранной деятельности, Российский государственный социальный университет, Российская Федерация, 129226, г. Москва, ул. Вильгельма Пика, д. 4; ведущий инженер-программист, ООО «Сенсоматика», Российская Федерация, 127247, г. Москва, Дмитровское шоссе, д. 100, стр. 2, этаж 9, пом. 4940. ORCID: 0009-0001-1083-5242; eLIBRARY SPIN-код: 2732-1655. E-mail: gusevandre2015@yandex.ru

Шахрамьян Михаил Андраникович, доктор технических наук, профессор кафедры экологии и природоохранной деятельности, Российский государственный социальный университет, Российская Федерация, 129226, г. Москва, ул. Вильгельма Пика, д. 4; профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, 125167, г. Москва, проспект Ленинградский, д. 49/2; eLIBRARY SPIN-код: 6603-6401. E-mail: MASHakhramanyan@fa.ru

Bio notes:

Andrey V. Gusev, Postgraduate Student, Department of Ecology and Environmental Protection, Russian State Social University, 4 Wilhelm Pika St, Moscow, 129226, Russian Federation; Lead Software Engineer, Sensomatics LLC, 100 Dmitrovskoye Shosse, bldg 2, 9th Floor, Room 4940, Moscow, 127247, Russian Federation. ORCID: 0009-0001-1083-5242; eLIBRARY SPIN-code: 2732-1655. E-mail: gusevandrey2015@yandex.ru

Mikhail A. Shakhramanyan, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Ecology and Environmental Protection, Russian State Social University, 4 Wilhelma Peak St, Moscow, 129226, Russian Federation; Professor of the Department of Life Safety at the Financial University under the Government of the Russian Federation, 49/2 Leningradsky Prospekt, Moscow, 125167, Russian Federation. eLIBRARY SPIN-code: 6603-6401. E-mail: MASHakhraman-yan@fa.ru